

ROGGER REIS FABRI SOARES

**REDES DE PRÓXIMA GERAÇÃO: UMA ABORDAGEM TEÓRICA
SOBRE REDES DE RÁDIO COGNITIVO**

Monografia de Graduação apresentada ao Departamento de Ciência da Computação da Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do curso de Ciência da Computação para obtenção do título de Bacharel em Ciência da Computação.

Orientador

Prof. Dr. Luiz Henrique Andrade Correia

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL
2009

ROGGER REIS FABRI SOARES

**REDES DA PRÓXIMA GERAÇÃO: UMA ABORDAGEM TEÓRICA
SOBRE REDES DE RÁDIO COGNITIVO**

Monografia de Graduação apresentada ao Departamento de Ciência da Computação da Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do curso de Ciência da Computação para obtenção do título de Bacharel em Ciência da Computação.

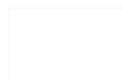
Aprovada em: 26 de Novembro de 2009

Prof. Dr. Tales Heimfarth

Prof. Dr. Wilian Soares Lacerda

Prof. Dr. Luiz Henrique Andrade Correia
(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL
2009



*Dedico este trabalho a minha amada
família, meus pais Adenilze e Paulo,
meu irmão Renan, minha grande amiga
Kalianne e a Josiane, meu amor.*

AGRADECIMENTOS

À Deus, meu guia, conforto e proteção durante toda minha vida.

Ao meu pai e minha mãe, pelo amor, dedicação e reconhecimento. Amo vocês!

Ao meu orientador Prof. Luiz Henrique Andrade Correia, pela oportunidade e principalmente pela confiança depositada em mim e em meu trabalho.

Aos meus companheiros de trabalho, pela paciência, compreensão e apoio.

Aos professores e funcionários do DCC – Departamento de Ciência da Computação.

À minha namorada Josiane, pela colaboração durante minha graduação, mas principalmente pelo amor, companheirismo e carinho, fundamentais para a concretização desse sonho. Amo muito você, meu amor!

Às minhas amigas Daniela, Luíza, Izaura e Vanessa pelos incontáveis dias de companhia, pelo apoio e pela preocupação e principalmente pelos bons e divertidos momentos nos quais todos nós passamos juntos. Vocês se tornaram parte de minha família.

À minha grande amiga Kalianne, por ter caminhado durante a graduação ao meu lado e ter deixado sua marca em minha vida. Para mim, você é como minha irmãzinha querida.

A todos meus verdadeiros amigos, de longe e de perto, pela força, apoio e amizade. Sei que posso sempre contar com vocês.

Enfim, a todos que contribuíram para esse importante passo e para a realização desse sonho tão esperado.

REDES DE PRÓXIMA GERAÇÃO: UMA ABORDAGEM TEÓRICA SOBRE REDES DE RÁDIO COGNITIVO

RESUMO

O avanço tecnológico das últimas décadas permitiu uma grande convergência no uso de redes sem fio. A rápida aceitação e viabilidade do uso das redes sem fio provocou o aparecimento de alguns obstáculos em sua utilização. As redes sem fio atuais são caracterizadas por uma política de alocação estática de frequência, o que pode causar uma escassez de frequência. A partir desse obstáculo surgiu o conceito de Rádio Cognitivo. Um Rádio Cognitivo é definido como um rádio que pode mudar seus parâmetros de transmissão baseando-se na interação com o seu ambiente. Como a idéia de Redes de Rádio Cognitivo é recente, ainda está em desenvolvimento e vários problemas ainda estão em aberto, a necessidade de um estudo sobre o estado da arte da área em questão é essencial.

Palavras-chave: Redes Sem Fio, Rádio Cognitivo.

NEXT GENERATION NETWORKS: A TEORIC APPROACH ABOUT COGNITIVE RADIO NETWORKS

ABSTRACT

The technological advance of the last decades has enabled a great convergence in the use of wireless networks. The rapid acceptance and viability of the use of wireless networks has caused the appearance of certain barriers in its use. The current wireless networks are characterized by a policy of static allocation of frequency, which can cause a shortage frequency. From this barrier the concept of obstacle Cognitive Radio arose. A Cognitive Radio is defined as a radio that can change its transmission parameters based on interaction with its environment. As the idea of Cognitive Radio Networks is recent and is still in development, several problems are still open, the necessity of a study on the state of the art of Cognitive Radio Networks is essential.

Keywords: Wireless Networks, Cognitive Radio.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xiii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Contextualização.....	1
1.2 Motivação	3
1.3 Definição do Problema	6
1.4 Objetivo	6
1.5 Organização do Trabalho	6
2 METODOLOGIA	8
2.1 Tipo de Pesquisa	8
3 REVISÃO DE LITERATURA	9
3.1 Introdução	9
3.2 Redes de Rádio Cognitivo	9
3.3 Arquitetura de uma Rede de Rádio Cognitivo	13
3.3.1 Componentes de Rede	13
3.3.2 Heterogeneidade do Espectro	15
3.3.3 <i>Framework</i> de Gestão do Espectro	15
3.3.3.1 Detecção do Espectro	17
3.3.3.2 Decisão do Espectro	18
3.3.3.3 Compartilhamento do Espectro	18
3.3.3.4 Mobilidade do Espectro	20

3.4 O Protocolo IEEE 802.22	21
3.4.1 Tecnologia	23
3.4.2 Visão Geral da Topologia WRAN	24
3.4.3 Visão Geral da Camada Física	25
3.4.4 Visão Geral da Camada MAC.....	27
4 ESTUDOS RECENTES E O ESTADO DA ARTE	28
4.1 Introdução.....	28
4.2 Visão Geral dos Grupos de Pesquisa.....	28
4.3 Alocando Blocos Tempo-Espectro Dinâmicos	29
4.4.Problema de Configuração da Rede	32
4.5 Problema do Canal de Controle Comum	41
4.6 Arquiteturas Existentes	41
5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	47
5.1 Conclusões	47
5.2 Trabalhos Futuros	50
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – A Utilização do Espectro	12
Figura 2 – O Conceito de Buracos no Espectro	13
Figura 3 – Arquitetura de uma Rede de Rádio Cognitivo	14
Figura 4 – Gestão do Espectro	16
Figura 5 – <i>Framework</i> de Gestão do Espectro para Redes de Rádio Cognitivo	21
Figura 6 – Estações VHF/UHF e 802.22.....	23
Figura 7 – Tecnologia WRAN 802.22	24
Figura 8 – O Sistema de <i>Channel Bonding</i>	26
Figura 9 - <i>Channel Bonding</i> no 802.11	26
Figura 10 – Comparação dos Protocolos	40
Figura 11 – A Arquitetura CORVUS	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações de capacidade e cobertura do protocolo IEEE 802.22 WRAN	22
Tabela 2 Comparação entre as arquiteturas	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACK	<i>Affirmative Acknowledgment</i>
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
AP	<i>Access Point</i>
BS	<i>Base Station</i>
CAB	<i>Coordinated Access Band</i>
CAP	<i>Cognitive Access Point</i>
CCC	Canal de Controle Comum
CORVUS	<i>Cognitive Radio Approach for Usage of Virtual Unlicensed Spectrum</i>
CPE	<i>Customer Premise Equipment</i>
CRN	<i>Cognitive Relay Node</i>
DARPA	<i>Defense Advanced Research Projects Agency</i>
DFS	<i>Dynamic Frequency Selection</i>
DIMSUMnet	<i>Dynamic Intelligent Management of Spectrum for Ubiquitous Mobile Network</i>
DoS	<i>Denial of Service</i>
DSA	<i>Dynamic Spectrum Access</i>
DSL	<i>Digital Subscriber Line</i>
EIRP	<i>Equivalent Isotropically Radiated Power</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IF	<i>Intermediary Frequency</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MAN	<i>Metropolitan Area Network</i>

MVNO	<i>Mobile Virtual Network Operator</i>
NSF	<i>National Science Foundation</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OFDM A	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
PCCC	Problema do Canal de Controle Comum
PCR	Problema de Configuração de Rede
PHY	<i>Physical</i>
PM2P	<i>Point to Multipoint</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
SCH	<i>Superframe Controle Header</i>
SMA	<i>Statistically Multiplexed Access</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SUG	<i>Secondary User Group</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
UMTS	<i>Universal Message Transmission System</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WMAN	<i>Wireless Metropolitan Area Network</i>
WRAN	<i>Wireless Regional Area Network</i>

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O avanço tecnológico das últimas décadas modificou profundamente as relações pessoais e profissionais. Depois da revolução provocada pela globalização da internet, uma nova onda de mudanças, baseada na possibilidade de uma comunicação total sem fio, promete elevar a patamares nunca imaginados conceitos como conectividade e mobilidade.

Há muito tempo os dispositivos móveis deixaram de serem simples organizadores pessoais. Com o desenvolvimento tecnológico de fabricação de circuitos integrados, tem sido possível fabricar dispositivos computacionais com um novo paradigma: o da mobilidade.

