

Capítulo

4

Redes Cognitivas: Um Novo Paradigma para as Comunicações Sem Fio

Marcelo Portela Sousa^{1,2}, Rafael Fernandes Lopes^{1,2,3},
Waslon Terllizzie Araújo Lopes^{1,2}, Marcelo Sampaio de Alencar^{1,2}

¹ Universidade Federal de Campina Grande – UFCG – Campina Grande, Brasil

² Instituto de Estudos Avançados em Comunicações – IECOM – Campina Grande, Brasil

³ Instituto Federal do Maranhão – IFMA – São Luís, Brasil

Abstract

Several areas of human activity depend on the existence of mobile communications services. However, despite the high demand for spectrum, studies indicate its sub-utilization. The limited availability of spectrum and the inefficiency of its usage generate a demand for new mechanisms and paradigms that can exploit the spectrum opportunisticly. In this context, a new concept named Cognitive Network arises, a networking technology that allows efficient utilization of the allocated frequency bands by opportunistic access to these bands. In this chapter the main concepts related to technology and architecture of cognitive networks are presented, in order to create a basic theoretical foundation for the subject.

Resumo

Diversos setores da atividade humana dependem da existência de serviços de comunicações móveis. No entanto, apesar da grande procura por faixas de espectro, estudos indicam sua subutilização. A limitada disponibilidade de faixas de espectro e a ineficiência de seu uso geram demandas por novos mecanismos e paradigmas que possam explorar o espectro de maneira oportunista. Nesse contexto, surge um conceito denominado Redes Cognitivas, uma tecnologia de rede que possibilita um melhor aproveitamento de faixas de frequência alocadas, porém subutilizadas, por meio do acesso oportunista a estas faixas. Neste capítulo os principais conceitos relacionados à tecnologia e à arquitetura de redes cognitivas são apresentados, com vistas a criar uma fundamentação teórica básica sobre o assunto.

4.1. Introdução

Os serviços de comunicações móveis têm sido usados em diferentes contextos, provendo desde comunicações celulares até o compartilhamento de dados em redes de computadores sem fio. Para evitar interferência entre os sinais de rádio transmitidos, as agências governamentais estabelecem políticas de alocação do espectro de rádio-frequência (RF) [21, 68], que estão geralmente vinculadas ao pagamento de licenças de uso.

A considerável quantidade de serviços de comunicações criados nos últimos anos tem sido responsável pela demanda por alocação do espectro de RF junto às agências de regulamentação, levando à escassez de recursos espectrais em diversas localidades. Com a maior parte do espectro de rádio já alocado, destinar faixas livres para novos serviços ou melhorar os já existentes tem se tornado uma tarefa cada vez mais difícil [30].

Apesar da grande procura por algumas faixas de espectro, estudos indicam uma sub-utilização delas. Uma pesquisa realizada pela Força Tarefa em Políticas de Espectro da Comissão de Comunicações Federal (FCC – *Federal Communications Commission*) aponta uma considerável variação temporal e geográfica no uso do espectro alocado (entre 15 e 85%) [20].

Cabric et al. [8] apresentam em seu trabalho uma medição do uso do espectro no centro da cidade de Berkeley. A Figura 4.1 apresenta o gráfico da densidade espectral de potência obtida na medição¹. Esse gráfico indica uma baixa utilização do espectro alocado, especialmente nas faixas de 3 a 6 GHz.

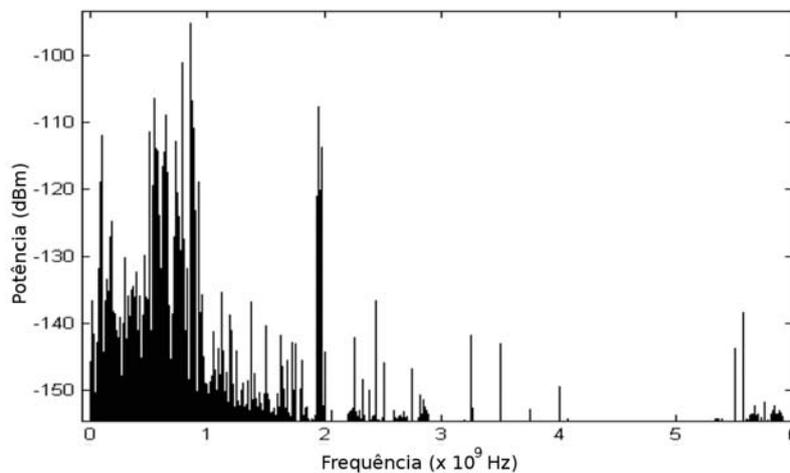


Figura 4.1. Medição da utilização do espectro de 0-6 GHz no centro de Berkeley [8].

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]. As Redes Cognitivas, também denominadas Redes de Rádio Cognitivo ou Redes sem fio de Próxima Geração [2, 50, 73], representam uma tecnologia de rede que aumenta a eficiência da alocação espectral, por meio do acesso oportunista às faixas de frequência.

¹Os sinais foram coletados em intervalos de tempo de $50 \mu\text{s}$, amostrados a uma taxa de 20×10^9 amostras/s

A rede cognitiva foi primeiramente definida por Thomas et al. como [73]:

... uma rede dotada de capacidade cognitiva, que pode perceber as condições atuais da rede e então planejar, decidir e atuar sobre essas condições. A rede pode aprender a partir dessas adaptações e utilizar essas informações para tomar futuras decisões, enquanto leva em consideração os objetivos de transmissão fim-a-fim.

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, provendo acesso oportunista às faixas licenciadas sem, no entanto, interferir com seus usuários (usuários primários). Entretanto, o desenvolvimento de tecnologias de redes cognitivas impõe desafios de pesquisa, devido à grande faixa espectral a ser gerenciada e aos diversos requisitos de qualidade de serviço (QoS – *Quality of Service*) das aplicações.

De forma a adaptar automaticamente seus enlaces e protocolos de comunicação e utilizar o espectro de maneira oportunista é necessário que as redes cognitivas sejam dotadas de conhecimento contextual derivado de seu ambiente [52, 60]. Por meio da ciência do contexto, os nós da rede podem reconhecer e selecionar automaticamente a tecnologia de acesso sem fio a ser utilizada, em função de sua disponibilidade, localização e tempo [24]. Assim, entre as principais informações de contexto do ambiente, merecem destaque as relacionadas à ocupação espectral.

A principal tecnologia empregada no desenvolvimento da infraestrutura de redes cognitivas são os Rádios Cognitivos (*Cognitive Radios*) [53, 55]. Assim como as redes cognitivas, os rádios cognitivos 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 camadas deste modelo.

Mais especificamente, a tecnologia de rádio cognitivo permite aos seus usuários [2]:

1. Determinar quais faixas do espectro estão disponíveis e detectar a presença de usuários primários, quando há comunicação em uma faixa licenciada (sensoriamento espectral);
2. Selecionar o melhor canal disponível para transmissão (gerenciamento espectral);
3. Compartilhar o acesso a esse canal com outros usuários (compartilhamento espectral);
4. Disponibilizar o canal quando um usuário primário é detectado, mantendo a comunicação enquanto migra para outra faixa (mobilidade espectral ou *handoff* espectral).

Para realizar as funções apresentadas é necessário que os protocolos de comunicação sejam capazes de se adaptar à disponibilidade de faixas de espectro. Dessa forma, os rádios cognitivos utilizam métricas de desempenho das condições atuais de cada camada da pilha de protocolos para determinar a configuração ótima de operação da rede. Para tanto, as redes cognitivas necessitam utilizar uma abordagem de projeto de relacionamento entre camadas (*cross-layer design*), com vistas à obtenção de um desempenho ótimo.

Os componentes de comunicação de uma rede cognitiva e suas interações são ilustradas na Figura 4.2. 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.

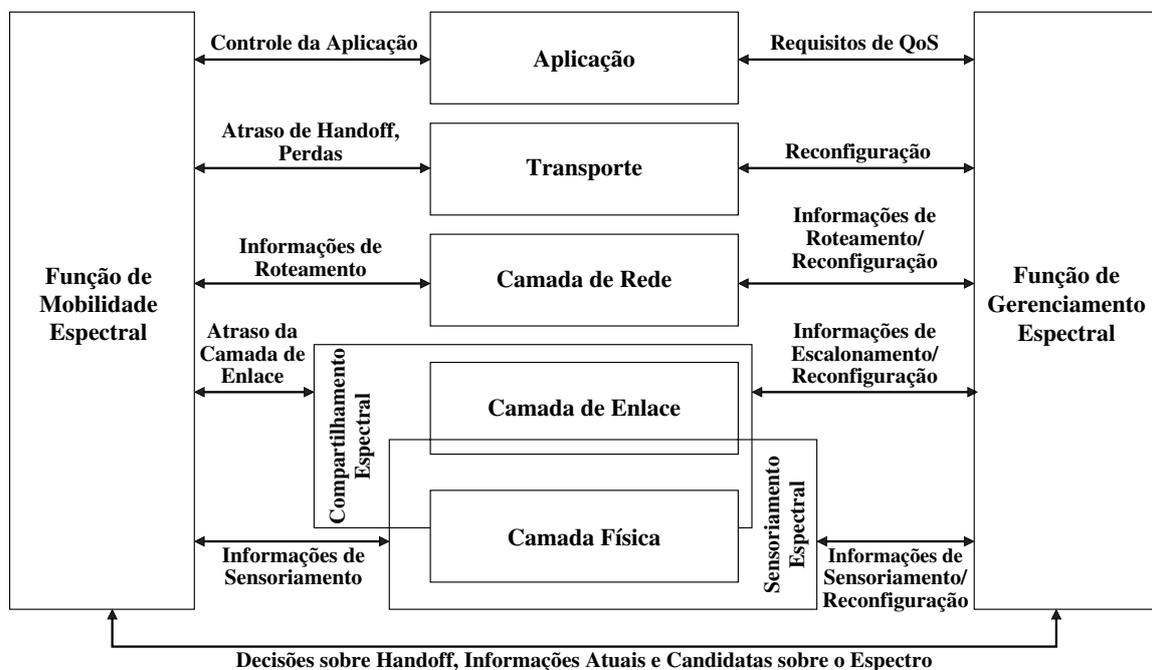


Figura 4.2. Funcionalidades de comunicação de uma rede cognitiva [2].

Os protocolos de comunicação disponíveis atualmente não são adequados para aplicação em redes cognitivas, pois a utilização dinâmica do espectro pode causar efeitos adversos em seu desempenho, principalmente aos protocolos sensíveis à latência (*e.g.*, *streaming* multimídia). Assim, é necessário que sejam desenvolvidos protocolos que, baseados nas informações sobre o estado atual do espectro, possam modificar automaticamente sua tecnologia de transmissão e parâmetros de configuração em função da ocupação espectral. Esse é um importante tópico de pesquisa da área de redes cognitivas.

Neste capítulo, os principais conceitos relacionados à tecnologia e arquitetura de redes cognitivas são apresentados, com vistas a criar uma fundamentação teórica básica sobre o tema. As principais técnicas e algoritmos empregados no processo de descoberta, utilização e compartilhamento do espectro são abordadas, bem como os desafios relati-

vos aos serviços providos por camadas superiores do modelo OSI. Por fim, os principais projetos, tendências e pesquisas em desenvolvimento na área são apresentados.

Este capítulo está organizado da seguinte maneira: a Seção 4.2 apresenta os componentes básicos da arquitetura geral das redes cognitivas, suas funções e cenários de aplicação da tecnologia; a Seção 4.3 aborda aspectos relacionados ao projeto da camada física dos rádios cognitivos; na Seção 4.4 as principais propriedades, vantagens e fatores limitantes dos protocolos de controle de acesso ao meio para redes cognitivas são discutidos; a Seção 4.5 discute algumas características relativas ao processo de roteamento em redes cognitivas; a Seção 4.6 apresenta algumas aplicações de redes cognitivas; a Seção 4.7 aborda o padrão IEEE 802.22 que utiliza a tecnologia de redes cognitivas para transmissões em redes sem fio regionais, por meio do acesso não licenciado ao espectro de TV; por fim, a Seção 4.8 apresenta as considerações finais deste capítulo.

4.2. Arquitetura Geral das Redes Cognitivas

Os protocolos e as tecnologias de redes sem fio existentes apresentam limitações em relação à sua capacidade de adaptação [74]. Essas adaptações são tipicamente reativas, sendo executadas após a ocorrência de algum evento. Além disso, os nós da rede geralmente não realizam trocas de informações sobre seu estado atual. Dessa forma, os nós da rede desconhecem as condições experimentadas por outros elementos, o que inviabiliza a criação de uma visão geral sobre o estado da rede, resultando em comunicações com desempenho sub-ótimo.

Além disso, as arquiteturas de redes sem fio atuais são bastante heterogêneas em termos de políticas de espectro e tecnologias de comunicação [1]. Essa heterogeneidade impõe desafios ao projeto de protocolos para redes cognitivas. Assim, uma completa definição da arquitetura dessas redes é necessária.

A Figura 4.3 apresenta a arquitetura geral das redes cognitivas proposta por Akyildiz et al. [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.

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

- **Rede Primária** – infraestrutura de rede já existente e que tem direitos de acesso exclusivos a uma certa faixa do espectro (*e.g.*, redes celulares e de televisão). Os componentes de uma rede primária 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 infraestrutura para coexistir com estações radiobase e usuários cognitivos;
 - **Estação Radiobase Primária**: componente fixo da infraestrutura de rede que tem licença de acesso ao espectro (*e.g.*, transceptor de uma estação radiobase

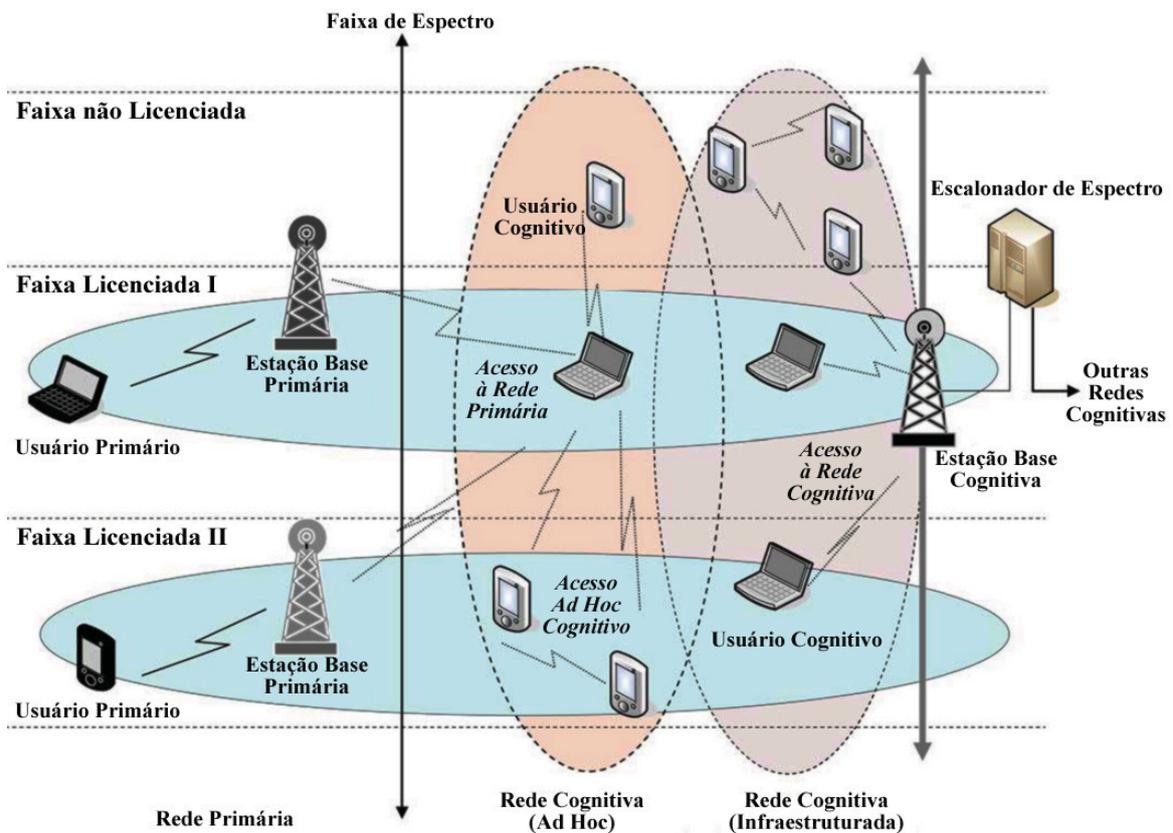


Figura 4.3. Arquitetura de redes cognitivas [2].

em um sistema celular). A estação radiobase primária não apresenta capacidade cognitiva para o compartilhamento do espectro com usuários cognitivos;

- **Rede Cognitiva ou Secundária** – infraestrutura 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 infraestruturado 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. Esses usuários fazem uso das funcionalidades de compartilhamento de faixas licenciadas do espectro para realizar comunicações;
 - Estação Radiobase Cognitiva, Secundária ou não Licenciada: componente fixo da infraestrutura da rede cognitiva. A estação radiobase 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 [24]. 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 [7, 38].

A arquitetura de referência das redes cognitivas (apresentada na Figura 4.3) consiste de diferentes tipos de redes: (a) uma rede primária, (b) uma rede cognitiva infraestruturada e (c) uma rede cognitiva *ad hoc*. As redes cognitivas são operadas em um ambiente heterogêneo que consiste de faixas licenciadas e não licenciadas. Além disso, os usuários cognitivos podem se comunicar uns com os outros por meio de múltiplos saltos ou estações radiobase.

Nas redes cognitivas existem três diferentes formas de acesso [2]:

- Redes de Acesso Cognitivas – os usuários cognitivos podem acessar as estações base cognitivas em faixas licenciadas ou não licenciadas;
- Redes Cognitivas *Ad hoc* – os usuários cognitivos podem se comunicar com outros usuários cognitivos por meio de conexões *ad hoc* em faixas licenciadas ou não licenciadas;
- Redes de Acesso Primárias – os usuários cognitivos podem ainda acessar as estações radiobase primárias por meio de faixas licenciadas para fazer uso de seus serviços.

De acordo com a arquitetura de referência, diversos mecanismos são necessários para permitir a heterogeneidade em redes cognitivas. A seção a seguir aborda as funcionalidades necessárias à operação das redes cognitivas.

4.2.1. Funcionalidades das Redes Cognitivas

As redes cognitivas podem operar tanto em faixas licenciadas quanto não licenciadas [2]. Consequentemente, as funcionalidades requeridas pelas redes cognitivas variam de acordo com o tipo de faixa acessada. Esta seção apresenta as funcionalidades existentes em redes cognitivas operando em faixas licenciadas e não licenciadas.

4.2.1.1. Operação de Rede Cognitiva em Faixa Licenciada

Conforme discutido na Seção 4.1, existe uma considerável variação na utilização do espectro de radiofrequência licenciado. Consequentemente, as redes cognitivas podem explorar essas faixas do espectro de maneira oportunista, por meio do uso de técnicas de acesso dinâmico ao espectro. Assim, as redes cognitivas devem ter mecanismos que permitam sua coexistência com redes primárias na mesma faixa do espectro.

Os desafios para a operação de redes cognitivas em faixas licenciadas derivam da existência de usuários primários nestas faixas. Ao operar em faixas licenciadas, as

redes cognitivas devem detectar os usuários primários, visto que a capacidade de transmissão dos canais vagos do espectro depende da interferência dos usuários primários próximos [2]. Portanto, evitar interferência com os usuários primários é um dos aspectos mais importantes da arquitetura das redes cognitivas. Além disso, se um usuário primário começar a utilizar uma faixa do espectro alocada por um usuário cognitivo, este deve imediatamente desocupar a faixa atual e migrar para outra faixa disponível (*i.e.*, realizar *handoff* espectral).

4.2.1.2. Operação de Rede Cognitiva em Faixa não Licenciada

A política de abertura de determinadas faixas do espectro, que iniciou com a banda industrial, científica e médica (ISM – *Industrial, Scientific and Medical*), permitiu o desenvolvimento de uma variedade de importantes tecnologias e aplicações inovadoras. Entretanto, a utilização da banda ISM por tecnologias de rede heterogêneas tem reduzido a disponibilidade espectral desta faixa, levando ao aumento de interferências. A capacidade de acesso ao espectro aberto e a qualidade de serviço que essas tecnologias podem oferecer dependem das técnicas de projeto empregadas pelos rádios para alocação eficiente do espectro.

As redes cognitivas podem ser projetadas para operação em faixas não licenciadas, melhorando a eficiência nesta porção do espectro. Dado que não existem proprietários de licenças, todos os nós da rede têm os mesmos direitos de acesso às faixas do espectro. Múltiplas redes cognitivas podem coexistir na mesma área e se comunicar utilizando as mesmas faixas do espectro. Algoritmos de compartilhamento inteligente do espectro podem melhorar a eficiência no uso do espectro e fornecer uma alta qualidade de serviço [2].

Nessa arquitetura, os usuários cognitivos detectam as transmissões de outros usuários cognitivos. Diferentemente das operações em faixas licenciadas, um *handoff* espectral não é provocado pelo aparecimento de outros usuários primários [2]. Entretanto, dado que todos os usuários cognitivos têm os mesmos direitos de acesso ao espectro, eles devem competir entre si pelas mesmas faixas não licenciadas. Assim, nessa arquitetura, métodos de compartilhamento do espectro devem ser empregados pelos usuários cognitivos.

4.3. Projeto da Camada Física

Os avanços na tecnologia de rádio têm permitido o desenvolvimento de técnicas de acesso dinâmico ao espectro eletromagnético e de configuração adaptativa dos enlaces e protocolos de comunicação. A utilização dessas técnicas permite às aplicações se beneficiarem de canais de comunicação com melhor desempenho e menor interferência. Nesse contexto, os rádios cognitivos representam um novo paradigma para as comunicações sem fio, no qual os nós da rede são dotados da capacidade de modificar seus parâmetros de transmissão e recepção, de forma a tornar a comunicação mais eficiente, evitando interferência com usuários licenciados e não licenciados. Por meio da tecnologia de rádio cognitivo é possível ter acesso a comunicação altamente confiável, quando e onde for necessário, e ainda tornar mais eficiente a utilização do espectro de rádio [36].

O principal objetivo da tecnologia de rádio cognitivo é fazer uso da melhor faixa de espectro disponível. Para tanto, os rádios cognitivos utilizam sua capacidade cognitiva

e seus recursos de reconfigurabilidade. Considerando que a maior parte do espectro de RF pode estar alocada, um desafio importante dessa tecnologia é o compartilhamento do espectro licenciado sem interferir com as transmissões dos usuários primários [2].

Segundo Haykin [36], as faixas do espectro de RF podem ser classificadas de acordo com o espectro de potência dos sinais de rádio presentes nelas. Essa classificação é apresentada a seguir:

- Espaços negros (*black spaces*): faixas ocupadas por interferências locais, temporárias e de alta potência;
- Espaços cinzas (*grey spaces*): faixas parcialmente ocupadas por interferências de baixa potência;
- Espaços brancos (*white spaces*): faixas livres de interferências de RF, exceto pelo ruído do ambiente (*e.g.*, ruído térmico, ruído impulsivo).

A tecnologia de rádio cognitivo utiliza espaços em branco (também denominados lacunas de espectro) em faixas licenciadas e não-licenciadas de maneira oportunista para realizar a transmissão de informações [11, 71]. Caso essas faixas passem a ser usadas por um usuário licenciado, o rádio cognitivo deve mudar seu canal de operação para outra lacuna espectral, ou permanecer na mesma faixa, alterando sua potência de transmissão ou esquema de modulação, de forma a evitar interferências. Esse esquema é ilustrado na Figura 4.4.

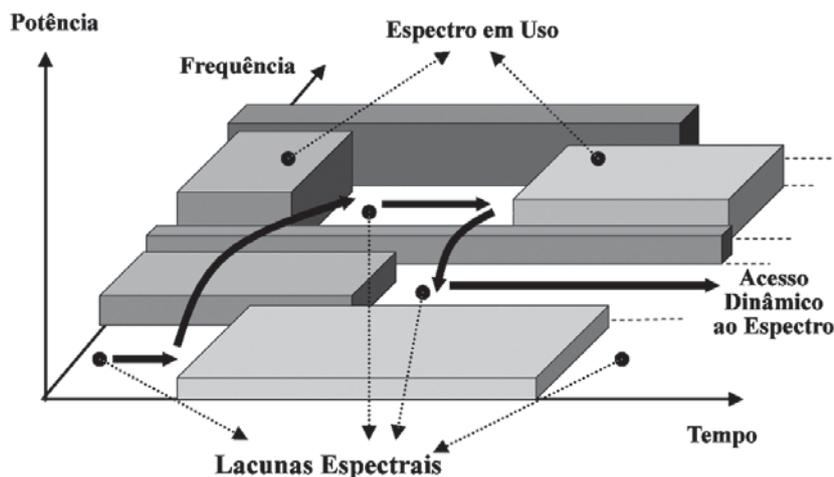


Figura 4.4. Conceito de lacunas espectrais [2].

Considerando que diversos espaços em branco podem estar disponíveis, é necessário que os rádios cognitivos tomem ciência desta diversidade de oportunidades para selecionar o melhor canal disponível [45]. Assim, o próximo desafio é a construção de protocolos de rede que se adaptem dinamicamente à faixa de espectro selecionada [2].

Para permitir uma utilização eficaz do espectro, evitando interferências com usuários primários, é necessário identificar, com confiabilidade, espaços em branco no espectro, em termos de frequência, tempo e espaço [33]. Entre as principais abordagens

empregadas com essa finalidade merecem destaque: registro em banco de dados, sinalizadores regionais e sensoriamento espectral. A Tabela 4.1 apresenta um resumo das características dessas técnicas.

Tabela 4.1. Classificação dos métodos de identificação de espaços em branco [30, 33].

	Custo	Compatível com sistemas legados	Complexidade	Posicionamento	Conexão à Internet	Monitoramento contínuo	Canal padronizado
Registro em banco de dados	Alto		Baixa	X	X		
Sinalizadores regionais	Alto		Baixa	X			X
Sensoriamento espectral	Baixo	X	Alta			X	

Os dois primeiros métodos deixam a cargo dos sistemas primários a tarefa de fornecer aos usuários secundários as informações relativas à utilização atual do espectro [6]. Na primeira abordagem, os usuários primários registram os dados relevantes (*e.g.*, sua localização, potência e tempo de utilização esperado) em um banco de dados centralizado. Os sistemas secundários devem se conectar a esse banco de dados (*e.g.*, por meio da Internet) para determinar a disponibilidade de lacunas espectrais em suas localizações. Alternativamente, as informações de ocupação do espectro fornecidas pelos usuários primários em operação em cada região podem ser difundidas sobre uma determinada área utilizando sinalizadores regionais (*beacons*), dessa forma eliminando a necessidade de uma conexão ao banco de dados. A partir dessas sinalizações, os usuários secundários podem identificar os lacunas de espectro existentes em sua vizinhança.

Apesar de demandarem transceptores secundários mais simples, os métodos apresentados requerem modificações nos atuais sistemas licenciados e, dessa forma, são incompatíveis com sistemas primários legados. Além disso, sua implantação apresenta um alto custo e requer a existência de mecanismos de obtenção de informações de posicionamento aos usuários secundários (além de uma conexão a um banco de dados ou a um canal dedicado e padronizado com os sinalizadores regionais). Por outro lado, o sensoriamento espectral confia apenas na capacidade do sistema secundário de identificar os espaços em branco, com um sensoriamento direto nas faixas licenciadas. Assim, o sistema secundário monitora as faixas de frequência licenciadas e, de maneira oportunista, transmite quando não detecta nenhum sinal primário.

Por conta de seu baixo custo e sua compatibilidade com sistemas primários legados, o sensoriamento espectral tem recebido mais atenção da comunidade científica que as outras abordagens [33]. Essa técnica tem sido a principal alternativa considerada para inclusão em padrões que utilizam a tecnologia de rádio cognitivo, como o padrão IEEE 802.22 [37, 16]. Por outro lado, uma desvantagem dessa abordagem é que os dados de utilização do espectro dos sistemas primários não estão disponíveis *a priori*. Além disso, os usuários secundários devem sensoriar continuamente as faixas licenciadas enquanto a utilizam, de forma a perceber o retorno dos usuários primários às faixas licenciadas. A subseção a seguir apresenta detalhadamente a técnica de sensoriamento espectral.

4.3.1. Sensoriamento Espectral

A modificação dos parâmetros de transmissão, realizada pelos rádios cognitivos, é baseada no monitoramento ativo de diversos fatores externos e internos ao ambiente de rádio, como a ocupação do espectro de RF, o comportamento do usuário e o estado da rede. Esses e outros fatores compõem o conhecimento contextual do ambiente de rádio.

Para manter sua ciência sobre a ocupação do espectro de RF, os rádios cognitivos necessitam verificar frequentemente os canais disponíveis em um amplo espectro. No entanto, esse processo nem sempre resulta em estimativas confiáveis, uma vez que ele se baseia na observação local de sinais cuja potência recebida pode ser baixa, ou mesmo não detectável. Erros nas estimações espectrais podem levar à ocorrência de interferências entre as transmissões. Além disso, durante o sensoriamento espectral, a transmissão de dados pelas aplicações não é possível, resultando em atrasos adicionais e em uma redução na disponibilidade de largura de banda para o tráfego das aplicações [45].

Um rádio cognitivo tem a capacidade de verificar o ambiente espectral sobre uma ampla faixa e explorar esta informação para, oportunisticamente, prover enlaces sem fio que melhor atendam aos requisitos de comunicação dos usuários e aplicações. Esses dispositivos são projetados para serem cientes e sensíveis às mudanças no ambiente ao seu redor, realizando adaptações à medida que detectam espaços em branco. Em geral, a capacidade de sensoriamento espectral está associada às camadas física (PHY) e de controle de acesso ao meio (MAC), conforme ilustrado na Figura 4.5.

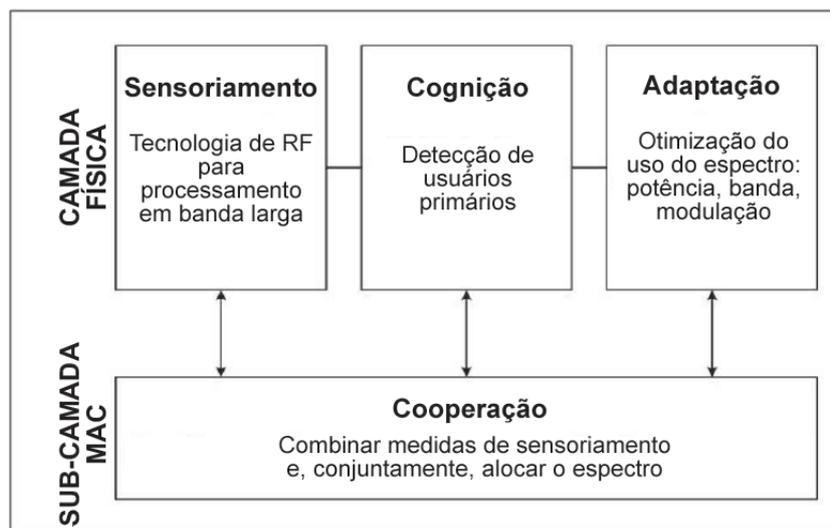


Figura 4.5. Funcionalidades das camadas relacionadas ao sensoriamento espectral [8].

Dado que os rádios cognitivos são considerados usuários de menor prioridade do espectro licenciado, um requisito fundamental é evitar interferências com potenciais usuários primários em sua vizinhança. Por outro lado, sistemas primários não precisam modificar sua infraestrutura para o compartilhamento do espectro com redes cognitivas. Os rádios cognitivos devem ser capazes de detectar a presença de usuários primários por meio de um processo contínuo de sensoriamento.

Classes diferentes de usuários primários podem requerer níveis de sensibilidade e

taxas de sensoriamento distintos para sua detecção. Por exemplo, sinais de difusão de TV são mais facilmente detectados que sinais de um sistema de posicionamento global (GPS – *Global Positioning System*), dado que a sensibilidade dos receptores de TV é dezenas de decibéis menor que a dos receptores de GPS [8].

Em geral, a sensibilidade dos rádios cognitivos deve superar a dos receptores dos usuários primários por uma ampla margem. Essa margem é necessária porque o rádio cognitivo não pode obter uma medição direta do canal entre o receptor e o transmissor primário, e deve basear sua decisão na medição local dos sinais emitidos pelo transmissor primário. Esse tipo de detecção é chamada de sensoriamento espectral local, e pode sofrer com o problema de ocultação de terminais, que pode ocorrer quando o rádio cognitivo está sombreado, sofrendo um severo desvanecimento por multipercurso, ou localizado dentro de construções com alta perda por penetração [8]. Uma possível abordagem para o tratamento desse problema pode ser a adoção de técnicas de sensoriamento espectral colaborativo, em que diversos rádios compartilham suas informações sobre a ocupação do espectro e realizam, conjuntamente, a detecção de sinais primários [32].

4.3.1.1. Arquitetura Física para o Sensoriamento Espectral

Para prover a capacidade de modificar seus parâmetros de operação dinamicamente, a infraestrutura dos rádios cognitivos utiliza a tecnologia de rádio definido por *software* (SDR – *Software Defined Radio*). Os SDRs são sistemas de comunicação de rádio em que os componentes, tipicamente implementados em *hardware* (e.g., *mixers*, filtros, amplificadores, moduladores/demoduladores, detectores, etc.), são implementados em *software*, criando grande flexibilidade em sua operação [23, 54]. A Figura 4.6 apresenta a arquitetura física geral dos transceptores SDR.