Com a evolução dos dispositivos móveis surgiu o conceito de Redes de Rádio Cognitivo que irão atuar diretamente no cenário das redes sem fio. Atualmente a alocação estática de frequência para as comunicações sem fio vem trazendo obstáculos que serão fatores limitantes em pouco tempo. As características atuais das redes sem fio implicam em uma limitação quantitativa da existência de várias redes em um mesmo local. Essa limitação decorre de interferências causadas no espectro de frequência, provenientes de outras redes que utilizam a mesma ou uma faixa próxima de operação e, conseqüentemente, causa a queda da qualidade do serviço das mesmas.

As Redes de Rádio Cognitivo irão permitir grande largura de banda para usuários móveis através de uma arquitetura sem fio heterogênea e técnicas dinâmicas de acesso ao espectro. Porém, as Redes de Rádio Cognitivo impõe algumas dificuldades devido à natureza flutuante da faixa frequência disponível, assim como os diversos requisitos de *QoS* (*Quality Of Service* – Qualidade de Serviço) de várias aplicações.

As redes sem fio atuais são caracterizadas por uma política de alocação estática de frequência, em que agências reguladoras, como a ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações) no Brasil, atribuem espectros sem fio para titulares de licenças em uma perspectiva de longo prazo para as grandes regiões geográficas. Recentemente, devido à grande demanda de espectro, essa política se depara com a escassez de espectros em algumas bandas de frequência. Por outro lado, uma grande porção de espectros de frequência atribuídos é usada esporadicamente, levando a uma subutilização de uma quantidade significativa do espectro. Segundo Yuan *et al.* (2007), estudos recentes mostram que somente 5% do espectro na faixa de 30MHz até 30GHz é utilizado nos EUA. Por isso, técnicas dinâmicas de acesso ao espectro foram recentemente propostas para resolver esses problemas de ineficiência de acesso ao espectro.

Essa técnica de acesso dinâmico ao espectro é baseada na tecnologia de Rádio Cognitivo, que fornece a capacidade de dividir o canal sem fio com usuários licenciados de uma maneira oportunista.

Para resolver esses problemas uma Rede de Rádio Cognitivo deve:

- Determinar quais porções do espectro estão disponíveis;
- Escolher o melhor canal disponível;
- Coordenar acesso a este canal com outros usuários;
- Desocupar o canal quando um usuário licenciado é detectado.

Segundo Akyildiz *et al.* (2008), essas metas podem ser alcançadas através de funções de gestão do espectro que abordam os quatro principais desafios: detecção de espectro, decisão de espectro, compartilhamento de espectro, e mobilidade de espectro.

A proposta é o desenvolvimento de Redes de Rádio Cognitivo que não impliquem na modificação das redes sem fio já existentes.

Segundo Akyildiz *et al.* (2008), formalmente, um Rádio Cognitivo é definido como um rádio que pode mudar seus parâmetros de transmissão baseando-se na interação com o seu ambiente. A partir dessa definição, duas características principais do Rádio Cognitivo podem ser definidas:

- Capacidade cognitiva: com interações em tempo real com o ambiente do rádio, as porções de espectro que não estão sendo usadas em um tempo ou local específico podem ser identificadas. Desse modo, um Rádio Cognitivo habilita o uso de um espectro temporariamente não usado. Conseqüentemente, o melhor espectro pode ser selecionado, compartilhado com outros usuários, e explorado sem interferir no usuário licenciado;
- Reconfigurabilidade: um Rádio Cognitivo pode ser programado para receber e transmitir numa variedade de frequências, e usar diferentes tecnologias suportadas pelo seu hardware. Através dessa capacidade, o melhor espectro de banda e os melhores parâmetros de operação podem ser selecionados e reconfigurados.

1.2 Motivação

Rádio Cognitivo é uma tecnologia recente ainda em fase de pesquisa. A grande quantidade de problemas ainda não resolvidos na área implica numa necessidade de maior conhecimento por parte dos pesquisadores. A atenção voltada para essa área de pesquisa por parte de várias instituições (públicas, privadas e militares) vem aumentando cada vez mais devido ao potencial tecnológico e comercial que ela representa.

A tecnologia é vista como um grande alívio ao problema de alocação de espectro e a escassez de espectro em determinados locais, permitindo grande mobilidade e transparência operacional.

Segundo Akyildiz *et al.* (2006), além disso, já existem várias aplicações em potencial para essa nova tecnologia. Dentre as quais se podem citar:

- Rede de Circuitos: a rede primária pode oferecer uma rede de circuitos "alugados" que permite acesso oportunista ao seu espectro licenciado, com o acordo de um terceiro, sem sacrificar a qualidade de serviço do usuário principal. Por exemplo, a rede primária pode alugar o seu direito de acesso ao espectro à um operador de rede móvel virtual (MVNO - *Mobile Virtual Network Operator*). A rede primária também pode "alugar" o seu direito de acesso ao espectro à uma comunidade regional para efeitos de acesso em banda larga;
- Rede *mesh* Cognitiva: redes *mesh* sem-fio estão emergindo como uma tecnologia efetiva para fornecer conectividade de banda larga. No entanto, à medida que a densidade da rede aumenta e as aplicações requerem um maior rendimento, as redes *mesh* exigem maior capacidade para satisfazer os requisitos das aplicações. Como a tecnologia de rádio cognitivo permite o acesso à maior quantidade de espectro, elas podem ser usadas em redes *mesh* implantadas em densas áreas urbanas. Por exemplo, a área de cobertura das redes cognitivas pode ser aumentada quando uma rede de interconexão sem fio *mesh* de infraestrutura é estabelecida com base em pontos de acesso cognitivo (CAP – *Cognitive Access Point*) e nós fixos de revezamento cognitivo (CRN – *Cognitive Relay Nodes*). A capacidade de um CAP, ligado através de um fio de acesso banda larga à Internet, é distribuída em uma grande área com a ajuda de uma Rede de Rádio Cognitivo fixa. Redes de Rádio Cognitivo têm a capacidade de adicionar

um espectro temporário ou permanente para a infraestrutura de links utilizados para a retransmissão em caso de sobrecarga no tráfego;

- Rede de Emergência: segurança pública e redes de emergência são outras áreas em que as redes cognitivas podem ser utilizadas. No caso de catástrofes naturais, o que pode desativar temporariamente ou destruir infraestruturas de comunicação existentes, a equipe de emergência que trabalha nas áreas de desastre necessita estabelecer redes de emergência. Como redes de emergência lidam com informações críticas, uma comunicação confiável deve ser garantida com o mínimo de latência. Além disso, a comunicação de emergência requer uma quantidade significativa do espectro para a manipulação de um enorme volume de tráfego, incluindo voz, vídeo e dados. Redes de Rádio Cognitivo podem permitir a utilização do espectro existente, sem a necessidade de uma infraestrutura e pela manutenção da prioridade de comunicação e tempo de resposta;
- Rede Militar: uma das mais interessantes aplicações em potencial de uma rede Redes de Rádio Cognitivo está em um ambiente rádio militar. Redes de Rádio Cognitivo podem permitir que os rádios militares escolham, arbitrariamente, frequência intermediária (IF) de largura de banda, esquemas de modulação e sistemas de codificação, adaptando o ambiente de rádio móvel no campo de batalha. As redes militares têm uma forte necessidade de segurança e proteção da comunicação em ambiente hostil. Redes de Rádio Cognitivo podem permitir que os militares realizem uma busca no espectro para encontrar um canal seguro para si e seus aliados.

1.3 Definição do Problema

Várias pesquisas paralelas estão sendo realizadas na área de Redes de Rádio Cognitivo. Para que essa tecnologia torne-se um produto é necessário que essas pesquisas sejam coordenadas. Além disso, vários trabalhos estão focados em problemas específicos da área e isso pode ser um obstáculo em pesquisas futuras. Um estudo aprofundado e a análise do estado da arte das pesquisas recentes são de grande importância para o cenário atual e se mostra essencial para a compreensão profunda da área de pesquisa.

1.4 Objetivo

Este trabalho possui o objetivo principal de estudar trabalhos recentes na área de pesquisa de Rádios Cognitivos e apresentar o estado atual das pesquisas na área dentro dos seguintes tópicos: Detecção de Espectro, Compartilhamento de Espectro, Mobilidade de Espectro e Decisão de Espectro. Outro objetivo é entender e perceber as principais deficiências nas pesquisas atuais e a viabilidade das soluções já propostas. Através da análise dos trabalhos recentes e das pesquisas realizadas será possível perceber se essa pesquisa poderá, futuramente, transformar-se ou não em um produto comercial.

1.5 Organização do Trabalho

No Capítulo 3 do trabalho é realizado o levantamento bibliográfico do trabalho para o embasamento da pesquisa. Conceitos, outros tipos de problemas, especificações técnicas e padrões da tecnologia também são comentados neste capítulo. O Capítulo 4 apresenta o estado da arte e os estudos recentes na área de pesquisa. Os principais trabalhos que mais contribuíram para a evolução dos rádios cognitivos são citados e descritos.

Por fim, no Capítulo 5, é apresentada a conclusão do trabalho sobre o estudo realizado.