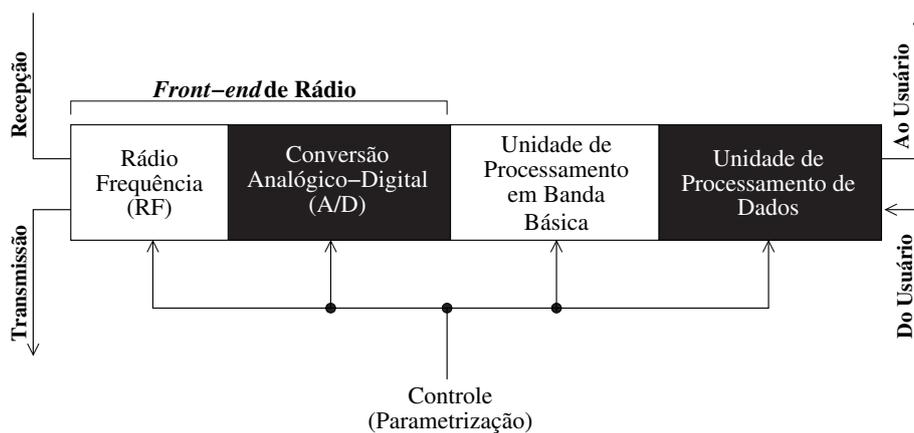


Figura 4.6. Arquitetura física geral dos SDRs [41].

Os principais componentes da arquitetura física dos SDRs são o *front-end* de rádio, que permite a recepção de sinais em um amplo espectro de frequências e a sua digitalização, e a unidade de processamento em banda básica, responsável por realizar o processamento dos sinais e, posteriormente, dos dados recebidos. Os componentes dessa arquitetura podem ser reconfigurados por meio de um barramento de controle que fornece

às unidades de processamento diversos parâmetros de configuração. Essa infraestrutura, chamada de SDR controlado por parâmetros (*parameter-controlled SDR* ou *PaC SDR*), garante que as configurações da transmissão possam ser modificadas instantaneamente, caso necessário [41].

4.3.2. Técnicas de Sensoriamento Espectral

O rádio cognitivo deve distinguir faixas do espectro livres e ocupadas. Para tanto, ele deve ter a capacidade de determinar se o sinal de um transmissor primário está presente em uma certa faixa do espectro.

Nessa abordagem, o rádio cognitivo realiza o monitoramento de frequências licenciadas, por meio de observações locais. Quando sinais primários não são detectados em uma determinada faixa, o rádio cognitivo passa a utilizar o canal de forma oportunista. Apesar de parecer similar à abordagem *listen-before-talk* (ouvir antes de falar) de sensoriamento de portadora física (empregado nas redes IEEE 802.11), existem efetivamente algumas diferenças importantes entre os dois, decorrentes dos rigorosos requisitos de não-interferência impostos para proteger os sistemas primários [30]. Por exemplo, ao alocar uma faixa do espectro, um rádio cognitivo deve continuar o monitoramento do canal e, caso um sinal licenciado seja detectado, ele deve disponibilizar o canal [8, 32].

O modelo básico de hipótese para a detecção de transmissores pode ser definido a seguir [32]

$$x(t) = \begin{cases} n(t) & : H_0, \\ hs(t) + n(t) & : H_1 \end{cases} \quad (1)$$

em que $x(t)$ é o sinal recebido pelo usuário cognitivo, $s(t)$ é o sinal transmitido pelo usuário primário, $n(t)$ é o ruído aditivo do canal e h é o ganho de amplitude do canal. H_0 é a hipótese nula, em que não existe nenhum sinal primário em uma certa faixa do espectro. Por outro lado, H_1 é a hipótese alternativa, que indica que existe um sinal de usuário primário.

Baseado no conhecimento dos sistemas secundários sobre a estrutura de sinais primários e suas características, diferentes métodos de sensoriamento podem ser utilizados para distinguir os espaços em branco de faixas ocupadas. Esses métodos podem ser classificados em três tipos [30]:

- (a) Filtragem Casada;
- (b) Detecção de Energia;
- (c) Detecção de Características Cicloestacionárias.

As subseções a seguir apresentam os métodos de sensoriamento espectral.

4.3.2.1. Filtragem Casada

A forma ótima para a detecção de sinais em ruído estacionário gaussiano é a utilização de filtros casados [61]. Entretanto, um filtro casado realiza a demodulação efetiva do sinal do usuário primário. Isso significa que o rádio cognitivo deve ter conhecimento *a priori* de características do sinal do usuário primário, das camadas física e MAC (*e.g.*, tipo de modulação, formato de pulso, formato de pacote). Para tanto, as informações relativas aos sinais a serem detectados precisam estar pré-armazenadas na memória do rádio cognitivo. Caso essas informações não sejam suficientemente precisas, o filtro casado poderá apresentar um baixo desempenho [2].

Para detectar o sinal do usuário primário é necessário realizar a sincronização temporal e de portadora. Além disso, dado que muitos sistemas de rede sem fio apresentam portadoras piloto, preâmbulos, palavras de sincronização ou códigos de espalhamento, estes podem ser usados para a detecção coerente.

A principal vantagem da utilização de filtros casados para sensoriamento espectral é que ele requer menos tempo de observação para atingir um certo nível de sensibilidade [70]. Por outro lado, é necessário que o sinal primário seja demodulado pela unidade de sensoriamento. Assim, os rádios cognitivos devem implementar todos os métodos de detecção relativos aos usuários primários que poderão ser detectados, aumentando a complexidade da unidade de sensoriamento. Essa abordagem é viável apenas no caso do sistema secundário operar em algumas poucas faixas primárias, como é o caso do padrão IEEE 802.22, que se propõe a utilizar faixas de TV de forma oportunista para comunicação em redes regionais (WRAN – *Wireless Regional Area Network*) [37, 16]. O custo de implementação e a complexidade associadas a essa abordagem aumenta à medida que mais faixas primárias são utilizadas de forma oportunista. Outra desvantagem associada a essa abordagem é o alto consumo de energia, uma vez que é necessário executar vários algoritmos de detecção.

4.3.2.2. Detecção de Energia

Caso o receptor não possa obter informações suficientes sobre os sinais dos usuários primários, uma alternativa simples para detectar um sinal primário com ruído é a detecção de energia. Um detector de energia simplesmente mede a energia recebida em uma faixa primária durante um intervalo de observação e a identifica como uma lacuna espectral caso a energia medida seja menor que um limiar apropriadamente definido.

Em níveis baixos de razão sinal-ruído, quando comparado à utilização de filtros casados, a detecção de energia requer um maior tempo de sensoriamento para atingir um bom desempenho [70]. Entretanto, seu baixo custo de implementação e simplicidade tornam essa abordagem um candidato favorável para o sensoriamento espectral em redes cognitivas.

Para realizar a medição de energia de um sinal recebido, o sinal de saída de um filtro passa baixa com largura de banda W é elevado ao quadrado e integrado durante o período de observação T . Finalmente, a saída do integrador Y é comparada a um limiar λ para decidir quando um usuário licenciado está presente (hipótese H_0) ou não (hipótese

H_1) [19]. Esse processo é ilustrado no diagrama de blocos da Figura 4.7.

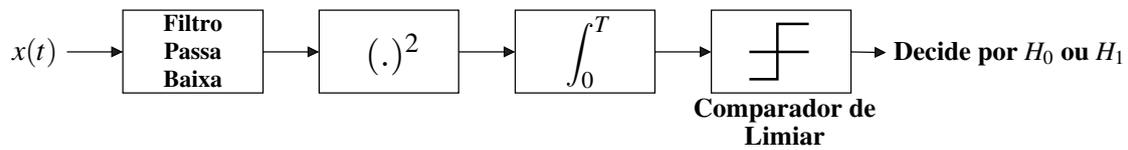


Figura 4.7. Diagrama de blocos de um detector de energia.

Se a detecção de energia puder ser aplicada em um ambiente sem desvanecimento, em que h é o ganho de amplitude do canal (conforme a Equação 1), a probabilidade de detecção P_d e de falso alarme P_f são dadas por [19]

$$P_d = P\{Y > \lambda | H_1\} = Q_m\left(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{\lambda}\right), \quad (2)$$

$$P_f = P\{Y > \lambda | H_0\} = \frac{\Gamma(u, \lambda/2)}{\Gamma(u)} \quad (3)$$

em que γ é a relação sinal-ruído, $u = TW$ é o produto tempo-largura de banda, $\Gamma(\cdot)$ e $\Gamma(\cdot, \cdot)$ são as funções gamma completa e incompleta e $Q_m(\cdot, \cdot)$ é a função Marcum-Q generalizada. Assim, enquanto uma baixa P_d pode resultar em estimativas erradas sobre a presença de usuários primários (levando a um baixo aproveitamento do espectro), uma alta probabilidade pode, por sua vez, aumentar a interferência aos usuários primários. Além disso, uma alta P_f pode resultar em uma baixa utilização do espectro, dado que falsos alarmes podem aumentar o número de oportunidades perdidas. Dada sua facilidade de implementação, diversos trabalhos têm adotado a abordagem de detecção de energia [31, 62].

O desempenho do detector de energia é suscetível à incerteza quando ele está imerso em ruído de alta potência. De forma a resolver esse problema, um tom piloto do transmissor primário pode ser utilizado para melhorar a precisão do detector de energia [62].

4.3.2.3. Detecção de Características Cicloestacionárias

A principal desvantagem do detector de energia é a sua falta de habilidade em distinguir entre fontes de energia recebida (sinal primário e ruído), tornando-o suscetível às incertezas relativas à potência do ruído de fundo, especialmente sob baixa razão sinal-ruído [66]. Assim, se algumas características do sinal primário como frequência da portadora ou tipo de modulação forem conhecidos, detectores de características podem ser empregados para lidar com essas informações, ao custo de uma maior complexidade [8, 22, 34, 58].

A análise de sinais aleatórios estacionários é baseada na função de autocorrelação e na densidade espectral de potência. Por outro lado, sinais cicloestacionários exibem correlação entre componentes espectrais separados devido à redundância causada pela periodicidade [26].

Sinais modulados são em geral acoplados com portadoras senoidais, trens de pulsos, sequências de saltos ou prefixos cíclicos, que resultam em uma periodicidade embutida. Esses sinais são caracterizados pela cicloestacionariedade, dado que sua média e autocorrelação exibem periodicidade.

Em seu trabalho, Freitas et al. [25] apresentam alguns exemplos de classificadores de modulação digital utilizados na literatura para o reconhecimento dos padrões de cicloestacionariedade. Os autores também apresentam o algoritmo proposto por [77] para a extração de características cicloestacionárias.

Assim, um sinal $x(t)$ é definido como cicloestacionário de segunda ordem (no sentido amplo) se sua função de autocorrelação

$$R_x(t, \tau) = E[x(t + \tau/2)x(t - \tau/2)] \quad (4)$$

for periódica no tempo t para cada intervalo de tempo τ . Além disso, a função de autocorrelação cíclica (FAC) [26] pode ser utilizada para estudar a cicloestacionariedade de um sinal, e é definida como

$$R_x^\alpha(\tau) = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta t} \int_{-\Delta t/2}^{\Delta t/2} x(t + \tau/2)x(t - \tau/2)e^{-i2\pi\alpha t} dt, \quad (5)$$

em que α é a frequência cíclica (variando entre todos os múltiplos da frequência fundamental) e Δt o intervalo de tempo.

A cicloestacionariedade de segunda ordem especifica o padrão de correlação que ocorre no espectro do sinal. Esse padrão pode ser usado, equivalentemente, para examinar a cicloestacionariedade do sinal e pode ser analisado usando a função de correlação espectral (FCE) [26]

$$S_x^\alpha(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow \infty} \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta t} \int_{-\Delta t/2}^{\Delta t/2} \Delta f X_{1/\Delta f}(t, f + \frac{\alpha}{2}) \cdot X_{1/\Delta f}^*(t, f - \frac{\alpha}{2}) dt,$$

em que

$$X_{1/\Delta f}(t, \nu) = \int_{t-1/2\Delta f}^{t+1/2\Delta f} x(u)e^{-i2\pi\nu u} du$$

representa a envoltória complexa da componente de faixa estreita do sinal $x(t)$, com frequência central ν e largura de faixa Δf . A cicloestacionariedade de segunda ordem de um sinal pode ser examinada por meio da FAC e FCE dos mesmos.

A função de correlação espectral é também chamada de *espectro cíclico*. Diferentemente da densidade espectral de potência, que é um transformação unidimensional de valor real, a FCE é uma transformação bidimensional, geralmente de valor complexo e de parâmetro α (frequência cíclica). A densidade espectral de potência é um caso especial da FCE para $\alpha = 0$. O diagrama de blocos da Figura 4.8 apresenta o esquema geral de implementação do detector de características cicloestacionárias.

A partir da análise espectral do sinal é possível detectar diversas características como o número de sinais, seus tipos de modulação, taxas de símbolo e presença de inter-

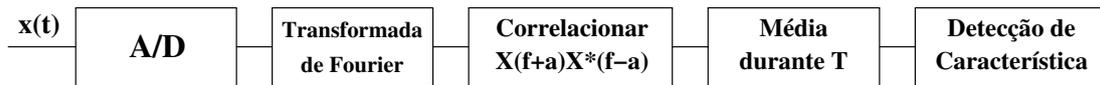


Figura 4.8. Diagrama de blocos da implementação de detectores de características cicloestacionárias.

ferências [8]. Diversas técnicas de reconhecimento de padrões podem ser aplicadas sobre a função de correlação espectral de sinais cicloestacionários como redes neurais, *naive bayes*, máquina de suporte vetorial (SVM – *Support Vector Machine*), *k* vizinhos mais próximos (KNN – *k-nearest neighbor*) e árvores de decisão.

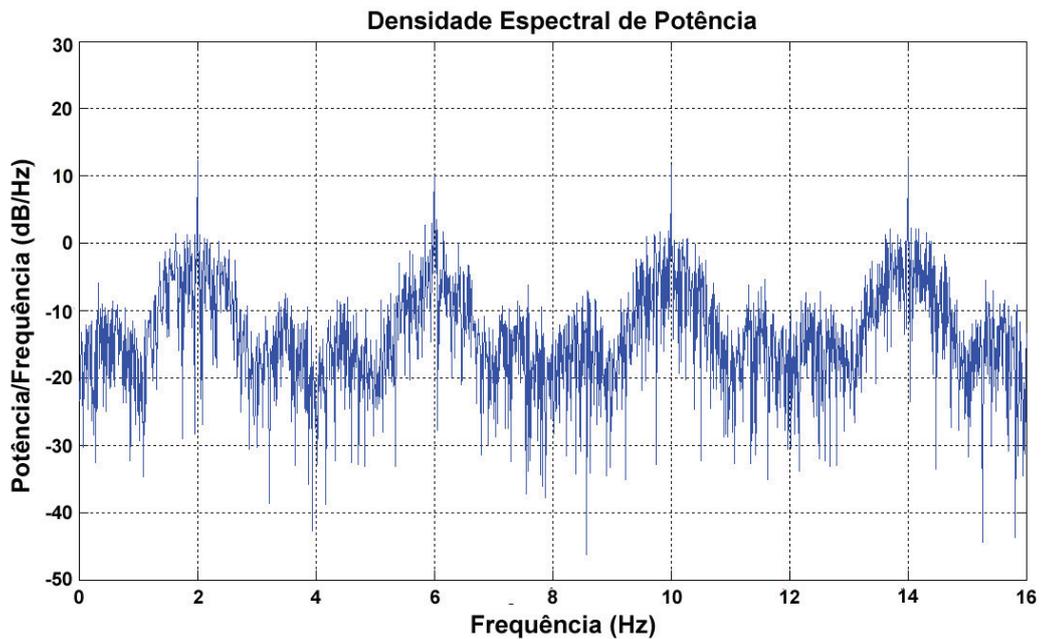
A Figura 4.9 apresenta a densidade espectral de potência e a função de correlação espectral de um sinal com modulação 4-FSK (*Frequency Shift Keying*). Enquanto a primeira medida é utilizada pela técnica de detecção de energia, a segunda é utilizada para a detecção de características cicloestacionárias em meio a ruído.

A principal vantagem da função de correlação espectral é que ela diferencia a energia do ruído da energia do sinal modulado. Isso resulta do fato de que o ruído é um sinal estacionário em sentido amplo e descorrelacionado, enquanto os sinais modulados são cicloestacionários com correlação espectral devido à redundância embutida na periodicidade do sinal [2]. Além disso, um detector de características cicloestacionárias apresenta um melhor desempenho que um detector de energia para diferenciar sinais e o ruído, principalmente por conta de sua robustez em lidar com a incerteza sobre potência do ruído [72]. Entretanto, é computacionalmente complexo e requer um tempo de observação significativamente longo.

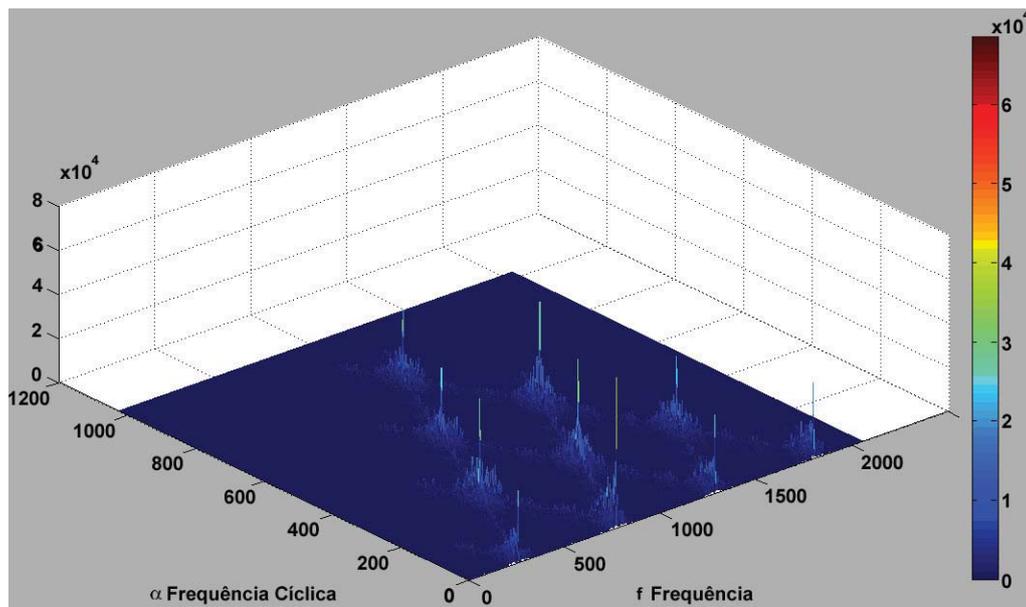
A Tabela 4.2 apresenta um quadro comparativo entre as principais classes de técnicas que podem ser empregadas para o processamento de sinais em sensoriamento espectral. Cada uma dessas técnicas apresenta vantagens e desvantagens, sendo cada uma adequada a diferentes situações. Na prática, uma combinação de diferentes técnicas podem ser utilizadas para tratar diferentes situações.

Tabela 4.2. Comparação das principais classes de técnicas empregadas no sensoriamento espectral [30].

Técnicas de Sensoriamento	Vantagens	Desvantagens
Filtro Casado	<ul style="list-style-type: none"> • Desempenho Ótimo 	<ul style="list-style-type: none"> • Dependente do sinal • Alto consumo de energia
Detecção de Energia	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa Complexidade • Independe do Sinal Primário 	<ul style="list-style-type: none"> • Suscetível à Incerteza do Ruído • Suscetível à Interferência
Detecção de Características	<ul style="list-style-type: none"> • Robusto contra Incerteza do Ruído • Robusto contra Interferência 	<ul style="list-style-type: none"> • Computacionalmente Complexo



(a) Densidade espectral de potência do sinal 4-FSK.



(b) Função de correlação espectral do sinal 4-FSK.

Figura 4.9. Densidade espectral de potência e função de correlação espectral de um sinal 4-FSK.

4.4. Controle de Acesso ao Meio (MAC)

Em redes cognitivas, identificar os recursos espectrais disponíveis por meio de técnicas de sensoriamento, decidir os períodos ótimos para transmissão e a coordenação do acesso espectral com outros usuários são funções importantes para os protocolos de acesso ao meio (MAC – *Medium Access Control*). Nesta seção, as principais propriedades, vantagens e fatores limitantes dos protocolos de controle de acesso ao meio para redes

cognitivas são apresentados, no contexto de redes infraestruturadas e *ad hoc*. Além disso, as técnicas de acesso ao espectro em redes cognitivas, como os protocolos de acesso aleatório, acesso agendado e acesso híbrido são abordadas. Os principais desafios e linhas de pesquisa são apresentados, destacando a relação próxima entre os protocolos MAC com o gerenciamento espectral e outras camadas da pilha de protocolos [18].

4.4.1. Gerenciamento Espectral em Redes Cognitivas

As faixas espectrais ociosas detectadas pela fase de sensoriamento espectral apresentam características diferentes, tanto pela natureza variante do ambiente de rádio, quanto por parâmetros da faixa espectral, como frequência de operação e largura de banda. Portanto, as redes cognitivas devem decidir pela melhor faixa espectral de modo a atender os requisitos de QoS, novas funções de gerenciamento de espectro são necessárias. Essas funções são classificadas como sensoriamento espectral, análise espectral e decisão espectral. Enquanto o sensoriamento espectral (descrito na Seção 4.3) está relacionado principalmente com a camada física, a análise e decisão espectral estão relacionadas a camadas superiores da pilha de protocolos [2].

4.4.1.1. Análise Espectral

Os espaços em branco apresentam características diferentes que variam no tempo. A análise espectral habilita a caracterização de diferentes faixas, que podem ser exploradas para a verificação da faixa espectral apropriada, com o intuito de atender os requisitos do usuário. Dessa forma, é essencial definir parâmetros como nível de interferência, taxa de erro do canal, atenuação por percurso e tempo de espera, que podem representar a qualidade de uma faixa de espectro particular [2, 50].

4.4.1.2. Decisão Espectral

Quando todas as faixas do espectro estiverem caracterizadas, operações apropriadas devem ser estabelecidas para a transmissão correspondente, considerando os requisitos de QoS e as características do espectro. Então, a função de gerenciamento do espectro precisa estar ciente dos requisitos de QoS do usuário. Parâmetros tais como taxa de dados, taxa aceitável de erros, limitante de atraso, modo de transmissão, e largura de banda da transmissão podem ser determinados. De acordo com as regras de decisão, o conjunto de faixas espectrais apropriadas pode ser escolhido.

Após selecionar os recursos espectrais por meio das funções de gerenciamento do espectro, o esquema de acesso espectral adequado precisa ser executado. Essa é a principal função do protocolo MAC em redes cognitivas [2].

4.4.2. Acesso ao Meio

O projeto de protocolos MAC para redes cognitivas tem seguido duas propostas distintas [18]. A primeira abordagem está focada principalmente em redes infraestruturadas, em que um coordenador central ou uma estação radiobase gerencia a alocação espectral e compartilha a informação de alocação espectral com os usuários secundários.

Eles, entretanto, podem participar da função de sensoriamento espectral e disponibilizam informações do canal para o controlador central. Os esforços pela padronização levam a uma uniformidade, de modo a permitir que múltiplos operadores de rádio cognitivo coexistam de forma independente.

Por outro lado, a segunda abordagem é otimizada para um tipo particular de ambiente, ou para um objetivo de aplicação específica do usuário. Essa abordagem tem sido bastante aplicada em protocolos distribuídos, que operam sem o suporte de uma entidade de controle centralizada. Como um exemplo, os nós em uma rede *ad hoc* podem exibir elevados graus de mobilidade, o que dificulta a coordenação do sensoriamento. Para tais casos, o protocolo MAC pode identificar a mobilidade com o objetivo de determinar quais regiões (cobertas pelo nó durante seu movimento) exibem altos níveis de atividade de usuários primários [18].

Tanto para redes infraestruturadas, quanto para redes *ad hoc*, os protocolos MAC são classificados em três categorias: acesso aleatório, acesso agendado e acesso híbrido.

4.4.2.1. Protocolos de Acesso Aleatório

Os protocolos de acesso aleatório não necessitam de sincronização temporal e são geralmente baseados no princípio de detecção de portadora de múltiplo acesso com prevenção de colisão (CSMA/CA – *Collision Sense Multiple Access with Collision Avoidance*). O usuário secundário monitora as faixas espectrais para detectar quando não há transmissões provenientes de outros usuários secundários e transmite após um determinado intervalo, para prevenir transmissões simultâneas [18].

Uma estratégia para a utilização de protocolos de acesso aleatório em redes cognitivas infraestruturadas foi proposta em [49]. Esse protocolo garante a coexistência entre os usuários cognitivos e os usuários primários pela adaptação da potência de transmissão e taxa de transmissão da rede cognitiva. Nessa estratégia, as estações radiobase cognitivas e primárias são separadas, já que elas podem apresentar sobreposição das áreas de cobertura. Os usuários cognitivos e primários estabelecem conexões diretas de transmissões de saltos únicos com suas respectivas estações radiobase [49].

O protocolo permite transmissões simultâneas dos usuários cognitivos mesmo quando os usuários primários são detectados, pois a interferência causada a eles está contida em um limiar pré-definido. A rede primária segue um protocolo CSMA, em que os usuários primários realizam o sensoriamento de portadora por um período τ_p antes de transmitir um pacote de requisição de envio (RTS – *Request To Send*) para a estação radiobase correspondente. Se a estação radiobase primária estiver disponível para a transmissão, ela pode responder com uma confirmação para o envio (CTS – *Clear To Send*). Entretanto, o tempo de sensoriamento de portadora realizado pelos usuários cognitivos é maior ($\tau_s \gg \tau_p$), de modo que a prioridade do acesso espectral é atribuída aos usuários primários. Baseada na distância dos usuários cognitivos a partir da estação radiobase e na potência do ruído, a estação radiobase decide os parâmetros de transmissão, tais como a potência e taxa de transmissão, para a transferência de dados correspondente. O usuário cognitivo tem a permissão de enviar apenas um pacote em uma rodada dessa negociação, com o objetivo de minimizar o risco de interferência para os usuários primários [49]. A

Figura 4.10 mostra o comportamento detalhado do protocolo em quatro casos diferentes (a-d):

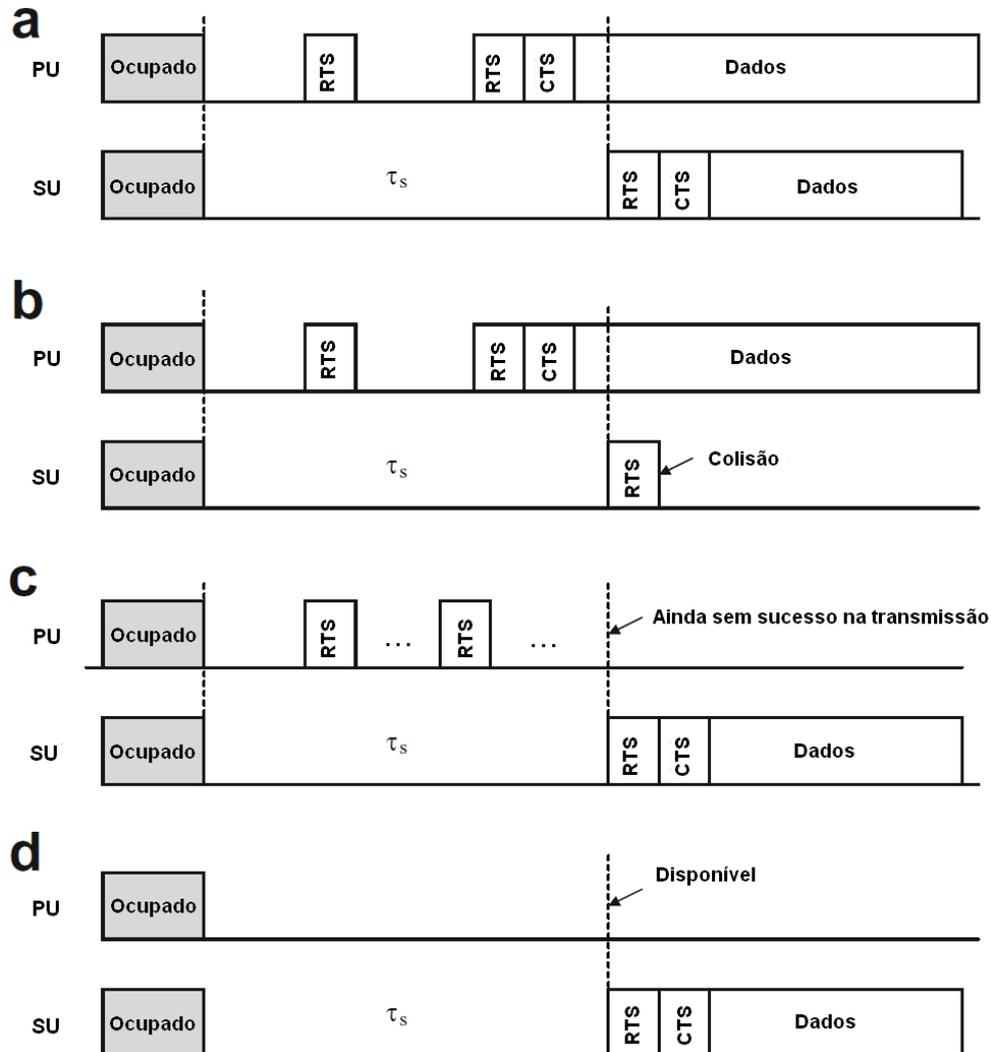


Figura 4.10. Protocolo baseado em CSMA com quatro opções de *handshaking* [18].

Caso a – O usuário primário ganha o acesso ao canal após o sensoriamento de portadora e envia seus dados. O usuário secundário avalia o canal por um período τ_s e ao detectar uma oportunidade de utilização do canal, disputa o acesso ao meio utilizando a sinalização RTS-CTS. Então, esse usuário transmite os dados com potência e taxa sugeridas pela estação radiobase, de modo que transmissões paralelas de usuários primários não sejam afetadas;

Caso b – Nesse caso o pacote RTS enviado pelo usuário secundário está sujeito a colisões. O usuário precisa aguardar pela próxima oportunidade de transmissão depois de repetir o processo de sensoriamento anterior;

Caso c – O usuário primário envia pacotes repetidos de RTS, mas incorre de colisões em

cada período. O usuário secundário pode iniciar a transmissão independentemente da rede primária, *i.e.*, sem ajustar sua potência e taxa de transmissão;

Caso d – O usuário primário não possui pacotes para enviar, de modo que o canal fica disponível durante o período de sensoriamento pelo usuário secundário. Similar ao caso anterior, o usuário secundário pode iniciar a transmissão sem considerar a rede primária [18].

Um protocolo MAC de acesso aleatório para redes *ad hoc* foi proposto em [39] para o sensoriamento espectral eficiente e acesso espectral considerando restrições de *hardware*, tais como as limitações operacionais de um terminal de rádio, o sensoriamento espectral parcial e os limites de agregação espectral. Ele usa um canal de controle comum (CCC – *Common Control Channel*), mas também possui um único rádio que simplifica os requisitos de *hardware*. As restrições de *hardware* podem ser divididas em duas classes: restrições de sensoriamento e restrições de transmissão. As restrições de sensoriamento lidam com a relação de compromisso entre o período usado para o sensoriamento e a precisão resultante. Um exemplo é o sensoriamento fino, em que um intervalo de tempo considerável precisa ser alocado por canal e uma porção limitada do espectro é observada. As restrições de transmissão estão relacionadas às limitações impostas pelo esquema de multiplexação por divisão em frequência ortogonal (OFDM – *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) que decide o intervalo da largura de banda, assim como o número máximo permitido de subportadoras. As contribuições do protocolo MAC são [39]:

- **Decisão de Sensoriamento** – De modo a determinar quantos canais devem ser avaliados, um critério de parada para o sensoriamento de sucessivos canais precisa ser decidido. A escolha de um número maior de canais aumenta a largura de banda disponível, levando a uma maior taxa de transmissão de dados. Entretanto, o custo de sensoriamento, especialmente se o canal identificado estiver indisponível, também deve ser considerado. O critério de parada escolhe um intervalo de tempo para interromper a busca de canais, de modo que a recompensa é maximizada. A escolha de quantos canais devem ser avaliados é também determinada pela largura de banda máxima permitida que pode ser acessada pelo transceptor em um dado instante e também pelo número máximo permitido de subportadoras que podem ser usadas nos canais disponíveis nesse intervalo. Os autores de [39] propõem indução reversa para solucionar esse problema e técnicas de redução de tempo computacional, especialmente se o número de canais for grande.
- **Operação do Protocolo** – O protocolo MAC é constituído pelas operações de contenção, sensoriamento e transmissão. Na fase de contenção, os pacotes de C-RTS e o C-CTS enviados sobre o CCC são usados para ganhar acesso ao canal. O terminal transmissor e seu respectivo receptor, que ganham acesso à contenção, trocam pacotes S-RTS e S-CTS para cada canal que é avaliado. Ao final de cada rodada de sensoriamento, a decisão é feita considerando a possibilidade de iniciar o sensoriamento em um novo canal, baseado no critério de parada. Após os canais serem decididos pelo par de nós, a transmissão dos dados começa e múltiplos canais encontrados durante o sensoriamento devem ser usados. Finalmente, os pacotes de

T-RTS e T-CTS são trocados na sinalização pelo CCC, estipulando o fim da transferência de dados e a liberação do canal para outros usuários primários [39].

4.4.2.2. Protocolos de Acesso Agendado

Os protocolos de acesso agendado necessitam de sincronização da rede, em que o tempo é dividido em períodos para canal de controle e transmissão dos dados. Os autores de [17] analisaram o desempenho de um protocolo MAC para redes infraestruturadas, com acesso agendado, utilizando o compartilhamento espectral em faixas de TV e as características do padrão IEEE 802.22 [16, 37]. A estação radiobase gerencia sua própria célula e os usuários secundários. No enlace de descida (DS – *downstream*) a multiplexação por divisão no tempo é utilizada, e no enlace de subida (US – *upstream*) um esquema TDMA por demanda é utilizado. O padrão especifica uma operação de agendamento temporal, com uma hierarquia de quadro de acordo com o exposto na Figura 4.11. Uma hierarquia de *superframes* é definida, em que cada um é formado por vários *frames* MAC, precedidos pelo preâmbulo. No início de cada *superframe* existe um cabeçalho de controle que é usado para informar os usuários secundários sobre os canais disponíveis correspondentes, as larguras de banda definidas, períodos futuros de acesso espectral, entre outros.