2 METODOLOGIA

2.1 Tipo de Pesquisa

Seguindo a classificação apresentada por Jung (2004), trata-se de um trabalho de Revisão de Literatura, pois visa estudar os trabalhos mais recentes e analisar as principais contribuições de cada um deles, além de apresentar o atual estado da arte na área de pesquisa.

Este trabalho, quanto ao tempo de aplicação o estudo caracteriza-se como longitudinal, pois requer uma coleta de material lenta ao longo do tempo. O estudo, quanto à aquisição de referências, se trata de referencial bibliográfico, devido ao levantamento de trabalhos realizados anteriormente sobre o mesmo tema estudado. O conjunto bibliográfico consultado é constituído por livros, publicações em jornais, congressos e anais. Esse trabalho é um estudo bibliográfico, pois visa conhecer e entender a base conceitual e as diversas contribuições científicas a respeito do assunto.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Introdução

Segundo Haykin (2005), o Rádio Cognitivo é visto como uma nova abordagem para melhorar a utilização de um recurso natural precioso: o espectro de rádio eletromagnético. O Rádio Cognitivo, construído sobre um rádio definido por software, é definido como um sistema inteligente de comunicação sem fio que está ciente de seu ambiente e utiliza a metodologia de compreensão e aprendizagem com o ambiente e se adapta às variações dos parâmetros de entrada, com dois principais objetivos:

- Comunicação altamente confiável quando e onde for necessário;
- Utilização eficiente do espectro de rádio eletromagnético.

Esta seção expõe as principais características do Rádio Cognitivo, as especificações técnicas de acordo com o protocolo IEEE 802.22, as novidades na tecnologia em comparação à tecnologias semelhantes já existentes e os principais problemas na área de pesquisa em questão.

3.2 Redes de Rádio Cognitivo

Segundo Reed & Bostian. (2006), o termo Rádio Cognitivo foi cunhado pelo Prof. Dr. Joseph Mitola em 1999. Para Mitola *et al.* (1999), a definição de um Rádio Cognitivo é:

- Um Rádio de Software que está ciente do ambiente ao seu meio e de suas capacidades;
- Um rádio que altera o comportamento da camada física;
- Um rádio capaz de utilizar complexas estratégias de adaptação.

Assim, segundo Reed & Bostian (2006), um Rádio Cognitivo é um rádio que percebe e está ciente de seu ambiente operacional e pode dinâmica e

automaticamente ajustar seus parâmetros operacionais de acordo com esse ambiente. É um tipo de rádio que aprende com experiências anteriores e lida com situações que não foram planejadas em sua concepção. Rádios Cognitivos melhoram seu próprio desempenho em resposta à pedidos do usuário e em conformidade com as regras da FCC (*Federal Communications Commission*). Um Rádio Cognitivo nada mais é do que uma melhora do tradicional conceito de Rádio de Software (Rádio em que existe um software capaz de modificar as operações e parâmetros de hardware).

Para Reed & Bostian (2006), as principais vantagens de um Rádio Cognitivo são:

- Melhor desempenho do *link*: o Rádio procura sair de canais ruins (canais instáveis e com interferência), e aumento da vazão de dados em canais bons;
- Melhor utilização do espectro: o Rádio preenche espectros inutilizados e sai de espectros muito utilizados;
- Novas propostas de negócio: maior velocidade de banda em áreas rurais, grande vazão de dados em aplicações de *streaming* (vídeo-conferência).
- Interesse significativo da FCC (*Federal Communications Commission*) e do Departamento de Defesa Americano: permitirá um possível uso de espectros de televisão.

As principais desvantagens são:

- Preocupações com a regulamentação;
- Uma preocupação especial com adaptações indesejáveis que não foram concebidas na formulação do modelo.

Para Reed & Bostian (2006), um Rádio Cognitivo deve possuir algumas características essenciais para que ele se torne ideal. Ele deve possuir Inteligência (capacidade de avaliar decisões boas e/ou ruins) para tomar decisões condizentes, deve ser Confiável e tomar decisões consistentes, deve ser Sensível

ao informar decisões, deve possuir Adaptabilidade em decisões que dependam da situação, deve ser Eficiente ao tomar decisões que implicam em um baixo custo de desempenho e deve prover uma Excelente Qualidade de Serviço ao tomar boas decisões que não reduzam o desempenho.

Segundo Hyoil & Kang (2008), Rádio Cognitivo é uma tecnologia-chave para aliviar a ineficiência do problema de utilização da frequência na atual política de alocação de frequência para redes sem fio. Em Redes de Rádio Cognitivo, usuários não licenciados ou secundários podem, oportunisticamente, utilizar faixas de frequência alocadas para usuários primários de modo que eles não causem nenhuma interferência aos usuários primários. Uma oportunidade de utilização da frequência refere-se a um tempo de duração em um canal em que ele pode ser utilizado por usuários secundários sem interferir no canal de usuários primários.

De acordo com Tandra & Sahai (2005) e Haikin (2005), um dos maiores problemas nas Redes de Rádio Cognitivo é realizar um balanceamento entre a proteção dos usuários primários contra interferência dos usuários secundários e o uso eficiente da faixa de frequência legada, para o qual a detecção de espectro é essencial. Dessa forma, a detecção do espectro descobre buracos na frequência ou oportunidades de uso da frequência ao monitorar canais fora da banda e detectar espaços em branco. A Figura 1 mostra a utilização atual do espectro e a Figura 2 exemplifica a ocorrência de buracos no espectro. Quando essas oportunidades de utilização da frequência são aproveitadas pelos usuários secundários, as técnicas de detecção de espectro devem detectar o retorno dos usuários primários para o canal para que os usuários secundários possam desocupar o canal imediatamente após a detecção do retorno dos usuários primários.

Segundo Akyildiz *et al.* (2008), para se resolver esses e outros problemas uma Rede de Rádio Cognitivo deve:

- Determinar quais porções do espectro estão disponíveis;
- Escolher o melhor canal disponível;
- Coordenar acesso a este canal com outros usuários;
- Desocupar o canal quando um usuário licenciado é detectado.

Essas metas podem ser alcançadas através de funções de gestão do espectro que abordam os quatro principais desafios: detecção de espectro, decisão de espectro, compartilhamento de espectro, e mobilidade de espectro.

A proposta é o desenvolvimento de Redes de Rádio Cognitivo que não impliquem em modificações das redes já existentes.

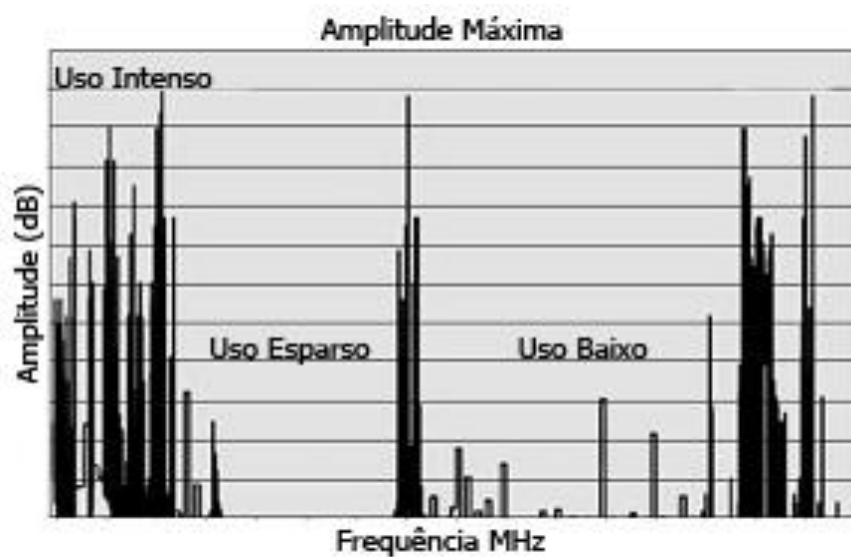


Figura 1 – A Utilização do Espectro. Fonte: Reed & Bostian (2006).

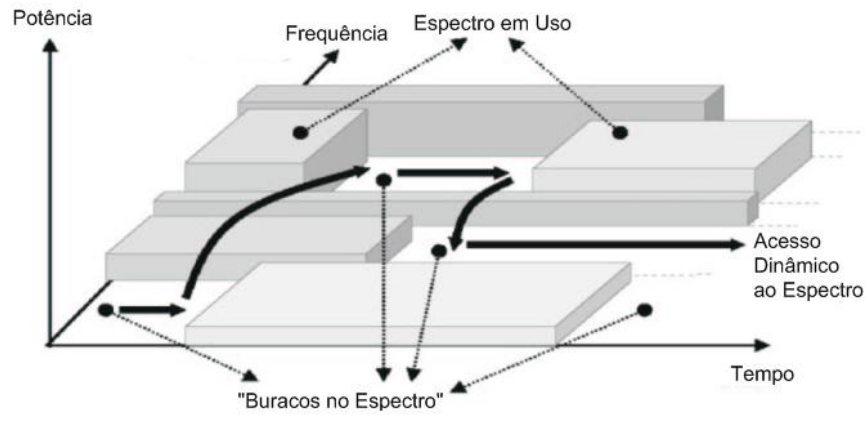


Figura 2 – O Conceito de Buracos no Espectro, Fonte: Akyildiz *et al.* (2006).

3.3 Arquitetura de uma Rede de Rádio Cognitivo

Para Akyildiz *et al.* (2008), uma descrição compreensiva da arquitetura de Rede de Rádio Cognitivo é essencial para o desenvolvimento de protocolos de comunicação que abordam as dificuldades do espectro dinâmico.

3.3.1 Componentes de Rede

Os componentes da arquitetura de uma Rede de Rádio Cognitivo podem ser classificados em dois grupos: a rede primária e a Rede de Rádio Cognitivo. A rede primária (ou rede licenciada) se refere a uma rede já existente, onde os usuários primários possuem licença para operar em certa banda de frequência. Se a rede primária possuir uma infra-estrutura, as atividades dos usuários primários são controladas através de estações primárias. Devido à sua prioridade de acesso ao espectro de frequência, as operações dos usuários primários não devem ser afetadas por usuários não licenciados. A Rede de Rádio Cognitivo

(rede secundária) não possui uma licença para operar numa banda desejada. Por isso, uma funcionalidade adicional para os usuários do Rádio Cognitivo é requerida para compartilharem a banda de espectro licenciada. Redes de Rádio Cognitivo também podem ser equipadas com estações que permitem conexão de um único salto com usuários do Rádio Cognitivo. Finalmente, redes de Rádio Cognitivo podem incluir os chamados “*spectrum brokers*” que agem distribuindo recursos do espectro de frequência através das diferentes Redes de Rádio Cognitivo. As redes primárias e secundárias são ilustradas na Figura 3. Nela, podemos ver a operação na banda não-licenciada que coexiste com a operação na banda licenciada. Os usuários secundários (usuários do Rádio Cognitivo) utilizam uma mesma banda que os usuários primários sem causa interferência nas transmissões.

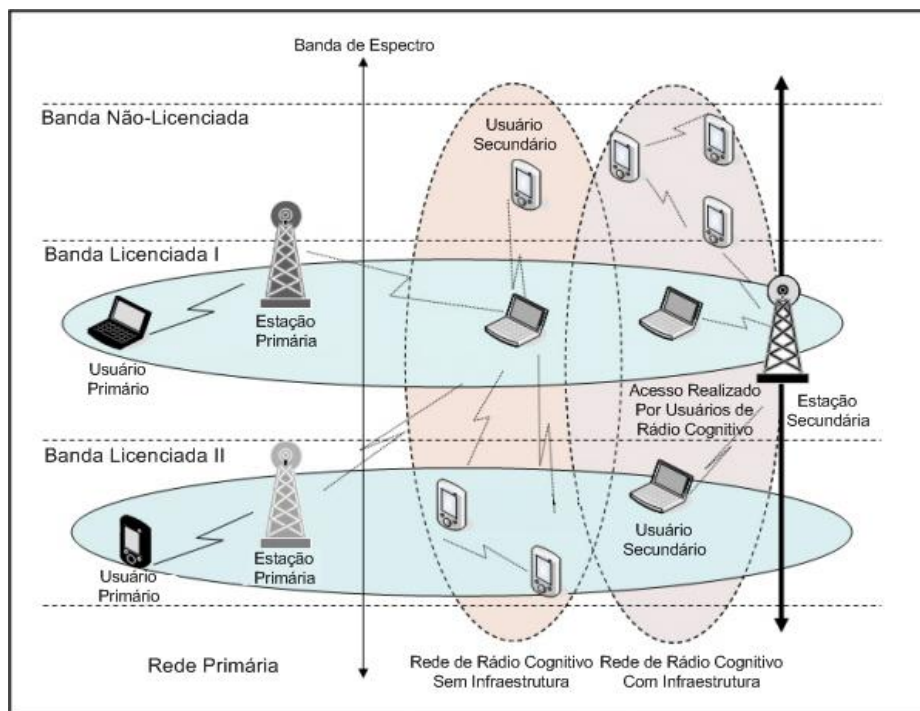


Figura 3 – Arquitetura de uma Rede de Rádio Cognitivo, Fonte: Akyildiz et al. (2006).

3.3.2 Heterogeneidade do Espectro

Usuários do Rádio Cognitivo são capazes de acessar tanto as porções licenciadas do espectro usadas pelos usuários primários quanto às porções não licenciadas do espectro através da tecnologia de acesso de banda larga. Com isso o tipo de operações para essas redes podem ser classificadas em dois tipos:

- Operação na banda licenciada: a banda licenciada é usada primeiramente pela rede primária. Desse modo, a rede foca na detecção de usuários primários. A capacidade do canal depende da interferência de usuários próximos. Se um usuário primário aparece numa banda do espectro ocupada por um usuário Rádio Cognitivo, o usuário Rádio Cognitivo deve desocupar a banda imediatamente;
- Operação na banda não licenciada: na ausência de usuários primários, usuários Rádio Cognitivo possuem o mesmo direito para acessar o espectro. Assim, métodos sofisticados de compartilhamento são necessários para que os usuários Rádio Cognitivo possam competir por uma banda de espectro.

3.3.3 Framework de Gestão do Espectro

Segundo Akyildiz *et al.* (2008), para que um Rádio Cognitivo seja operacional, ele deve fazer uma gestão eficiente do espectro, decidindo a melhor faixa de frequência a ser usada, procurar frequências não utilizadas no espectro, compartilhar esse espectro com outros Usuários Cognitivos e respeitar a prioridade dos usuários primários quanto a utilização do espectro licenciado.

As Redes de Rádio Cognitivo devem levar em conta os seguintes itens:

- Evitar interferência: redes de Rádio Cognitivo devem evitar interferência com redes primárias;
- Sensibilidade à QoS: para decidir uma banda de espectro apropriada, Redes de Rádio Cognitivo devem suportar comunicações sensíveis à QoS, considerando o ambiente heterogêneo e dinâmico do espectro;
- Comunicação transparente: Redes de Rádio Cognitivo devem prover uma comunicação transparente independentemente da aparência da rede primária.

Para contornar esses problemas algumas funcionalidades devem estar presentes nas Redes de Rádio Cognitivo. A gestão do espectro consiste em quatro principais passos, também mostrados na Figura 4:

- Detecção de espectro;
- Decisão de espectro;
- Compartilhamento de espectro;
- Mobilidade de espectro.

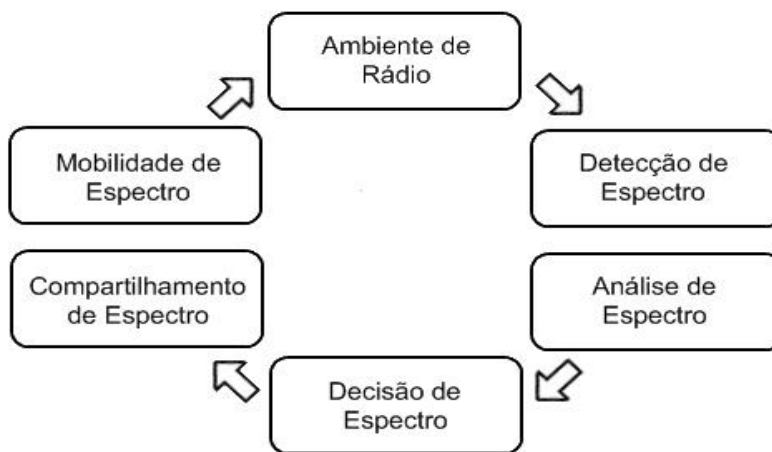


Figura 4 – Gestão do Espectro. Fonte: <http://www.imec.be/>.

3.3.3.1 Detecção de Espectro

Um usuário Rádio Cognitivo pode alocar, em determinado momento, somente uma porção não usada do espectro. Desse modo, um usuário Rádio Cognitivo deve monitorar o espectro, capturar sua informação e detectar porções não utilizadas do espectro.

As técnicas de detecção de espectro podem ser classificadas em três grupos: detecção de transmissor primário, detecção de receptor primário e gestão de interferência.

Existem vários problemas abertos que devem ser investigados para o desenvolvimento de técnicas de detecção de espectro:

- Medição da interferência: devido à falta de interação entre as redes primárias e as Redes de Rádio Cognitivo, geralmente um usuário Rádio Cognitivo não pode estar certo da localização precisa dos receptores primários;
- Detecção de espectro em redes multiusuários: as redes multiusuários (usuários primários e usuários Rádio Cognitivo) tornam mais difíceis a detecção de buracos no espectro e a estimativa de interferência;
- Detecção da eficiência de espectro: a detecção não pode ser realizada enquanto pacotes estiverem sendo transmitidos, pois a arquitetura tradicional em que só um rádio é usado, é possível somente realizar uma operação por vez. Usuários Rádio Cognitivo devem parar de transmitir enquanto estiver detectando, o que diminui a eficiência do espectro. Balancear a eficiência do espectro e a acurácia da detecção é uma questão importante.