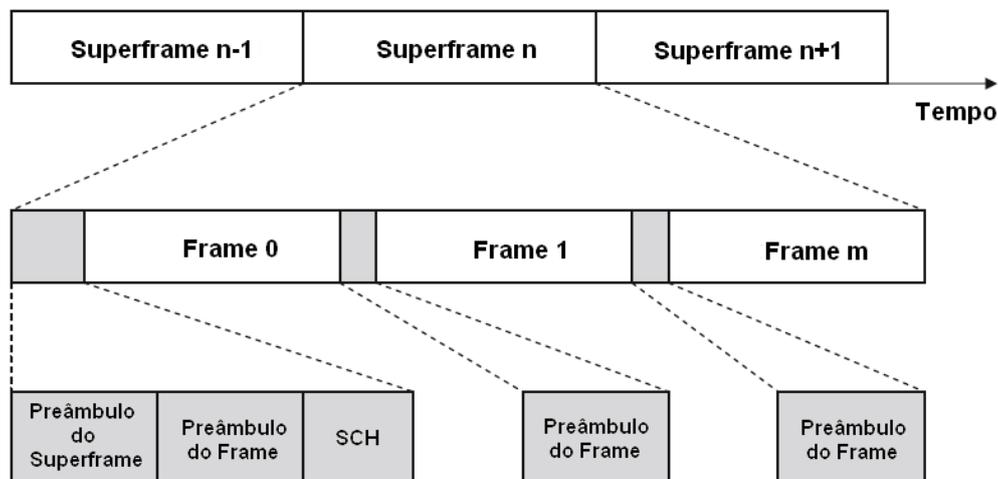


Figura 4.11. Estrutura do *superframe* no IEEE 802.22 [18].

O protocolo *Cognitive MAC* (C-MAC) [15], para redes *ad hoc*, é um esquema sincronizado, agendado temporalmente que apresenta uma considerável vazão de dados (*throughput*) e robustez às mudanças espectrais usando múltiplos transceptores. O C-MAC inclui dois conceitos importantes: o canal Rendezvous (RC – *Rendezvous Channel*) e o canal de apoio (BC – *Backup Channel*). O RC é estabelecido como o canal que pode ser usado para o maior tempo da rede, sem interrupção entre outras escolhas disponíveis. É utilizado para a coordenação dos nós, detecção de usuários primários e alocação de recursos do canal. O BC é determinado pelas medições externas à banda e é usado para prover imediatamente uma escolha de faixas espectrais alternadas no caso do surgimento de um usuário primário.

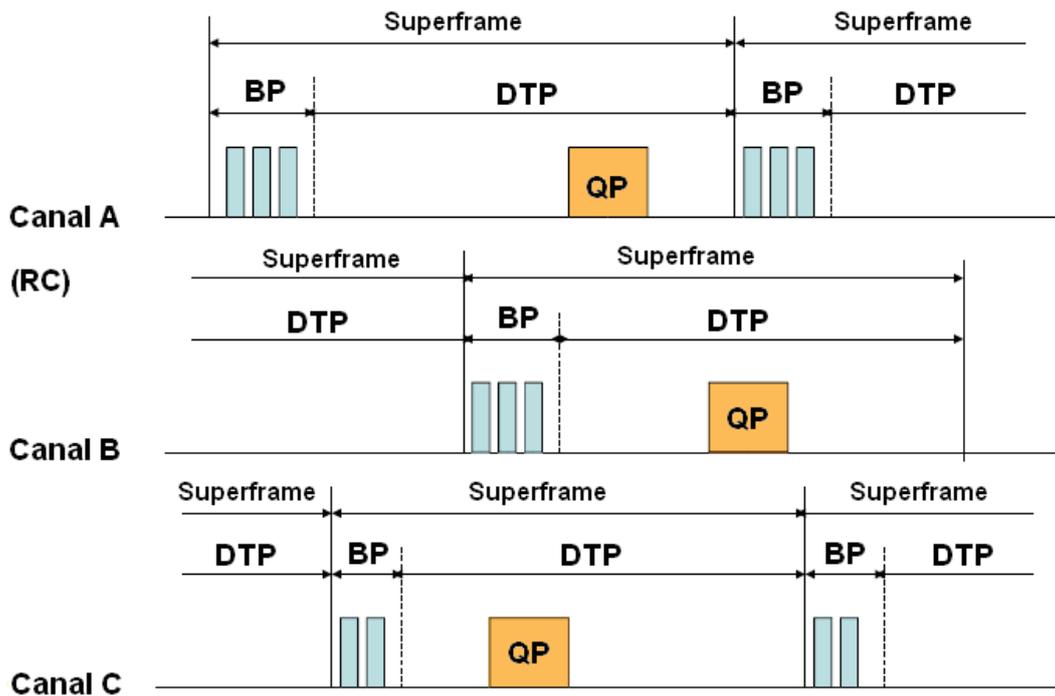


Figura 4.12. A estrutura do *superframe* no C-MAC [18].

No C-MAC, cada faixa espectral possui *superframes* recorrentes, compostos de um período de sinalização (BP – *Beacon Period*) e um período de transferência de dados (DTP – *Data Transfer Period*), conforme mostrado na Figura 4.12. O RC é usado em comunicações de redes de larga abrangência, assim como na descoberta de vizinhos e compartilhamento de informações de carga para cada faixa. Além disso, é utilizado também para a troca dos agendamentos do BP, de modo que as sinalizações não são enviadas simultaneamente sobre todas as faixas espectrais. Nessas faixas, se um usuário cognitivo detecta uma sinalização, então ele pode escolher essa faixa específica e também estabelecer o RC global para a faixa específica de sinalização. A operação do C-MAC é baseada nos seguintes passos [18, 15]:

- Sinalização Distribuída – Cada BP é agendado temporalmente, de modo que usuários cognitivos individuais podem propagar suas sinalizações sem interferência. Pela redifusão das informações das sinalizações recebidas em seus próprios espaços de sinalização, um usuário secundário ajuda a informar seus vizinhos dos outros dispositivos que estão presentes a uma distância maior que o alcance de transmissão;
- Coordenação entre Canais – Os usuários secundários periodicamente se adaptam ao RC e sinalizam sua presença. Se eles precisam estabelecer uma nova faixa de espectro, isso é sinalizado. Qualquer mudança espectral que ocorra no C-MAC deve ser primeiro anunciada pelos usuários cognitivos sobre o RC, antes de utilizar a faixa. Adicionalmente, a adaptação periódica para o RC permite que usuários cognitivos atualizem o sincronismo e obtenham as informações recentes de topologia de vizinhança. A estrutura de *superframe* é então usada na nova faixa espectral;

- **Coexistência** – A natureza de agendamento temporal do protocolo permite o estabelecimento de períodos de silêncio (QP – *Quiet Periods*) para cada uma das faixas espectrais. Isso garante que os usuários primários sejam diferenciados dos usuários cognitivos e, assim, corretamente detectados. Além disso, as sinalizações são transmitidas com modulação e codificação robustas, de modo que os pacotes que sinalizam a presença de usuários primários são recebidos de forma confiável. Nesse período, uma das faixas espectrais provenientes do BC é escolhida;
- **Equilíbrio de Carga** – O mecanismo de equilíbrio de carga do C-MAC é alcançado pela acumulação das estatísticas de carga oriundas da análise da sinalização, que transporta a informação de reserva de tráfego dos nós para a *superframe* correspondente.

4.4.2.3. Protocolos de Acesso Híbrido

Os protocolos de acesso híbrido utilizam transmissões parcialmente agendadas, em que a sinalização de controle ocorre geralmente em períodos sincronizados. Entretanto, a transmissão de dados possui esquemas de acesso aleatório ao canal, sem sincronização temporal. Em uma abordagem diferenciada, as fases de controle para transferência de dados possuem durações pré-definidas constituindo um *superframe* comum a todos os usuários da rede. Dentro de cada fase de controle e transferência dos dados o acesso ao canal pode ser aleatório [18].

4.4.3. Desafios Relativos ao Controle de Acesso ao Meio

Existem vários desafios para o acesso eficiente ao espectro. Entre eles, podem ser citados:

- **Projeto do Canal de Controle** – O acesso ao espectro envolve a sinalização de controle entre os dois usuários secundários em ambas extremidades do enlace. Essa sinalização deve ser ininterrupta pela atividade da vizinhança de usuários primários, uma vez que é usada para a troca de informações sensoriadas e coordenação do acesso ao canal. Por isso, canais de controle com troca dinâmica e confiável precisam ser projetados;
- **Adaptação à Transmissão do Usuário Primário** – Alguns usuários primários possuem padrões de transmissão específicos, tais como estações de difusão de televisão, ou podem apresentar acessos aleatórios ocasionais ao canal, tais como agências de serviços públicos. Nesses intervalos de tempo, o protocolo MAC cognitivo deve inferir a natureza dos usuários primários e adaptar as transmissões para evitar interferências próprias e prevenir conflitos com usuários primários. Por essa razão, o controle de potência dinâmico e esquemas de agendamento de transmissão também precisam ser projetados.

4.5. Projeto da Camada de Rede

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 gerenciamento da mobilidade da rede, serem baseadas nessa funcionalidade. Sendo assim, algumas características relativas ao processo de roteamento em redes cognitivas são apresentadas nesta seção.

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 [75].

Uma aplicação de inteligência artificial em técnicas de roteamento, utilizando um conjunto de agentes inspirados pelo comportamento de colônias de formigas, foi proposta em [40]. Os agentes, que podem ser implementados na forma de pacotes de verificação, exploram a rede com o intuito de coletar informações no atraso fim a fim médio e propagá-las reversamente para atualizar os roteadores intermediários de acordo com as informações coletadas. Os autores de [40] usam trabalhos anteriores relacionados com esquemas de roteamento inspirado em colônias artificiais e aplicam um algoritmo de aprendizagem por reforço, baseado em redes neurais artificiais. As soluções propostas são:

- Uma rede neural artificial é implementada em cada roteador. A rede neural recebe como entrada a probabilidade de selecionar cada possível salto de transmissão seguinte para um determinado nó destino e o tempo médio de viagem para esse nó destino usando cada possível salto de transmissão. As saídas da rede neural são os novos valores de probabilidade e de períodos de viagem estimados para o mesmo nó destino, para os próximos saltos de transmissão possíveis;
- Para cada salto de comunicação, uma formiga de encaminhamento viajando para um determinado nó destino seleciona o próximo salto de comunicação utilizando a rede neural artificial;
- Quando uma formiga viaja em um sentido inverso, a partir do nó destino para um nó visitado previamente, ela atualiza os pesos da rede neural e a tabela de roteamento de acordo com o tempo de viagem medido para o nó destino, modificando o comportamento da rede neural e as escolhas das formigas seguintes.

Os resultados de simulações relatados em [40] mostram que a utilização de técnicas de aprendizagem pode melhorar o desempenho do roteamento, assim como da vazão de dados e uma considerável redução do atraso fim a fim.

Em [29], o esquema de roteamento cognitivo foi apresentado, em que a capacidade de aprendizagem proveniente de um nó da rede é transferida ao pacote de transmissão (pacote cognitivo). Esse pacote é dividido em quatro partes:

- ID, para identificar o pacote e sua classe de serviço;

- DATA, que contém os dados do usuário;
- O campo do mapa cognitivo (CM – *Cognitive Map*);
- O campo do código executável.

Os dois últimos campos são relacionados ao algoritmo de roteamento cognitivo. O CM contém um mapa da rede, isto é, uma estimativa do estado da rede baseado em informações prévias coletadas pelo pacote. O código executável usa o campo CM como uma entrada e um algoritmo de aprendizagem para atualizar o CM. Além disso, o algoritmo de aprendizagem considera um objetivo global pré-definido para o pacote, de modo que uma métrica de desempenho seja otimizada, tal como o atraso mínimo ou a vazão máxima [75].

Os nós da rede apresentam capacidade de armazenamento na forma de caixas de correspondências, que podem ser lidas ou escritas por pacotes cognitivos. Adicionalmente, esses nós processam os códigos executáveis contidos em cada pacote recebido.

Sempre que um pacote cognitivo for recebido por um nó, este executa o código armazenado no campo de código executável do pacote. A entrada do código consiste do mapa cognitivo armazenado no próprio nó e do conteúdo da caixa de correspondência do nó. Como um resultado da execução do código, qualquer uma das seguintes ações é possível:

- O mapa cognitivo do pacote é atualizado;
- A caixa de correspondência do nó é escrita;
- O pacote é enviado por um enlace de saída;
- O pacote é mantido em um armazenador (*buffer*) aguardando que uma determinada condição seja observada.

Os autores comparam o desempenho da rede de pacotes cognitivos com um algoritmo de menor caminho e mostram que mesmo com o uso de algoritmos simples de aprendizagem, o esquema proposto melhora o desempenho da rede, em termos de taxa de perda e atraso. Quando estratégias de aprendizagem mais complexas são implementadas no campo de código executável, tais como redes neurais, a rede apresenta desempenhos ainda melhores [75].

Entretanto, a abordagem proposta em [29] apresenta vários desafios para sua implementação, principalmente em termos do cabeçalho de roteamento devido ao código a ser armazenado em cada pacote. Além disso, os pacotes cognitivos constituem apenas uma pequena parte do total de pacotes e não contêm informações de dados de usuários. Melhoramentos desse trabalho consideraram que a execução dos códigos de aprendizagem são ativados pela chegada dos pacotes cognitivos nos nós [28]. Uma outra versão modificada da solução proposta em [29] aumenta a escalabilidade e reduz o cabeçalho, melhorando ainda mais o desempenho da rede [48].

Uma métrica de roteamento que modela o atraso fim a fim foi proposta pelos autores de [13, 12]. Essa métrica considera tanto o atraso introduzido pelas colisões em uma faixa única de frequência, quanto o atraso introduzido por cada mudança de canal requerida ao longo do percurso [75].

O artigo apresentado em [44] propõe um esquema de espalhamento de informações nas posições dos nós e canais disponíveis para cada nó. Entretanto, o protocolo de troca de informação proposto é testado apenas em um cenário favorável, caracterizado por um canal sem erros e um acesso ao meio sem colisões [75].

O protocolo de roteamento proposto em [76] apresenta uma métrica de roteamento que modela as diferentes características de cada enlace de rádio disponível entre os nós da rede. A métrica é usada para formar uma árvore de roteamento entre a estação radiobase e os nós sem fio na rede. O protocolo considera que a rede é formada por dispositivos utilizando diferentes padrões de comunicação sem fio e que um nó da rede suporta mais de uma interface de rede sem fio [75].

Inspirados no funcionamento do protocolo de roteamento *Ad-hoc On-demand Distance Vector (AODV)* [59], os autores de [10] propuseram o esquema de roteamento sob demanda para redes de rádio cognitivo (CRNO – *Cognitive Radio Networks On-demand*). Cada usuário cognitivo executa o roteamento apenas quando existe uma demanda. A arquitetura da rede apresentada na Figura 4.13 foi considerada para a descrição desse protocolo.

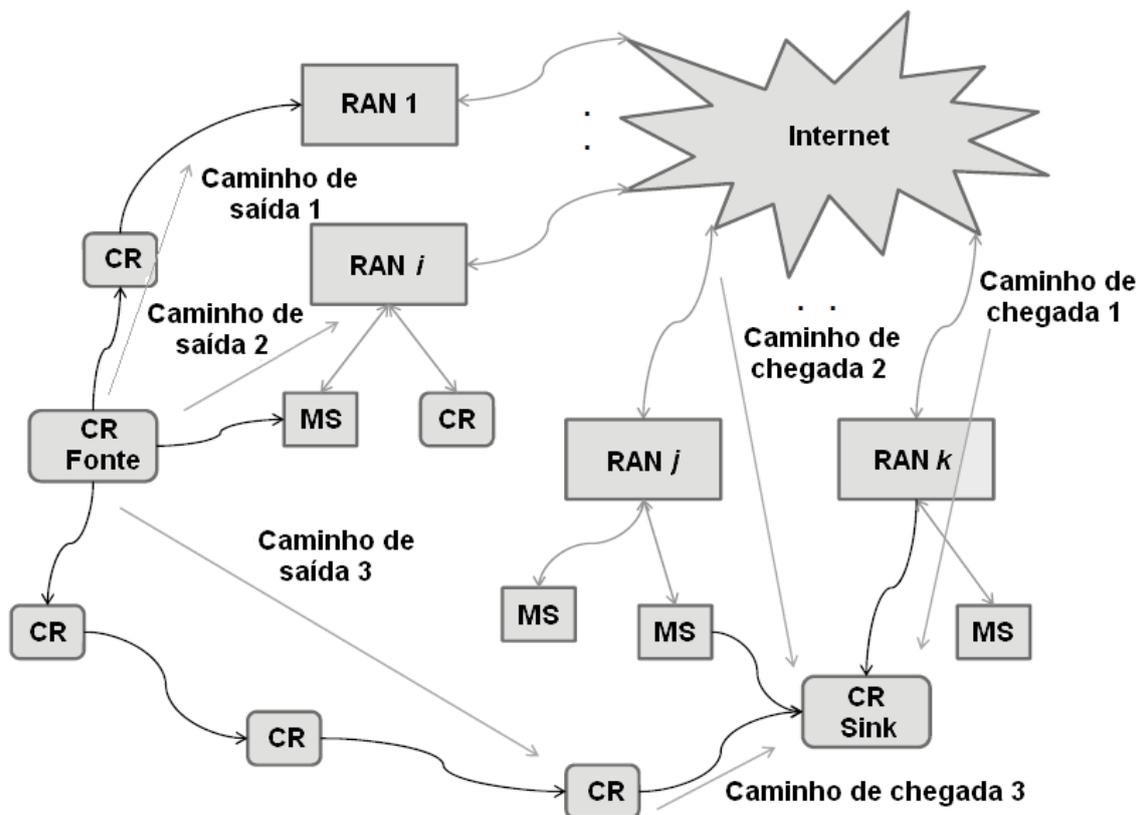


Figura 4.13. O roteamento de pacotes em redes cognitivas [9].