3.3.3.2 Decisão de Espectro

Baseando na disponibilidade do espectro, usuários Rádio Cognitivo podem alocar um canal. Essa alocação depende também de políticas internas e até políticas externas.

Como os espectros disponíveis possuem características que variam com o tempo, cada porção disponível deve ser caracterizada considerando tanto o ambiente dinâmico e parâmetros do espectro, quanto à largura de banda e frequência. Por isso, é essencial definir parâmetros para diferenciar cada porção do espectro disponível, Akyildiz *et al.* (2007).

Alguns problemas permanecem sem solução na questão de decisão de espectro:

- Modelo de decisão: a estimativa de capacidade do espectro usando a taxa sinal-ruído não é suficiente para caracterizar a banda de espectro em Redes de Rádio Cognitivo;
- Cooperação com a reconfiguração: técnicas Rádio Cognitivo habilitam a reconfiguração de parâmetros de transmissão para a operação ideal em certa banda de espectro;
- Decisão de espectro sobre bandas de espectro heterogêneas: alguns espectros são atribuídos para propósitos diferentes, enquanto algumas bandas permanecem não licenciadas.

3.3.3.3 Compartilhamento de Espectro

Como podem existir vários usuários Rádio Cognitivo tentando acessar o espectro, o acesso à rede Rádio Cognitivo deve ser coordenado de modo a prevenir a colisão de múltiplos usuários em porções do espectro .

A natureza de um canal sem fio requer a coordenação de tentativas de transmissão entre os usuários de Rádio Cognitivo. Os problemas decorrentes do compartilhamento de espectro podem ser separados por quatro aspectos: a arquitetura, comportamento de alocação de espectro, técnica de acesso de espectro e escopo.

Os problemas abertos para este tópico são:

- Controle do Canal Comum: um Controle do Canal Comum facilita muitas funcionalidades no compartilhamento de espectro. Porém, como um canal deve ser desocupado quando um usuário primário escolhe o canal, o desenvolvimento de um Controle do Canal Comum fixo é inviável. Além disso, em Redes de Rádio Cognitivo um canal comum a todos os usuários é muito dependente da topologia e varia com o tempo. Consequentemente, técnicas de Controle do Canal Comum devem ser concebidas;
- Alcance dinâmico de rádio: devido à interdependência entre o alcance do rádio e a frequência, os vizinhos de um nó podem mudar assim que a frequência de operação muda. Portanto, deve-se levar em consideração a questão da frequência em Redes de Rádio Cognitivo;
- Unidade de espectro: quase todas as técnicas de decisão e compartilhamento de espectro consideram o canal como a unidade básica de espectro. Uma definição de um canal como um espectro é crucial no desenvolvimento de algoritmos;
- Localização da informação: na maioria das vezes, assumimos que os usuários secundários conhecem a localização e a potência de transmissão de usuários primários, e então o cálculo de interferência pode ser realizado facilmente. Entretanto, essa suposição não é sempre válida.

3.3.3.4 Mobilidade de Espectro

Usuários Rádio Cognitivo são considerados visitantes do espectro. Assim, se uma porção específica do espectro é requisitada por um usuário primário, a comunicação do usuário Rádio Cognitivo deve ser realizada em outra porção disponível de espectro.

Quando um usuário primário acessa um canal usado por um usuário secundário, este usuário deve desocupar o espectro para dar lugar ao usuário licenciado. O principal objetivo é manter a transparência na comunicação. A transição entre um espectro e outro deve ser rápida e simples levando a uma degradação mínima de desempenho.

Os problemas para a eficiência da mobilidade de espectro em Redes de Rádio Cognitivo são:

- Mobilidade de espectro no tempo: como os canais disponíveis variam com o tempo, habilitar QoS nesse ambiente é um problema;
- Mobilidade de espectro no espaço: a disponibilidade de banda também muda quando um usuário move de um lugar para o outro. Por isso, alocação contínua de espectro é um problema.

A Figura 5 ilustra o *framework* de gestão do espectro utilizando o modelo OSI simplificado.

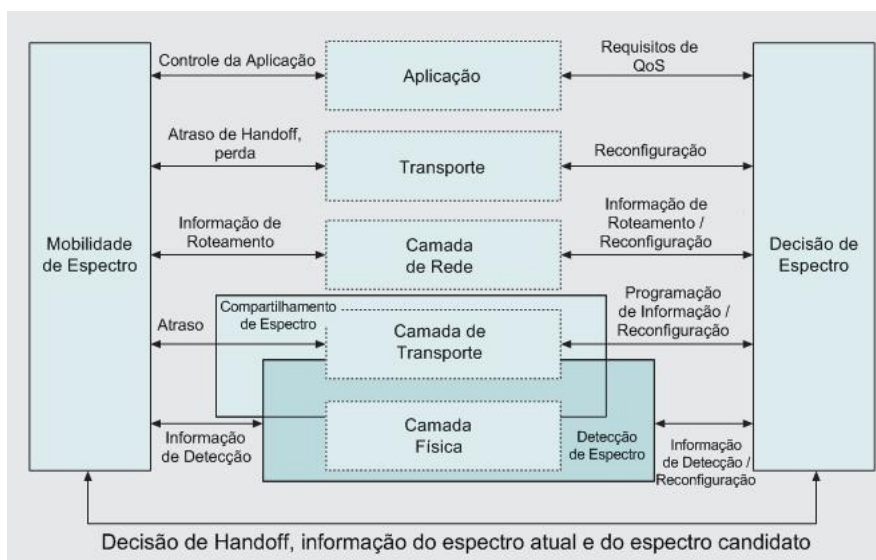


Figura 5 – Framework de Gestão do Espectro para Redes de Rádio Cognitivo, Fonte: Akyildiz *et al.* (2006).

3.4 O Protocolo IEEE 802.22

Segundo Cordeiro *et al.* (2006), o protocolo IEEE 802.22 é o novo grupo de trabalho IEEE 802 LAN/MAN Standards Committee que foca na construção de Redes Sem Fio Regionais (WRAN – *Wireless Regional Area*) utilizando “espaços em branco” (faixas que ainda não estão sendo usadas) no espectro de frequência já alocado. O espectro de frequência será usado de um modo oportunista de maneira que não interfira na transmissão de outros canais. Inicialmente a especificação foi feita para frequências utilizadas para a transmissão do sinal de Televisão.

O sistema WRAN deve detectar a presença do sinal de TV Digital, TV Analógica e serviços de telefonia sem fio em níveis baixos de SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) -116 dBm (dentro de 6MHz), -94 dBm (dentro de 6 MHz) e -107 dBm (dentro de 200 KHz), respectivamente. Além disso, seu tempo de resposta,

em termos de desocupar um canal quando um operador que aparece no canal é definido por parâmetros de tempo *Dynamic Frequency Selection* (DFS). Os parâmetros mais críticos, ou seja, a detecção do canal e movimento são da ordem de 2 segundos, de acordo com o protocolo IEEE 802.22.

A cobertura de serviço de um sistema WRAN é nominalmente 30 km, no entanto, se a regulamentação permitir aumentar os limites de potência, seu alcance deve cobrir até 100 km. Além disso, o sistema WRAN deverá proporcionar uma capacidade de 18 Mbps por canal e oferecer um serviço comparável a cabo ou DSL. Isso se traduz em uma taxa de dados de pico de 1,5 Mbps de *download* e 384 Kbps de *upload* por usuário, de acordo com o protocolo IEEE 802.22. A Tabela 1 mostra alguns dados interessantes sobre o protocolo IEEE 802.22.

Tabela 1 - Especificações de capacidade e cobertura do protocolo IEEE 802.22 WRAN, Fonte: Akyildiz *et al.* (2006)

Frequência de Rádio por Canal	6 MHz
Média da eficiência do espectro	3 Bit/s/Hz
Capacidade do canal	18 Mbit/s
Capacidade por assinante (envio)	1.5 Mbit/s
Capacidade por assinante (recebimento)	384 Kbit/s
Taxa de recebimento	3.9
Número de assinantes por canal	600
Número mínimo de assinantes	90
Número potencial de assinantes	1800
Número hipotético de pessoas por domicílio	2.5 Pessoas
Número total de pessoas por área de cobertura	4500 Pessoas
EIRP da Estação Base	98.3 Watts
Raio de cobertura	30.7 Km
Densidade mínima de população abrangida	1.5 Pessoas/Km ²

3.4.1 Tecnologia

O grupo de trabalho IEEE 802.22 sobre WRAN é o mais novo grupo (2006) do IEEE 802 LAN/MAN *Standards Committee*. O projeto, formalmente chamado de “*Standard for Wireless Regional Area Networks (WRAN) - Specific requirements - Part 22: Cognitive Wireless RAN Media Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Policies and procedures for operation in the TV Bands*” centra-se em construir uma WRAN consistente que utilize bandas VHF/UHF entre 54 e 862MHz. A estação de transmissão do protocolo 802.22 juntamente com as antenas VHF e UHF que emitem o sinal de TV podem ser vistas na Figura 6. Percebe-se, através da figura que a estação de transmissão 802.22 irá utilizar as bandas VHF e UHF. A Figura 7 mostra o alcance de operação da tecnologia WRAN em relação às outras já existentes.

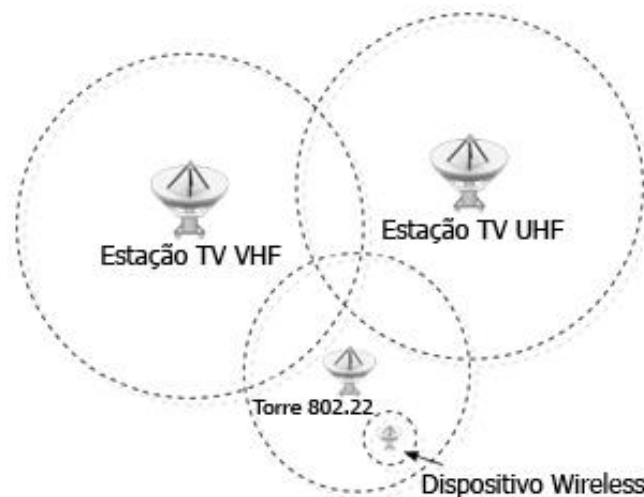


Figura 6 – Estações VHF/UHF e 802.22. Fonte: <http://www.imec.be/>.

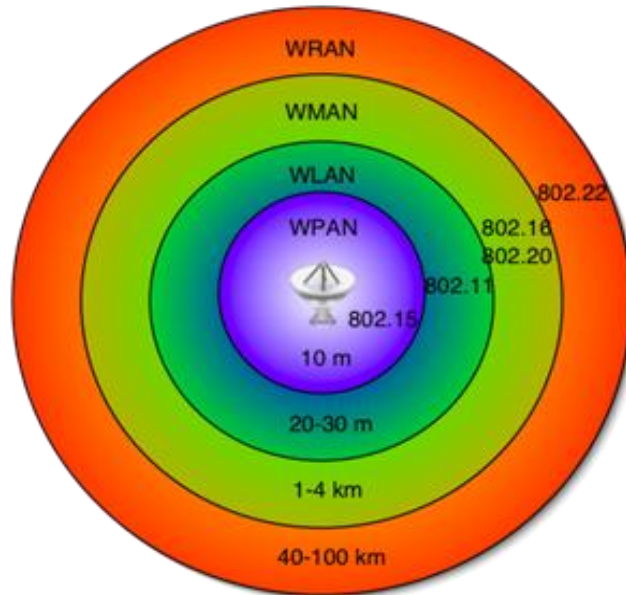


Figura 7 – Tecnologia WRAN 802.22. Fonte: <http://www.imec.be/>.

3.4.2 Visão Geral da Topologia WRAN

De acordo com Cordeiro *et al.* (2006), o protocolo 802.22 especifica que a rede deve operar em uma base ponto-multiponto (P2MP). O sistema será formado por estações base (*Base Stations* ou BS, também chamados de pontos de acesso, *Access Points* ou AP's) e equipamentos e instalações de clientes (CPE - *Customer-Provided Equipment*). Os CPE's serão anexados a uma estação base através de uma conexão sem fios nas frequências acima mencionadas. As estações base irão controlar o meio de acesso para todos os CPE's ligados a ela. Uma característica fundamental das Estações Base WRAN é que elas serão capazes de realizar uma "detecção distribuída". Trata-se de que o CPE irá detectar o espectro e enviará relatórios periódicos às estações base informando-as sobre o que foi detectado. A estação base, com a informação coletada, vai

avaliar se é necessária uma mudança no canal utilizado ou, pelo contrário, se deve manter transmissão e recepção no mesmo canal.

3.4.3 Visão Geral da Camada Física

Segundo Cordeiro *et al.* (2006), o objetivo desta camada é ser simples e fornecer um excelente desempenho. A camada Física deve ser capaz de se adaptar às diferentes condições, e também deve ser flexível para saltar de canal para canal sem erros na transmissão ou perder clientes (CPE's). Esta flexibilidade é também necessária para poder se ajustar dinamicamente a largura de banda, sistemas de codificação e modulação. O OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access*) será o esquema de modulação para a transmissão para cima e ligações descendentes. Com o OFDMA será possível atingir esta rápida adaptação necessária para as Estações Base e CPE's. Ao utilizar apenas um canal (um canal de televisão tem uma largura de banda de 6 MHz, que em alguns países, podem ser de 7 ou 8 MHz), a taxa máxima de bits é de aproximadamente 19 Mbit/s em uma faixa de 30 km de distância. A velocidade e a distância percorrida não são suficientes para cumprir os requisitos da norma. A característica "*Channel Bonding*" lida com este problema. O *Channel Bonding* consiste em utilizar mais de um canal para Transmissão / Recepção. Isto permite que o sistema possa ter uma maior banda que será refletida em um melhor desempenho do sistema. A Figura 8 ilustra o funcionamento do *Channel Bonding* em redes Ethernet. O funcionamento em redes sem fio é similar, como visto na Figura 9.

O *Channel Bonding* é uma arquitetura que permite a ligação e agregação de canais, enquanto aumenta a utilização do espectro de forma precisa, mantém os custos baixos nas estações clientes (CPE's), que operam apenas em faixas contíguas e não exigem alto desempenho e alto custo inicial de frequência de rádio.

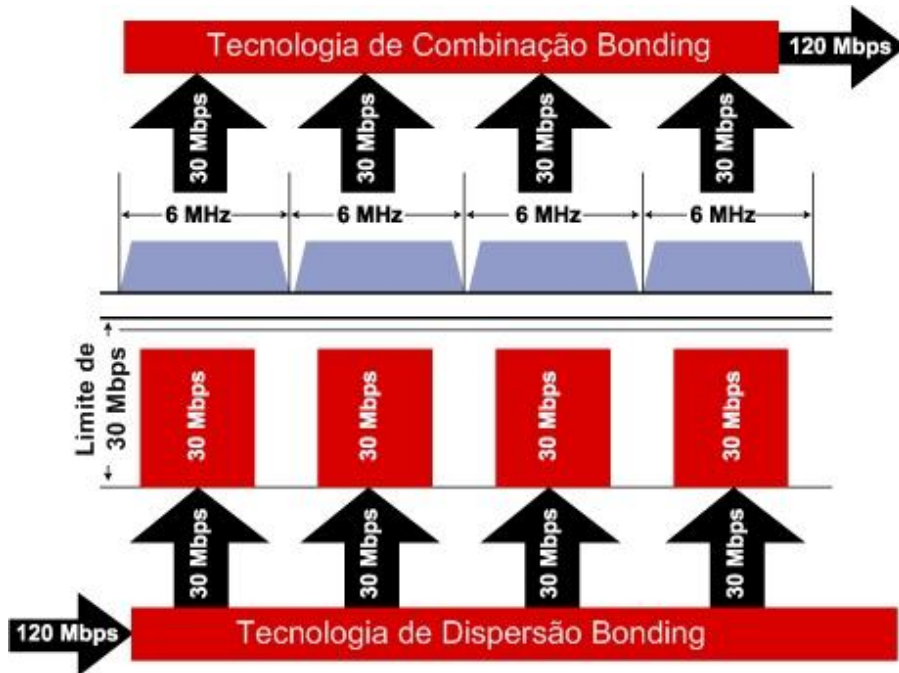


Figura 8 – O Sistema de *Channel Bonding*. Fonte: <http://www.ida.gov.sg>.

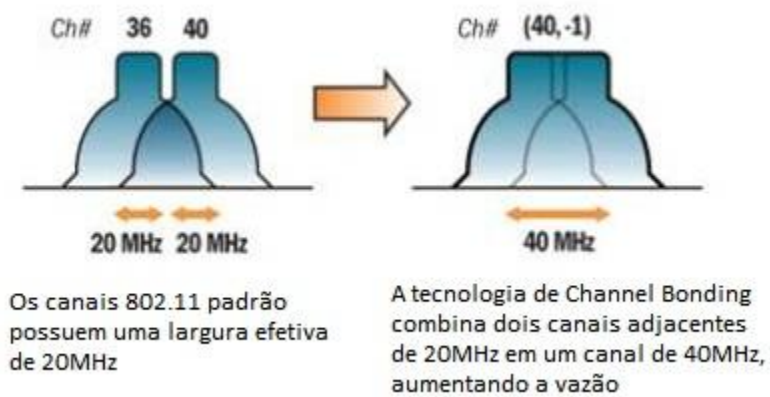


Figura 9 – *Channel Bonding* no 802.11. Fonte: <http://www.ida.gov.sg>.