A arquitetura contém uma rede infraestruturada, que pode ser a Internet e várias redes de acesso por rádio (RAN – *Radio Access Networks*) que provêm diversas vias para acesso à rede infraestruturada. Estações móveis (MS – *Mobile Stations*) estão associadas à determinadas tecnologias de RAN. Cada rádio cognitivo (CR – *Cognitive Radio*) é capaz de configurar seus parâmetros ao sistema de rádio apropriado, com o intuito de transportar pacotes de dados e controle de tráfego. RANs, MSs e a rede infraestruturada podem ser qualquer sistema primário específico. Um rádio cognitivo também pode ser uma estação móvel de um sistema primário. Todos os enlaces nos sistemas primários são bidirecionais e representados por setas de sentido duplo. Enlaces oportunistas, devido ao acesso espectral dinâmico dos rádios cognitivos, e determinados enlaces *ad hoc* são unidirecionais e representados por setas de sentido único. Existem três caminhos cooperativos diferentes para transportar os pacotes. Conforme pode ser observado na Figura 4.13, os Caminhos de Saída 3 e Caminhos de Chegada 3 geralmente representam redes *relay* de rádios cognitivos (CRRN – *Cognitive Radio Relay Networks*) [10].

O transmissor CR e receptor CR formam um enlace cognitivo, tipicamente usando o acesso espectral dinâmico. O receptor CR pode ser um rádio cognitivo ou um nó no sistema primário. O nó CR Fonte e o nó CR Destino formam um enlace virtual. O nó CR Destino pode ser um rádio cognitivo ou qualquer nó no sistema primário. Se o nó CR Destino for um rádio cognitivo, ele é denominado nó CR Sink.

A mensagem de roteamento inclui um cabeçalho formado pelas seguintes informações [9]:

- O endereço IP do usuário cognitivo de destino;
- O endereço IP do usuário cognitivo fonte;
- A identificação ID da mensagem (*msg_id*);
- O endereço IP do usuário cognitivo *relay* (*cr_relay_ip*);
- O endereço IP do transmissor cognitivo (*cr_tx_ip*) e seu tipo de rádio (*cr_tx_type*) para o pacote recebido;
- O endereço IP do receptor cognitivo (*cr_rx_ip*) e seu tipo de rádio (*cr_rx_type*) para o pacote encaminhado;
- O número da sequência (*seq_count*) associado com o percurso (*cr_tx_ip*, *cr_relay_ip*, *cr_rx_ip*), iniciando de 0 (zero) e adicionando 1 (um) para cada caminho igual;
- O contador de tempo para cada usuário cognitivo *relay* (*time_counter*), iniciando de 0 (zero) e adicionando 1 (um) para uma novo período de tempo.

Quando um usuário cognitivo ou um terminal móvel do sistema primário surge no ambiente de rádio, a aquisição de seu endereço IP pode não ser viável de imediato e uma ID pode ser utilizada para servir a proposta da tabela. O roteamento CRNO é ilustrado na Figura 4.14 e consiste de três fases de operação [10]:

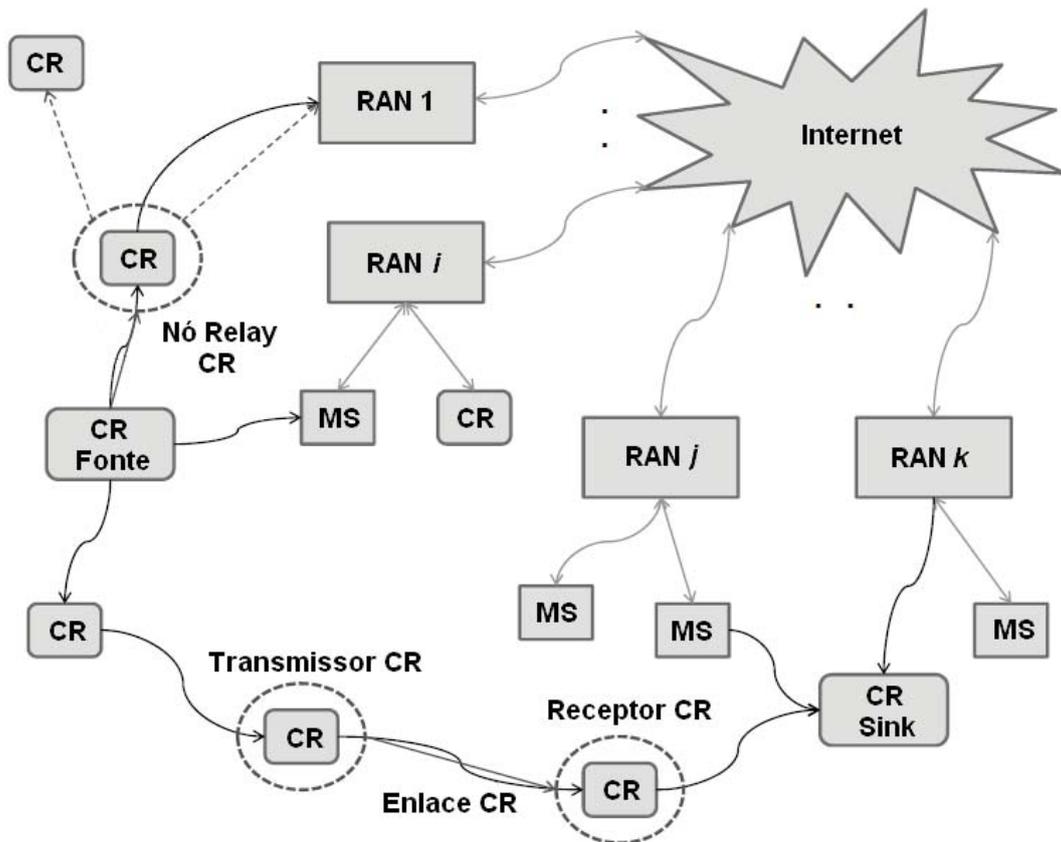


Figura 4.14. O roteamento em redes CRNO [9].

- Fase de Sensoriamento – O usuário cognitivo sensoria o espectro de múltiplos sistemas coexistentes (e possivelmente diferentes faixas de frequência), para atualizar sua tabela de roteamento. Essa tabela armazena informações reconhecendo cada receptor cognitivo em potencial, histórico, estimativa de confiança no usuário cognitivo e parâmetros de comunicação para ajustar as configurações do equipamento de rádio. Cada receptor cognitivo em potencial é identificado por um endereço IP que pode ser adquirido a partir de suas transmissões passadas ou por uma ID designada pelo usuário cognitivo. O histórico pode ser uma sinalização simples para indicar se o receptor cognitivo é confiável ou não, baseado em processos de aprendizagem. Os parâmetros de comunicação são obtidos a partir do sensoriamento espectral para o ajuste do rádio cognitivo.
- Fase de Descoberta de Rotas – No momento em que o usuário cognitivo origina um pacote para o destino ou recebe um pacote de um nó *relay*, ele busca alguma violação na tabela de roteamento. Se violações não forem constatadas, o nó cognitivo seleciona outro nó cognitivo a partir da tabela de encaminhamento de rotas. Os enlaces para o sistema primário possuem maior prioridade. Por outro lado, quando uma violação ocorre, o nó *relay* cognitivo busca uma oportunidade para reconhecer negativamente o transmissor cognitivo, baseado na tabela de roteamento. O nó transmissor cognitivo tenta re-rotear o pacote para outro nó *relay* cognitivo (se possível), ou ainda transmitir o pacote de volta caso não existam rotas disponíveis.

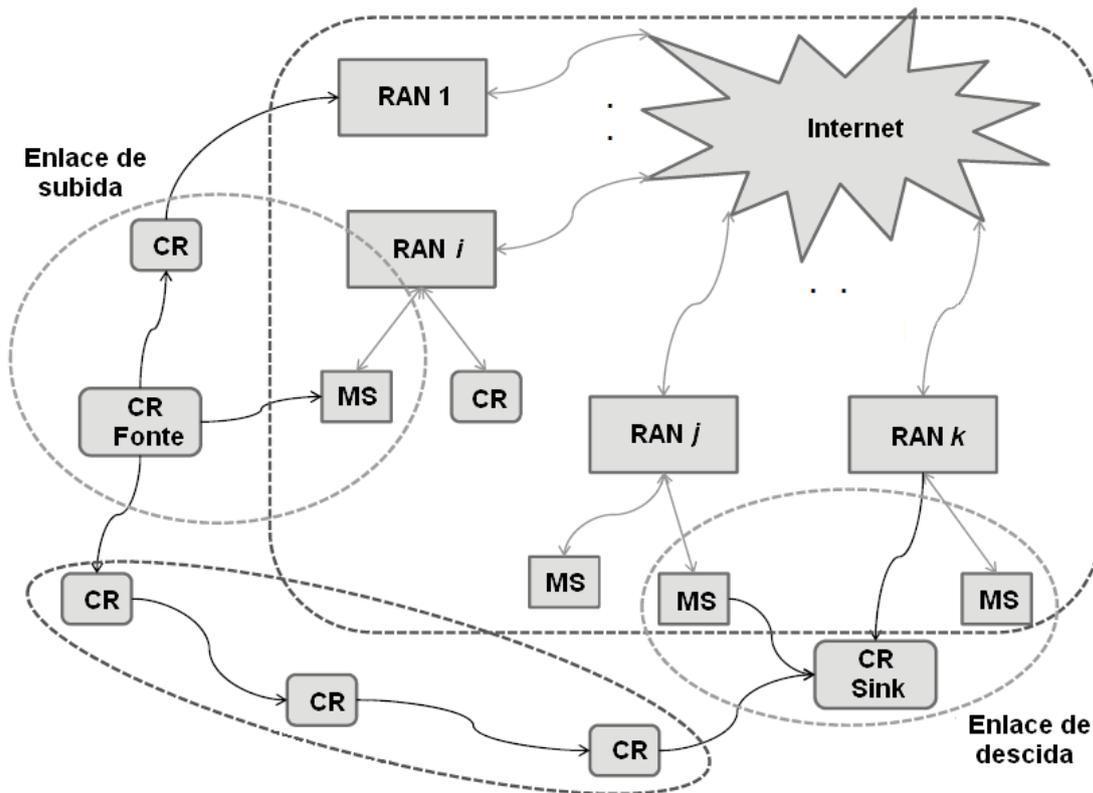


Figura 4.15. Segmentação ou decomposição de uma rede cognitiva [9].

- Fase de Atualização da Tabela – Além da seleção do enlace para completar o roteamento, uma rota reversa associada a esse *relay* precisa ser atualizada como uma parte da tabela de rotas reversas. Cada rota reversa consiste de parâmetros `msg_id`, `cr_rx_ip`, `cr_rx_type`, `cr_tx_ip`, `cr_tx_type` e `seq_count`. Ambos `cr_rx_type` e `cr_tx_type` especificam a operação de coexistência de sistemas multi-rádio nas redes cognitivas.

Para que os protocolos de roteamento cognitivo por demanda funcionem satisfatoriamente é necessário implementar o fluxo de controle na camada de rede. Em contraste com os esquemas convencionais de fluxo de controle em redes de computadores, o objetivo principal para redes cognitivas é atender o controle de danos [10].

Além disso, é possível observar que a arquitetura geral de uma rede cognitiva pode ser segmentada em diversas partes, conforme mostrado na Figura 4.15. Nesse esquema, os pacotes são roteados a partir do nó cognitivo fonte para o nó cognitivo destino, por meio dos seguintes segmentos [9]:

- Enlace de subida da rede cognitiva;
- Sistemas primários multi-rádio coexistentes, normalmente com uma arquitetura infraestruturada (tal como a Internet), o que pode ser considerado como um tipo de tunelamento em redes cognitivas para transportar os pacotes rapidamente;

- O enlace de descida da rede cognitiva;
- A rede *relay* cognitiva.

A rede *relay* cognitiva é considerada como um tipo especial de rede cognitiva, em que os usuários cognitivos cooperam (*relaying*) na transmissão dos pacotes.

O fluxo de dados é caracterizado de duas maneiras [10]:

- Nó cognitivo fonte → Enlace de subida da rede cognitiva → Sistema primário e infraestrutura → Enlace de descida da rede cognitiva → Nó cognitivo destino;
- Nó cognitivo fonte → CRRN → Nó cognitivo destino.

Para o enlace de subida da rede cognitiva, o roteamento tenta atingir o sistema primário por meio de enlaces oportunistas. Por exemplo: na Figura 4.15, quando o nó *relay* cognitivo está no processo de seleção da rota de encaminhamento, ele tende a selecionar o nó mais próximo ao sistema primário, que é o nó na RAN 1. O roteamento tenta deixar o sistema primário por meio de enlaces cognitivos oportunistas para o enlace de descida da rede cognitiva.

4.5.1. Desafios Relativos ao Projeto da Camada de Rede

Apesar de existirem algumas propostas de esquemas de roteamento, diversos desafios relacionados com o projeto de camada de rede são discutidos a seguir [9]:

- Disponibilidade de Enlace – os enlaces de redes cognitivas ficam disponíveis em períodos determinados pelo sistema primário, de modo que o acesso dinâmico ao espectro pode efetivamente aproveitar tais oportunidades, após um sensoriamento espectral bem sucedido. Desse modo, enlaces de redes cognitivas, especialmente os que envolvem usuários cognitivos transmissores e receptores, ficam disponíveis aleatoriamente, o que resulta em uma topologia da rede cognitiva aleatória. As condições dos enlaces de redes cognitivas variam muito, pois a duração da disponibilidade do enlace é apenas da ordem de milissegundos, em vez de segundos, minutos, horas, ou mesmo dias, conforme em outros tipos de redes sem fio;
- Enlaces Unidirecionais – Enlaces unidirecionais não são comuns em redes sem fio típicas, que geralmente possuem enlaces bidirecionais (a comunicação de rádio normalmente é *half-duplex*). Em redes de sensores sem fio e redes *ad hoc*, enlaces unidirecionais são possíveis devido à potência de transmissão assimétrica e diferentes níveis de interferência nos receptores. Entretanto, os enlaces unidirecionais são mais prováveis em redes cognitivas, devido ao fato de que um terminal com rádio cognitivo pode apenas ter oportunidades de transmissão em intervalos de tempo restrito e não há garantias de permissão para transmitir a partir de outra via de comunicação. Além disso, um usuário cognitivo pode influenciar um usuário primário para (cooperativamente) transmitir os pacotes, mas a outra via de comunicação pode não ser permitida e vice-versa;

- **Redes Sem Fio Heterogêneas** – as redes cognitivas são formadas por redes sem fio heterogêneas. O *handoff* dos nós cognitivos é normalmente necessário para o roteamento nessas redes. Entretanto, os enlaces de redes cognitivas devem estar disponíveis por uma curta duração de tempo e a cooperação entre os nós da rede interfere significativamente no desempenho satisfatório da rede;
- **Re-roteamento** – Em redes cognitivas, devido à conectividade intermitente, uma rota estabelecida para o fluxo de dados pode mudar devido à disponibilidade espectral e à mobilidade da rede. Portanto, algoritmos de re-roteamento que considerem a característica dinâmica do espectro são necessários. Um esquema de roteamento ciente do espectro deve adaptar as seleções das rotas às flutuações do espectro [2];
- **Gerenciamento de Filas** – Um usuário cognitivo deve possuir múltiplas interfaces para a comunicação com diferentes nós. Dado que a disponibilidade do espectro varia com o tempo, essas interfaces podem se tornar indisponíveis, requerendo que os pacotes servidos por uma interface sejam transferidos para outra. Além disso, os requisitos de qualidade de serviço podem apresentar várias prioridades em tipos de tráfego diferentes. Portanto, a implementação de um modelo de fila única ou de múltiplas filas para cada tipo de tráfego de cada interface precisa ser investigada [2].