3.4.4 Visão Geral da Camada MAC (*Media Access Control*)

Essa camada, também conhecida como Controle de Acesso ao Meio, será baseada na tecnologia de Rádio Cognitivo. É necessário que ela também seja capaz de se adaptar dinamicamente às mudanças no ambiente utilizando detecção do espectro. A camada de Controle de Acesso ao Meio será composta de duas estruturas: *Frame* e *Superframe*. Um *Superframe* será formado por muitos quadros. O *Superframe* terá um SCH (*Superframe Controle Header*) e um preâmbulo. Eles serão enviados pela Estação Base em cada canal que é possível transmitir sem causar interferências. Quando um CPE é ativado, ele irá detectar o espectro, descobrir quais canais estão disponíveis e receberá todas as informações necessárias para se anexar à Estação Base. Dois tipos diferentes de medição do espectro serão feitas pelo CPE: "*in-band*" e "*out-of-band*". A medição *in-band* consiste na detecção do próprio canal que está sendo utilizado pela Estação Base e pelo CPE. A medição *out-of-band* consistirá na detecção do resto dos canais. A camada MAC irá executar dois tipos diferentes de detecção nas duas medições *in-band* ou *out-of-band*: "*fast sensing*" e "*fine sensing*". O *Fast Sensing* consistirá na detecção sob a velocidade de 1ms por canal. Essa detecção é realizada pelo CPE e pela Estação Base. A Estação Base irá reunir todas as informações e irá decidir se há algo novo para ser feito. O *Fine Sensing* leva mais tempo (cerca de 25ms ou mais por canal) e é utilizado com base no resultado do mecanismo de detecção do *fast sensing*. Esses mecanismos de detecção são utilizados principalmente para identificar se existe uma transmissão acontecendo, e se há necessidade de evitar a interferência com essa transmissão.

4 ESTUDOS RECENTES E O ESTADO DA ARTE

4.1 Introdução

Esta seção busca explicitar os principais estudos que estão sendo realizados na área de Redes de Rádio Cognitivo, os principais avanços nas pesquisas e o estado da arte na área de Redes de Rádio Cognitivo analisando as contribuições em pesquisas recentes.

4.2 Visão Geral dos Grupos de Pesquisa

A área de rádios cognitivos vem recebendo muita atenção dos pesquisadores nos últimos tempos. Embora a promessa de rádios cognitivos em termos de aumento do acesso ao espectro foi amplamente reconhecida, aplicações específicas, que utilizam técnicas de rádio cognitivo só começaram a se desenvolver no início de 2006, segundo Kiran *et al.* (2006).

Segundo Kiran *et al.* (2006), vários programas patrocinados pela *National Science Foundation* (NSF) e *Defense Advanced Research Projects Agency* (DARPA) estão ativos na área de rádios cognitivos. O ProWin NSF, o XG DARPA e o WANN DARPA, todos estão relacionados de uma forma ou de outra com rádios cognitivos. Comum a esses programas do governo é a visão para o desenvolvimento de uma plataforma de rádio cognitivo. Esses rádios irão operar sobre uma ampla gama de frequências, por exemplo, até 6 GHz. No mundo comercial, no entanto, por uma série de motivos, essa visão levará mais tempo para se materializar.

Diversos fatores além da padronização do protocolo IEEE 802.22 determinam a evolução de futuros rádios cognitivos. De acordo com as

evoluções recentes pode-se observar que os rádios cognitivos irão evoluir passo a passo. Em primeiro lugar, existe a necessidade de uma regulamentação do espectro para alocar progressivamente mais bandas para uso não licenciado. Do ponto de vista da aplicação, acredita-se que os rádios cognitivos serão desenvolvidos em primeiro lugar para sistemas fixos e será em seguida desenvolvido para sistemas móveis e portáteis, como o celular, por exemplo, como apontado por Kiran *et al.* (2006).

4.3 Alocando Blocos Tempo-Espectro Dinâmicos

O trabalho de Yuan *et al.* (2007) introduz o conceito de um bloco tempo-espectro para modelar a alocação do espectro e usá-lo para apresentar uma formalização teórica do problema de alocação de espectro em redes de rádio cognitivo. O trabalho mostra um protocolo centralizado e um protocolo distribuído para a alocação do espectro e mostra que esses protocolos são bem próximos da solução ótima em vários cenários.

O problema de alocação de espectro em Redes de Rádio Cognitivo impõe um novo desafio que não surgiu em várias tecnologias sem fio, incluindo o *Wi-Fi*. Por exemplo, Rádios Cognitivos podem ajustar dinamicamente a frequência central e a largura da banda (largura do canal) para cada transmissão, segundo Yuan *et al.* (2007). Contrário a isso, as redes sem fio tradicionais usam canais de largura fixa pré-determinada. Por exemplo, cada canal no protocolo IEEE 802.11a é definido pelo padrão de 20 MHz de largura, segundo a especificação IEEE 802.11a (1999). Devido a essa falta de padrão na largura dos canais, os rádios cognitivos passam por um problema de alocação de espectro: Qual nó usar, qual a largura da banda de espectro, em qual frequência central e por quanto tempo?

O trabalho de Yuan *et al.* (2007) introduz e estuda o problema de alocação dinâmica do espectro em redes de rádio cognitivo. Possui dois principais objetivos. Primeiro, formaliza o problema respeitando métricas que definem uma solução ótima. Segundo, a partir dessa formulação teórica, desenvolve um protocolo que seja eficiente e prático para o problema de alocação dinâmica do espectro propondo e analisando o b-SMART (sigla derivada de *distributed spectrum allocation over white spaces*). É uma primeira solução prática que pode ser implementada como parte da plataforma (trabalhos anteriores do autor) para rádios cognitivos.

O trabalho de Yuan *et al.* (2007) dá as seguintes contribuições:

- O desenvolvimento de um *framework* teórico para a alocação dinâmica de espectro em redes de rádio cognitivo. O *framework* captura características essenciais dos rádios cognitivos, como agilidade da frequência e largura de banda adaptável, e introduz o conceito de blocos tempo-espectro, que representam o tempo que cada rádio cognitivo usa uma porção do espectro. Esse conceito é usado para definir o problema de alocação de espectro como encapsular os blocos tempo-espectro em um espaço tempo-frequência bidimensional, de modo que as necessidades de cada nó são satisfeitas da melhor maneira possível.
- O problema é provado como NP-Difícil e é apresentado um algoritmo de aproximação que assume total conhecimento das necessidades do usuário e funciona dentro de um pequeno fator constante do ideal, independentemente da topologia da rede.
- É proposto o b-SMART, um protocolo prático e distribuído, para resolver o problema de alocação de espectro em tempo real das redes cognitivas. O b-SMART permite cada nó decidir dinamicamente em um bloco tempo-espectro apenas em informações locais. Utilizando ambas as análises e simulações extensivas no QualNet (simulador de redes, site oficial:

<http://www.scalable-networks.com>), o trabalho mostra que o b-SMART atinge alta taxa de vazão de dados e *fairness* sob vários cenários.

Nos resultados das simulações foi mostrado que o b-SMART pode lidar com diferentes tipos de cenários, incluindo ambientes com espaços em branco esparsos, padrões variáveis de tráfego, diferentes tamanhos de pacotes e variação na densidade de nós.

Na simulação, o total da largura de banda de todos os espaços em branco disponíveis foi inicializado com 80 MHz. Foi permitido aos nós usarem somente valores discretos de largura de banda como 5, 10, 20 e 40 MHz, e foi assumido que cada 1 MHz do espectro possui uma largura de banda de 1.2 Mbps. As simulações foram feitas usando-se velocidades de transmissão de dados de 6, 12, 24 e 48 Mbps respectivamente, e desabilitando o controle automático da velocidade da transmissão. O canal de controle fica na faixa inferior de 6 Mbps (5 MHz do espectro). Para simplicidade da simulação, foi usado o padrão OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) de ondas do protocolo 802.11a com os mesmos parâmetros da camada física. Nos experimentos, foram utilizados os protocolos TCP e UDP para o fluxo de dados entre os nós.

Os resultados mostraram que a vazão de dados do sistema aumenta com um aumento no número do fluxo na rede, em redes de um *hop*. Isso acontece, pois o b-SMART tenta maximizar o uso do espectro disponível. Portanto, ele é capaz de sustentar um grande número de fluxos paralelos quando existem mais fluxos na rede. O aumento na vazão é mais gradual depois de certo número de fluxos, pois o b-SMART é capaz de utilizar a largura de banda disponível quase que totalmente. No caso de uma rede encadeada, o total da vazão alcançada pelo b-SMART estabiliza depois de dois saltos.

4.4 Problema de Configuração da Rede

De acordo com Kondareddy *et al.* (2008) depois da fase de detecção do espectro, todo Usuário Cognitivo têm uma lista de canais livres. A lista de canais livres pode diferir de um Usuário Cognitivo para outro e dois Usuários Cognitivos podem comunicar se houver um canal comum nas listas de canal livres deles. Considerando que o espectro novo é compartilhado entre um grupo de usuários independentes, é fundamental a existência de um modo para controlar e coordenar o acesso ao espectro de frequência. Isto pode ser alcançado utilizando-se uma estrutura centralizada de controle ou por uma aproximação cooperativa e distribuída. Em uma arquitetura centralizada, uma única entidade, chamada Estação Base, controla o uso do espectro por Usuários Cognitivos, segundo Xin & Shen (2005). A Estação Base coleta a lista de canais livres de cada usuário detectando todo o seu domínio ou integrando os dados individuais coletados dos Usuários Cognitivos. A Estação mantém um banco de dados de toda a informação coletada. Quando dois Usuários Cognitivos quiserem começar uma sessão, eles pedem a distribuição de um canal à Estação Base.