4.6. Aplicações de Redes Cognitivas

As redes cognitivas são um novo paradigma em comunicações sem fio, que tendem a disponibilizar melhores serviços para diversos nichos de mercado. Os rádios cognitivos, que integram essas redes, podem perceber o ambiente de propagação, aprender padrões e adaptarem seus parâmetros para atender a requisitos imediatos do usuário, da rede e do ambiente de rádio [4]. Entre as várias áreas de aplicações das redes cognitivas, podem ser citadas [2]:

- **Redes Alugadas** – A rede primária pode prover uma rede alugada permitindo o acesso oportunista do espectro licenciado, por meio do acordo com a rede secundária em não prejudicar os parâmetros de qualidade de serviço dos usuários primários [69]. Por exemplo, a rede primária pode alugar o acesso ao espectro apenas para uma operadora. A rede primária também pode disponibilizar o acesso ao espectro para uma comunidade regional, com o propósito de prover acesso sem fio por banda larga;
- **Redes Mesh Cognitivas** – Redes *mesh* sem fio têm surgido como uma tecnologia de baixo custo para prover conectividade em banda larga [3]. Entretanto, à medida que a densidade da rede aumenta e as aplicações demandam uma maior vazão de dados, as redes *mesh* necessitam de um aumento em sua capacidade para atender os requisitos das aplicações. Considerando que a tecnologia de rádio cognitivo proporciona o acesso a faixas mais largas do espectro, as redes cognitivas podem ser utilizadas para redes *mesh* que serão implementadas em áreas urbanas densas [47]. Por exemplo, a área de cobertura de redes cognitivas pode aumentar se um *backbone mesh* sem fio é estabelecido baseado em pontos de acesso cognitivos e nós *relay* cognitivos [5]. A capacidade de um ponto de acesso cognitivo, conectado pelo acesso em

banda larga à Internet, é distribuída em uma extensa área com o auxílio de nós *relay* cognitivos. As redes cognitivas têm a capacidade de acrescentar, de maneira temporária ou permanente, alocações espectrais para os enlaces usados nos esquemas de transmissão cooperativa (*relaying*) no caso de alta carga de tráfego;

- **Redes de Emergência** – As redes cognitivas também podem ser implementadas para o auxílio na operação de redes de emergência [51]. No caso de desastres naturais, que podem temporariamente inviabilizar a infraestrutura de comunicação existente, as ações das equipes de emergência nas áreas do desastre precisam formar redes de emergência. Considerando que as redes de emergência lidam com informações críticas, uma comunicação segura precisa ser garantida com a mínima latência de transmissão. Além disso, comunicações em situações de emergência requerem uma disponibilidade significativa de espectro de rádio para a manipulação de grandes volumes de tráfego de dados, incluindo voz, vídeo e dados. As redes cognitivas podem oferecer o uso eficaz do espectro existente sem a necessidade de uma infraestrutura e mantendo as prioridades de comunicações e tempos de resposta;
- **Redes Militares** – Uma das aplicações das redes cognitivas está no ambiente de comunicações militares. As redes cognitivas permitem aos dispositivos militares de comunicação escolher faixas de frequência intermediária, esquemas de modulação e de codificação adaptáveis às variações do ambiente de rádio em campos de batalha. Adicionalmente, as redes militares demandam recursos de segurança e proteção das transmissões em ambientes hostis. As redes cognitivas permitem às equipes militares realizarem o *handoff* espectral e identificar faixas espectrais seguras, livres de interceptação por tropas inimigas [2];
- **Segurança Pública** – A área de segurança pública é outra área em que as redes cognitivas têm mostrado potencial para aplicação. Durante anos, as agências de segurança pública têm necessitado de alocação espectral adicional para solucionar o congestionamento de faixas de frequência. Por meio dos benefícios das técnicas de compartilhamento espectral, as redes cognitivas podem utilizar algumas das faixas espectrais existentes e pouco utilizadas, enquanto mantêm a prioridade de solicitações de atendimento e tempo de resposta. Além disso, as redes cognitivas podem melhorar a interoperabilidade provendo enlaces de comunicação entre diferentes jurisdições [51];
- **Serviços** – O ramo de serviços possui diversas oportunidades para o uso de redes cognitivas. Um exemplo dessa aplicação é utilizar redes cognitivas para melhorar os serviços de comunicação de um hotel em que ocorre uma conferência [4]. Suponha que o hotel utilize uma rede no padrão IEEE 802.11, em que o custo para utilização da rede sem fio está inclusa no preço dos serviços da conferência e serviços de quarto. A rede de comunicação experimenta demandas de acesso dos palestrantes e outros inscritos na conferência, assim como de outras outras pessoas que estejam hospedadas com outras finalidades. Sem restrições de utilização, qualquer pessoa com um dispositivo compatível com o padrão IEEE 802.11 possui o mesmo potencial para acessar a Internet. Em períodos de alta demanda, todos os usuários podem experimentar serviços lentos e interrupções, o que leva à insatisfação dos usuários.

Uma solução seria restringir o acesso à rede e cobrar uma taxa. As taxas poderiam variar de acordo com a categoria do usuário:

- Taxas pagas pela organização da conferência, cujo o custo é repassado aos inscritos no pacote de inscrição;
- Hóspedes instalados em quartos com desconto deveriam pagar taxas maiores;
- Hóspedes instalados em quartos *premium* teriam direito a acessar a rede livremente, sem pagar taxas por isso.

Entretanto, sem um sistema de priorização de usuários, os problemas de qualidade de serviço persistirão. Os participantes da conferência ficarão frustrados caso um palestrante tente conduzir uma demonstração em tempo real, usando a Internet, e experimente uma degradação na qualidade de seu acesso à rede. Para proporcionar a satisfação com a qualidade dos serviços oferecidos, o hotel precisa disponibilizar uma alternativa em que o palestrante tenha acesso aos recursos que são necessários para conduzir uma apresentação suave e contínua. Uma outra solução seria o estabelecimento de duas redes, uma das quais, restrita a um número reduzido de apresentadores e usuários prioritários.

Redes cognitivas representam uma solução eficaz para o problema, mesmo no caso em que o serviço de acesso à Internet é disponibilizado usando uma única frequência de rádio. Cada usuário poderia ser vinculado a um nível de prioridade de uso dos serviços, baseado nas metas de serviço do hotel. Nesse caso, o rádio cognitivo otimizaria o acesso à rede, de modo que usuários com um nível de prioridade mais alta tivessem preferência no acesso em relação aos usuários com um nível de prioridade mais baixa. Uma prioridade mais alta poderia ser atribuída a um número limitado de palestrantes da conferência para garantir que suas apresentações ocorram de forma contínua. Por outro lado, os hóspedes que não estão registrados na conferência possuiriam um acesso razoável no andar de seus quartos, mas apenas às lacunas do espectro nas áreas da conferência.

4.7. O Padrão IEEE 802.22

O IEEE 802.22 é o primeiro padrão a contemplar a utilização da tecnologia de rádio cognitivo [56]. Ele foi proposto no contexto do grupo de trabalho 802.22 relativo à redes sem fio regionais (WRAN – *Wireless Regional Area Network*), para o uso não licenciado de faixas de TV para comunicações sem fio. Nos Estados Unidos, três tipos de sinais de TV devem ser detectados: sinais de TV analógica (NTSC – *National Television System Committee*), de TV digital (ATSC – *Advanced Television Systems Committee*) e de microfones sem fio [64].

Uma rede IEEE 802.22 é um tipo de rede sem fio infraestruturada onde uma estação radiobase (BS – *base station*) coordena o acesso de diversos nós em uma célula de um único salto de comunicação (*single hop cell*). Essa célula cobre uma área com o raio que varia entre 33 km (típico) a 100 km [43]. Os usuários em uma célula 802.22 são chamados de *Consumer Premise Equipments* (CPEs).

Os equipamentos WRAN apresentam uma potência de transmissão muito superior à dos demais sistemas IEEE 802 (a potência dos CPEs podem alcançar até 4 W, enquanto

que as estações base atingem o máximo de 100 W) [14]. Além disso, as faixas de TV apresentam boas características de propagação, permitindo que a área de cobertura atinja até 100 km.

A tecnologia 802.22 permite a reutilização das bandas UHF/VHF, em que três tipos de sinais primários podem estar presentes nestas bandas: sinais de TV analógica, digital e microfones sem fio. Considerando o valor mínimo da razão de potência desejada-*indesejada* de sinal (D/U – *Desired-to-Undesired signal power ratio*²) de 23 dB e o contorno de proteção de 134,2 km, o raio de afastamento dos CPEs do transmissor de TV deve ser dado por 150,3 km [65]. Os CPEs dentro desse raio de afastamento são forçados a evitar o uso do canal de TV. A Figura 4.16 ilustra esse cenário.

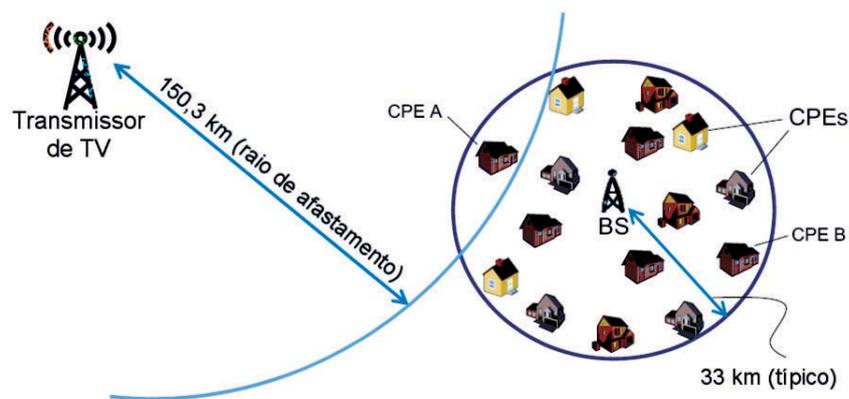


Figura 4.16. Ilustração de uma célula IEEE 802.22 coexistindo com um transmissor de TV [43].

4.7.1. Modelo de Sensoriamento do Canal no Padrão IEEE 802.22

No padrão IEEE 802.22 o canal é modelado como uma fonte LIGADA / DESLIGADA (*ON/OFF*), onde um período *ON* representa o tempo de duração em que os usuários primários estão utilizando ativamente seus respectivos canais. Dessa forma, os usuários secundários somente têm permissão para utilizar o canal nos períodos *OFF* dos usuários primários. Esse modelo tem sido utilizado com sucesso na modelagem do padrão de uso do canal dos usuários primários em várias aplicações [27, 42, 57]. Um padrão de uso de canal por transmissores de TV usualmente apresentam períodos muito longos de *ON* e *OFF* (da ordem de horas).

Por meio do sensoriamento espectral o rádio cognitivo verifica o estado do canal durante o tempo de sensoriamento (denotado por T_I – *sensing-time*) e detecta a presença de sinais primários no momento. O valor de T_I pode variar de acordo com o método de detecção utilizado (*e.g.*, menos de 1 ms para detecção de energia). A Figura 4.17 ilustra o modelo de canal *ON/OFF* e um exemplo do processo de sensoriamento periódico com o tempo de sensoriamento T_I e o período de sensoriamento (denotado por *sensing-period* – T_P) [43]. Esse último pode ser utilizado para obter a frequência de sensoriamento ($1/T_P$ – *sensing-frequency*).

No padrão 802.22, o sensoriamento pode ser realizado durante os períodos de

²A razão entre o sinal desejado e os sinais indesejados (soma de todos os sinais interferentes).

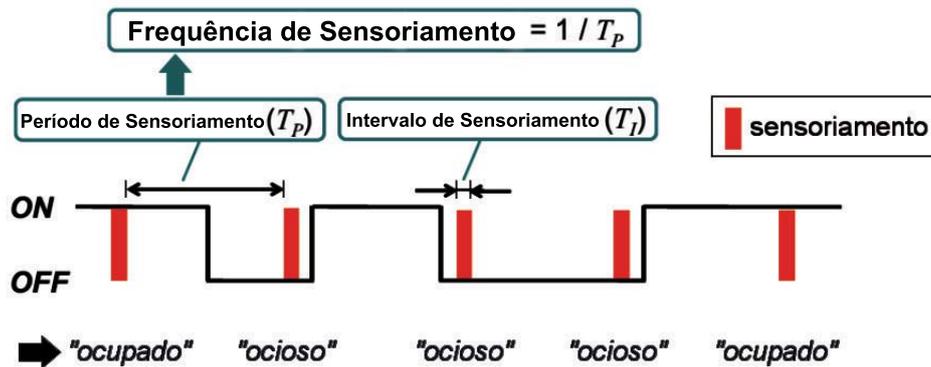


Figura 4.17. O modelo de canal ON/OFF e o processo de sensoriamento periódico [43].

silêncio (*i.e.*, enquanto as comunicações entre os usuários secundários estão suspensas), dentro dos quais nenhum CPE tem permissão para transmitir dados. Caso seja realizado um sensoriamento colaborativo, os períodos de silêncio passam a ser sincronizados entre os diversos sensores de uma mesma célula, bem como entre células vizinhas, o que é possível por meio de um protocolo de sinalização de coexistência (CBP – *Coexistence Beacon Protocol*), via a troca de quadros de informação [17].

4.7.2. Requisitos de Sensoriamento Espectral do Padrão IEEE 802.22

A funcionalidade de sensoriamento espectral é uma parte crítica do padrão IEEE 802.22 [63]. Por meio dela é possível detectar a presença ou ausência de um usuário primário licenciado e tomar a ação apropriada de liberar a faixa de espectro em uso ou continuar utilizando-a. Caso necessário, o CPE deve liberar a faixa no período de 2 segundos a partir do início da transmissão do usuário primário. A Tabela 4.3 apresenta os requisitos de sensoriamento espectral do padrão IEEE 802.22 [67].

Tabela 4.3. Requisitos de sensoriamento espectral [46].

Parâmetro	Valor de detecção
Tempo de detecção do canal	≤ 2 seg
Tempo de mudança do canal	2 seg
Tempo de encerramento da transmissão no canal	100 mseg

O limiar de detecção incumbente (IDT – *Incumbent Detection Threshold*) é a menor potência de sinal primário (em dBm) que os CPEs devem detectar [46]. Na Tabela 4.4 são apresentados os valores de IDT para os três tipos de sinais primários suportados nos Estados Unidos [37].

O tempo de detecção do canal (CDT – *Channel Detection Time*) deve ser de ≤ 2 segundos, período dentro do qual os usuários primários devem ser detectados com probabilidade de erro de detecção menor que 0,1, independentemente do número de vezes que o sensoriamento seja realizado durante o CDT. Da mesma forma, o valor da probabilidade de falso alarme deve ser inferior a 0,1 quando o mesmo algoritmo de sensoriamento executa por CDT segundos, período durante o qual nenhum usuário primário está presente. O requisito da probabilidade de erro de detecção serve para garantir a mínima interferência

Tabela 4.4. Limiar de detecção incumbente (IDT) dos sinais primários [43].

Tipo de sinal	IDT
TV analógica (NTSC)	-94 dBm (no pico de sincronização da portadora de imagem do NTSC)
TV digital (ATSC)	-116 dBm (largura de banda de 6 MHz)
Microfones sem fio	-107 dBm (largura de banda de 200 kHz)

com outros usuários, enquanto que o requisito da probabilidade de falso alarme serve para evitar mudanças desnecessárias de canal devido à falsa detecção de usuários primários.

O IEEE 802.22 também provê um mecanismo chamado sensoriamento em dois estágios (TSS – *two-stage sensing*), em que o algoritmo de sensoriamento pode decidir qual técnica de sensoriamento (detecção de energia ou detecção de característica) deve ser utilizada em um período de silêncio. Embora a detecção de energia seja responsável por um *overhead* temporal mínimo (usualmente menor que 1 ms), ela é suscetível às incertezas sobre o ruído [62]. A detecção de características é menos suscetível às incertezas sobre o ruído [35], mas requer um maior tempo de sensoriamento (*e.g.*, 24,2 ms para a detecção de campos de sincronização de sinais ATSC [17]).

4.7.3. O Mecanismo TSS do Padrão IEEE 802.22

Para ajudar o algoritmo de sensoriamento a atingir os requisitos de detecção apresentados na Seção 4.7.2, o IEEE 802.22 provê um mecanismo de sensoriamento em dois estágios (TSS – *two-stage sensing*). Com o TSS, o algoritmo de sensoriamento pode escalonar um sensoriamento rápido ou um sensoriamento fino em cada período de silêncio (QP – *quiet period*). O sensoriamento rápido emprega detecção de energia enquanto o sensoriamento fino utiliza detecção de características [43].

Embora um algoritmo de sensoriamento possa escalonar quantos QPs forem necessários, existem restrições sobre o período de sensoriamento. Por exemplo, o QP de um sensoriamento rápido, usualmente menor que 1 ms, pode ser escalonado no fim de um quadro MAC 802.22 (de duração de 10 ms), no máximo uma vez a cada quadro. Consequentemente, o período de sensoriamento rápido é um múltiplo do tamanho do quadro (*i.e.*, $n \times 10$ ms, em que n é um inteiro positivo). Por outro lado, a duração do QP de um sensoriamento fino varia de acordo com o esquema de detecção de característica utilizado. No caso do esquema de detecção de característica requerer um tempo de sensoriamento maior que um quadro MAC, seu QP deve ser escalonado entre quadros MAC consecutivos [43].

4.8. Considerações finais

As redes cognitivas foram desenvolvidas como uma tentativa de resolver os problemas relativos à limitada disponibilidade de faixas de espectro e à ineficiência na utilização destes. Essas redes são equipadas com as capacidades intrínsecas dos rádios cognitivos e oferecem um paradigma de comunicações ciente sobre a ocupação do espectro em redes sem fio. Para tanto, é necessário que o processo de sensoriamento espectral seja eficaz e determine, com a maior confiabilidade possível, estimativas dos parâmetros do

espectro.

Diversas técnicas podem ser empregadas para o sensoriamento espectral. Cada uma dessas técnicas é mais eficaz em determinadas circunstâncias, e requer diferentes níveis de complexidade de implementação. Técnicas de processamento de sinais podem ser aplicadas durante esse processo. Outra maneira de melhorar o sensoriamento é utilizar estratégias cooperativas, em que diversos rádios cognitivos compartilham seus resultados, criando um mapa global de ocupação do espectro.

Os resultados da fase de sensoriamento do canal e detecção de interferência, obtidos a partir da camada física, podem ser usados pela camada MAC para formar um histórico de ocupação do canal no tempo. As técnicas de acesso ao espectro em redes cognitivas, classificadas em protocolos de acesso aleatório, agendado e híbrido, ainda não integram completamente a função de sensoriamento ao controle de acesso ao meio. Além disso, novas métricas de desempenho de protocolos MAC, que capturem características específicas do contexto de redes cognitivas, precisam ser propostas.

Diversas questões de projeto, como controle de fluxo, gerenciamento de recursos de rádio e mobilidade da rede são baseadas no protocolo de roteamento adotado. Alguns esquemas de roteamento envolvendo algoritmos de aprendizagem foram discutidos neste capítulo, assim como técnicas de roteamento sob demanda para redes cognitivas. A grande variação de condições dos enlaces cognitivos, necessidades de esquemas de roteamento e de desenvolvimento de modelos de alto desempenho para o gerenciamento de filas em redes cognitivas constituem desafios significativos para o projeto da camada de rede.

Algumas características do padrão IEEE 802.22 também foram discutidas neste capítulo. Ele utiliza a tecnologia de redes cognitivas para transmissões em redes sem fio regionais, por meio do acesso não licenciado ao espectro de TV. O IEEE 802.22 é o primeiro padrão mundial baseado na tecnologia de rádio cognitivo [16, 37]. Canais de TV específicos, assim como bandas de guarda serão utilizados para a comunicação nesse padrão.

No entanto, as agências reguladoras deverão estabelecer diversos parâmetros para o funcionamento das redes cognitivas, dado que os usuários destas podem vir a causar interferências nas transmissões dos sistemas primários. Para tanto, diversos desafios relacionados à incertezas nas comunicações geram impactos diretos sobre o desempenho das técnicas de sensoriamento, podendo levar até mesmo a interferências com usuários primários.

Este capítulo apresentou diversos aspectos e desafios relativos ao projeto e implementação de redes cognitivas. Espera-se que ele sirva como base para os primeiros estudos sobre o assunto, agregando conceitos e resultados desenvolvidos em diversos trabalhos científicos recentes e de bastante relevância.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA) pelas bolsas de doutorado de Marcelo

Portela Sousa e Rafael Fernandes Lopes, respectivamente. Adicionalmente, os autores agradecem à infraestrutura de pesquisa provida pelo Instituto de Estudos Avançados em Comunicações (IECOM) e pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Referências

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] I. Akyildiz and X. Wang. A survey on wireless mesh networks. *Communications Magazine, IEEE*, 43(9):S23 – S30, sept. 2005.
- [4] S. Ball and A. Ferguson. Consumer applications of cognitive radio defined networks. In *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, pages 518 –525, nov. 2005.
- [5] L. Berlemann, S. Mangold, and B. Walke. Policy-based reasoning for spectrum sharing in radio networks. In *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, pages 1 –10, nov. 2005.
- [6] T. X. Brown. An analysis of unlicensed device operation in licensed broadcast service bands. In *Proc. IEEE 1st Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, pages pp.11–29, Baltimore, Nov. 2005.
- [7] M. Buddhikot, P. Kolodzy, S. Miller, K. Ryan, and J. Evans. Dimsumnet: new directions in wireless networking using coordinated dynamic spectrum. In *Sixth IEEE International Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks, 2005. WoWMoM 2005*, pages pp.78–85, June 2005.
- [8] 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.
- [9] K. Chen and R. Prasad. *Cognitive Radio Networks*. John Wiley and Sons, 2009.
- [10] K.-C. Chen, B. K. Cetin, Y.-C. Peng, N. Prasad, J. Wang, and S. Lee. Routing for cognitive radio networks consisting of opportunistic links. In *Wireless Communications and Mobile Computing*, volume 10, pages 451–466, march 2009.
- [11] K.-C. Chen, Y.-J. Peng, N. Prasad, Y.-C. Liang, and S. Sun. Cognitive radio network architecture: Part I – general structure. In *ICUIMC '08: Proceedings of the 2nd international conference on Ubiquitous information management and communication*, pages pp.114–119, New York, NY, USA, 2008. ACM.

- [12] G. Cheng, W. Liu, Y. Li, and W. Cheng. Joint on-demand routing and spectrum assignment in cognitive radio networks. In *Communications, 2007. ICC '07. IEEE International Conference on*, pages 6499–6503, june 2007.
- [13] G. Cheng, W. Liu, Y. Li, and W. Cheng. Spectrum aware on-demand routing in cognitive radio networks. In *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2007. DySPAN 2007. 2nd IEEE International Symposium on*, pages 571–574, april 2007.
- [14] G. Chouinard. WRAN reference model, Jan. 2007. doc.: IEEE 802.22-04/0002r15.
- [15] C. Cordeiro and K. Challapali. C-MAC: A cognitive MAC protocol for multi-channel wireless networks. In *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2007. DySPAN 2007. 2nd IEEE International Symposium on*, pages 147–157, april 2007.
- [16] C. Cordeiro, K. Challapali, D. Birru, and S. Shankar. IEEE 802.22: the first worldwide wireless standard based on cognitive radios. In *Proc. IEEE 1st Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, pages pp.328–337, Baltimore, Nov. 2005.
- [17] C. Cordeiro, K. Challapali, and M. Ghosh. Cognitive PHY and MAC layers for dynamic spectrum access and sharing of TV bands. In *TAPAS '06: Proceedings of the first international workshop on Technology and policy for accessing spectrum*, page 3, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- [18] C. Cormio and K. R. Chowdhury. A survey on MAC protocols for cognitive radio networks. *Ad Hoc Networks*, 7(7):pp.1315–1329, 2009.
- [19] F. Digham, M. Alouini, and M. Simon. On the energy detection of unknown signals over fading channels. In *Proc. IEEE ICC 2005*, volume vol.5, pages pp.3575–3579, May 2003.
- [20] FCC. Et docket no.02-155. Technical report, Spectrum Policy Task Force Report, Nov 2002.
- [21] FCC. FCC radio spectrum home page, 2010. Disponível em: <http://www.fcc.gov/oet/spectrum>. Acesso em março de 2010.
- [22] A. Fehske, J. D. Gaeddert, and J. H. Reed. A new approach to signal classification using spectral correlation and neural networks. In *Proc. IEEE 1st Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, pages pp.144–150, Baltimore, Nov. 2005.
- [23] B. Fette. *Cognitive radio technology*. Elsevier Science & Technology Books, 2006.
- [24] B. Fette. *Cognitive radio, software defined radio, and adaptive wireless systems*, chapter Introducing Adaptive, Aware, and Cognitive Radios. Springer, 2007.

- [25] L. C. Freitas, A. Klautau, and J. C. W. A. Costa. Classificadores de modulação digital em sensoriamento espectral de rádio cognitivo. In *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT) 2008*, 2008.
- [26] W. A. Gardner. Signal interception: A unifying theoretical framework for feature detection. *IEEE Trans. on Communications*, vol.36(8):pp.897–906, August 1988.
- [27] S. Geirhofer, L. Tong, and B. M. Sadler. Dynamic spectrum access in the time domain: Modeling and exploiting white space. *IEEE Communications Magazine*, 45(5):pp.66–72, May 2007.
- [28] E. Gelenbe and P. Liu. QoS and routing in the cognitive packet network. In *World of Wireless Mobile and Multimedia Networks, 2005. WoWMoM 2005. Sixth IEEE International Symposium on a*, pages 517–521, June 2005.
- [29] E. Gelenbe, Z. Xu, and E. Seref. Cognitive packet networks. In *Tools with Artificial Intelligence, 1999. Proceedings. 11th IEEE International Conference on*, pages 47–54, 1999.
- [30] A. Ghasemi. *Spectrum sensing in cognitive wireless networks: Requirements, challenges and design trade-offs*. Doctor of philosophy thesis, University of Toronto, Toronto, Canada, 2008.
- [31] A. Ghasemi and Y. G. Li. Collaborative spectrum sensing in cognitive radio networks. In *Proc. IEEE 1st Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, pages pp.137–143, Baltimore, Nov. 2005.
- [32] A. Ghasemi and E. S. Sousa. Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments. In *Proc. IEEE 1st Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, pages pp.131–136, Baltimore, Nov. 2005.
- [33] A. Ghasemi and E. S. Sousa. Spectrum sensing in cognitive radio networks: Requirements, challenges and design trade-offs. *IEEE Communications Magazine, Feature topic on Cognitive Radio*, vol.46(no.4):pp.32–39, April 2008.
- [34] M. Ghoszi, F. Marx, M. Dohler, and J. Palicot. Cyclostationarity-based test for detection of vacant frequency bands. In *Proc. 1st International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom)*, June 2006.
- [35] M. Gudmundson. Correlation model for shadow fading in mobile radio systems. *Electronic Letters*, 27(23):pp.2145–2146, November 1991.
- [36] S. Haykin. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2(23):pp.201–220, 2005.
- [37] IEEE 802 LAN/MAN standards committee. IEEE 802.22 WG on WRANs (wireless regional area networks, 2010. Disponível em: <http://www.ieee802.org/22/>. Acesso em março de 2010.

- [38] O. Ileri, D. Samardzija, and N. Mandayam. Demand responsive pricing and competitive spectrum allocation via spectrum server. In *Proc. IEEE DySPAN 2005*, pages pp.194–202, November 2005.
- [39] J. Jia, Q. Zhang, and X. Shen. HC-MAC: A hardware-constrained cognitive MAC for efficient spectrum management. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 26(1):106–117, jan. 2008.
- [40] X. Jing, C. Liu, and X. Sun. Artificial cognitive BP-CT ant routing algorithm. In *Neural Networks, 2005. IJCNN '05. Proceedings. 2005 IEEE International Joint Conference on*, volume 2, pages 1098 – 1103 vol.2, july-4 aug. 2005.
- [41] F. K. Jondral. Software-defined radio-basic and evolution to cognitive radio. *EU-RASIP Journal on Wireless Communication and Networking*, 2005.
- [42] H. Kim and K. G. Shin. Efficient discovery of spectrum opportunities with MAC-layer sensing in cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing (T-MC)*, 7(5):pp.533–545, May 2008.
- [43] H. Kim and K. G. Shin. In-band spectrum sensing in cognitive radio networks: energy detection or feature detection? In *MobiCom '08: Proceedings of the 14th ACM international conference on Mobile computing and networking*, pages pp.14–25, New York, NY, USA, 2008. ACM.
- [44] S. Krishnamurthy, M. Thoppian, S. Venkatesan, and R. Prakash. Control channel based MAC-layer configuration, routing and situation awareness for cognitive radio networks. In *Military Communications Conference, 2005. MILCOM 2005. IEEE*, pages 455–460 vol.1, oct. 2005.
- [45] A. Kumar and K. Shin. Towards context-aware wireless spectrum agility. In *MobiCom '07: Proceedings of the 13th annual ACM international conference on Mobile computing and networking*, pages pp.318–321, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [46] N. Kundargi and A. Tewfik. Sequential pilot sensing of ATSC signals in IEEE 802.22 cognitive radio networks. In *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2008. ICASSP 2008*, pages pp.2789–2792, 31 2008-April 4 2008.
- [47] P. Kyasanur. Mesh networking protocols to exploit physical layer capabilities. In *Proc. IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks (WiMesh)*, 2005.
- [48] R. Lent. Linear QoS goals of additive and concave metrics in ad hoc cognitive packet routing. *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on*, 36(6):1255–1260, dec. 2006.
- [49] S.-Y. Lien, C.-C. Tseng, and K.-C. Chen. Carrier sensing based multiple access protocols for cognitive radio networks. In *Proceedings of IEEE International Conference on Communications, ICC 2008, Beijing, China, 19-23*, pages 3208–3214, 2008.

- [50] Q. Mahmoud. *Cognitive networks: Towards self-aware networks*. John Wiley and Sons, 2007.
- [51] D. Maldonado, B. Le, A. Hugine, T. Rondeau, and C. Bostian. Cognitive radio applications to dynamic spectrum allocation: a discussion and an illustrative example. In *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, pages 597–600, nov. 2005.
- [52] D. Maldonado, B. Le, A. Hugine, T. W. Rondeau, and C. W. Bostian. Cognitive radio applications to dynamic spectrum allocation: a discussion and an illustrative example. In *Proc. IEEE 1st Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, pages pp.597–600, Baltimore, Nov. 2005.
- [53] J. Mitola. *Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio*. Doctor of technology dissertation, Royal Inst. Technol. (KTH), Stockholm, Sweden, 2000.
- [54] J. Mitola. *Software radio architecture: Object-oriented approaches to wireless systems engineering*. John Wiley and Sons, 2 edition, 2000.
- [55] J. Mitola and G. Q. Maguire. Cognitive radio: Making software radios more personal. *IEEE Pers. Commun.*, 6:pp.13–18, Aug. 1999.
- [56] A. Mody, M. Sherman, R. Martinez, R. Reddy, and T. Kiernan. Survey of IEEE standards supporting cognitive radio and dynamic spectrum access. In *Military Communications Conference, 2008. MILCOM 2008. IEEE*, pages pp.1–7, Nov. 2008.
- [57] A. Motamedi and A. Bahai. MAC protocol design for spectrum-agile wireless networks: stochastic control approach. In *Proc. of the IEEE DySPAN 2007*, pages pp.448–451, April 2007.
- [58] M. A. Oner and F. K. Jondral. Cyclostationarity-based methods for the extraction of the channel allocation information in a spectrum pooling system. In *Proc. IEEE Radio and Wireless Conference*, pages pp.279–282, September 2004.
- [59] C. Perkins and E. Royer. Ad-hoc on-demand distance vector routing. In *Mobile Computing Systems and Applications, 1999. Proceedings. WMCSA '99. Second IEEE Workshop on*, pages 90–100, feb 1999.
- [60] J. D. Poston, W. D. Horne, M. G. Taylor, and F. Z. Zhu. Ontology-based reasoning for context-aware radios: insights and findings from prototype development. In *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, pages pp.634–637, Nov. 2005.
- [61] J. Proakis. *Digital communications*. McGraw-Hill, 4th. ed. edition, 2001.
- [62] A. Sahai, N. Hoven, and R. Tandra. Some fundamental limits in cognitive radio. In *Allerton Conf. on Comm., Control and Computing 2004*, October 2004.
- [63] S. Shellhammer. The spectrum sensing function, April 2007. IEEE 802.22/07-0074r3.

- [64] S. Shellhammer and G. Chouinard. Spectrum sensing requirements summary. Technical report, IEEE 802.22, July 2006.
- [65] S. Shellhammer, N. Shankar, R. Tandra, and J. Tomcik. Performance of power detector sensors of dtv signals in iee 802.22 WRANs. In *Proc. of the ACM TAPAS 2006*, August 2006.
- [66] A. Sonnenschein and P. M. Fishman. Radiometric detection of spread-spectrum signals in noise. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems*, vol.28(no.3):pp.654–660, July 1992.
- [67] I. . D. Standard. Ieee p802.22tm/d0.3 draft standard for wireless regional area networks, May 2007. doc. no.22-07-0086-01-0000.
- [68] G. Staple and K. Werbach. The end of spectrum scarcity. *IEEE Spectrum*, March 2004. Disponível em: <http://www.spectrum.ieee.org/mar04/3811>. Acesso em março de 2010.
- [69] J. Stine. Spectrum management: the killer application of ad hoc and mesh networking. In *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, pages 184–193, nov. 2005.
- [70] R. Tandra and A. Sahai. Fundamental limits on detection in low SNR under noise uncertainty. In *Proc. International Conference on Wireless Networks, Communications and Mobile Computing*, pages pp.464–469, June 2005.
- [71] R. Tandra, A. Sahai, and S. Mishra. What is a spectrum hole and what does it take to recognize one? *Proceedings of the IEEE – special issue on Cognitive Radio*, 97(5):824–848, may 2009.
- [72] H. Tang. Some physical layer issues of wide-band cognitive radio system. In *Proc. IEEE 1st Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, pages pp.151–159, Baltimore, Nov. 2005.
- [73] R. W. Thomas, L. A. DaSilva, and A. B. Mackenzie. Cognitive networks. In *Proceedings of the First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, Baltimore, MD, USA, November 2005.
- [74] R. W. Thomas, D. H. Friend, L. A. DaSilva, and A. B. Mackenzie. *Cognitive Radio, Software Defined Radio, and Adaptive Wireless Systems*, chapter Cognitive Networks. Springer, 2007.
- [75] Y. Xiao and F. Hu. *Cognitive Radio Networks*. CRC Press, 2008.
- [76] B. Zhang, Y. Takizawa, A. Hasagawa, A. Yamaguchi, and S. Obana. Tree-based routing protocol for cognitive wireless access networks. In *Wireless Communications and Networking Conference, 2007.WCNC 2007. IEEE*, pages 4204–4208, march 2007.
- [77] Z. Zhang and X. Xu. Implementation of cyclic periodogram detection on vee for cognitive radio. In *Global Mobile Congress (GMC'2007)*, pages pp.1–5, Oct 2007.