A Estação Base olha na lista de canais livres de todos os Usuários Cognitivos em seu banco de dados e escolhe um canal que está comum a ambos. O banco de dados tem que ser atualizado regularmente, pois a lista de canais livres mudará com o tráfego de dados entre os Usuários Primários. As negociações entre a Estação Base e os Usuários Cognitivos normalmente são assumidas de modo que ocorram em um canal de controle dedicado, segundo Akyildiz *et al.* (2006). Intuitivamente, um canal dedicado separado para sinais de controle parece uma solução simples. Mas um Canal de Controle Comum dedicado e fixo tem várias desvantagens como discutido por Zhao *et al.* (2005). Primeiramente, um canal dedicado para sinais de controle significa um

desperdício de recursos. Em segundo lugar, um canal de controle iria saturar com o aumento de usuários semelhantes em uma rede *multi-hop* como discutido por So & Vaidya (2004). Em terceiro lugar, um adversário pode incapacitar o canal de controle dedicado inundando-o intencionalmente. Este ataque é conhecido como Negação de Serviço (DoS – *Denial Of Service*) segundo Bian & Park (2006). Assim, foi sugerido por Zhao *et al.* (2005), escolher um dos canais livres como o canal de controle. Quando o Usuário Primário do canal escolhido retorna, um novo canal de controle é escolhido. Mas nada foi mencionado nos trabalhos recentemente desenvolvidos sobre como irão ocorrer os primeiros contatos entre os Usuários Cognitivos e a Estação Base e como esses usuários serão informados pela primeira vez sobre o canal de controle escolhido. Esse trabalho define esse problema como o problema de Configuração de Rede.

Segundo Kondareddy *et al.* (2008), no segundo tipo de arquitetura de rede, que é um cenário distribuído, os Usuários Cognitivos têm que coordenar cooperativamente para coexistirem e acessarem os canais livres. A informação detectada por um Usuário Cognitivo deve ser compartilhada com outros usuários na rede para habilitar certas tarefas essenciais como a descoberta de rota em uma Rede de Rádio Cognitivo. Como cada Usuário Cognitivo tem canais múltiplos para escolher, uma Rede de Rádio Cognitivo distribuída é uma rede multi-canal e *multi-hop* com um canal dinâmico fixo para cada usuário. Em uma rede multi-canal, uma informação de controle como a escolha do canal de comunicação é negociada em um canal de controle comum pré-definido. Novamente, dedicar um canal de controle para a rede inteira não é uma boa ideia e escolher um canal livre como o canal de controle poderia não funcionar porque o canal escolhido poderia não ser livre para todos os usuários. A maioria dos trabalhos recentes estudou protocolos de Controle de Acesso ao Meio que evitam um canal de controle comum, mas nenhum deles focalizou em como irá realizar a configuração inicial da rede (Problema de Configuração da Rede). Por exemplo,

como um Usuário Cognitivo contataria outro Usuário Cognitivo antes de começar qualquer transmissão?

O trabalho de Kondareddy *et al.* (2008) propõe um modo determinístico e outro probabilístico de um Usuário Cognitivo detectar os canais livres e conectar a Estação Base. Os mecanismos propostos também são estendidos a um cenário de *multi-hop* no qual um Usuário Cognitivo procura outro Usuário Cognitivo.

Para realizar a Configuração de uma Rede de Rádio Cognitivo, os usuários têm que contatar a Estação Base e notificá-la sobre suas presenças. Um Usuário Cognitivo só pode comunicar com a Estação Base se eles transmitirem e receberem no mesmo canal. Desde que eles tenham uma lista de canais, eles podem comunicar só se eles possuírem ao menos um canal comum nas suas respectivas Lista de Canais Livres. Mas, como nenhum dos Usuários Cognitivos tem qualquer informação sobre os canais livres da Estação Base e não há nenhum canal de controle dedicado, é fundamental a existência de um protocolo para os Usuários Cognitivos procurarem a Estação Base para realizar a configuração da rede. Em um cenário prático, pode haver muitos mais canais na Lista de Canais Livres de cada usuário tornando a situação mais complicada. Isto é chamado o Problema de Configuração de Rede (PCR). O PCR em um cenário centralizado representa os seguintes problemas:

- Quem deve iniciar a transmissão no processo de detecção: a Estação Base ou o Usuário Cognitivo?
- Em qual canal o Usuário Cognitivo ou a Estação Base deve iniciar a transmissão?
- Quanto tempo os Usuários Cognitivos devem gastar na detecção?

Um problema semelhante surge no caso de um cenário de *multi-hop* em qual não há nenhuma estação Base. Neste caso os Usuários Cognitivos têm que identificar os seus vizinhos para formar uma Rede de Rádio Cognitivo *multi-hop*

e as mesmas perguntas se aplicam para cada par de Usuários Cognitivos. O PCR acontece devido à ausência de um Canal de Controle Comum (CCC). Assim o Problema de Configuração de Rede é uma parte de um problema maior, que é o problema do CCC.

Em seu trabalho, Kondareddy *et al.* (2008) propõe três diferentes mecanismos para resolver o PCR. Os protocolos definem um procedimento de busca e detecção para a Estação Base e para os Usuários Cognitivos de forma que eles possam iniciar uma Rede de Rádio Cognitivo. As seguintes considerações devem ser levadas em questão:

- Um Usuário Cognitivo é capaz de trocar a sua frequência de operação. Um Usuário Cognitivo simples é equipado com um Rádio Cognitivo e pode detectar um canal a uma taxa de máxima **Rcu** de canais por segundo.
- Uma Estação Base Cognitiva é equipada ao menos com dois Rádios Cognitivos. É uma vantagem adicionada se for assumido que uma Estação Base é capaz de detectar os canais mais rapidamente que um Usuário Cognitivo a uma taxa **Rcbs**. Contudo, a falta desta suposição não afeta o funcionamento do protocolo de qualquer maneira.
- A Taxa de Tráfego de Usuário Primário (TTUP): É definida como a taxa comum à qual o usuário primário muda seu estado (ativo/inativo). Este é um fator importante porque a disponibilidade de canal é relacionada diretamente a TTUP. Um TTUP mais alto significa que a disponibilidade de canal que cada Usuário Cognitivo possui, flutua a uma taxa mais alta.
- Número de canais (N): O espectro no qual os Usuários Cognitivos podem operar é dividido em um número fixo de canais **N**. É importante notar que **N** pode variar de dezenas a milhares de canais. Embora os

protocolos propostos não dependam do valor de N , por conveniência de representação, será escolhido um N muito pequeno.

Kondareddy *et al.* (2008) definem os seguintes protocolos em seu trabalho:

Protocolo Exaustivo (PE) - Os canais são procurados da menor para a maior frequência pela Estação Base e por Usuários Cognitivos. A Estação Base é responsável pela tarefa de emitir sinais de início de conexão devido à sua infraestrutura superior em termos de hardware e de energia. É assumido que o tráfego dos usuários primários não varia em um ciclo de busca. Em uma arquitetura centralizada, a Estação Base mantém um temporizador que conta os **TS** segundos. Inicialmente começa sua busca do canal com menor frequência e inicia seu temporizador de **TS**. Desloca então, para o canal seguinte quando o temporizador expira. Em cada fatia de tempo, a estação verifica a presença de usuários primários no canal. Se o canal não está livre, a Estação Base desloca imediatamente ao canal seguinte e reinicia o temporizador. Se o canal está livre, um sinal de início de conexão é emitido indicando sua presença nesse canal. A estação aguarda uma resposta pelo resto da fatia de tempo até que o temporizador de **TS** expirar e desloca-se então ao próximo canal e inicia seu temporizador outra vez. Se uma resposta é recebida de um Usuário Cognitivo, um segundo rádio cognitivo da estação irá continuar as negociações com o usuário e a estação contínua sua busca por outros potenciais usuários. Depois que todos os canais são procurados, reiniciará da menor frequência outra vez.

Se todos os canais de N estivessem livres, a Estação Base levaria $N \times TS$ segundos para terminar um ciclo de busca em todos os canais. Cada Usuário Cognitivo mantém um temporizador da espera **TW** que é ajustado a $N \times TS$. Inicialmente parte do canal com menor frequência e faz a varredura por disponibilidade até o canal de maior frequência. Se o canal não está livre,

desloca ao canal seguinte e reinicia seu temporizador. Se o canal está livre, espera um sinal de início de conexão da Estação Base até que o temporizador **TW** expire.

Como a Estação Base procurará todos os canais ao menos uma vez em **TW** segundos, o Usuário Cognitivo pode ter certeza que irá receber um sinal de início de conexão se o canal que esteja escutando está livre para a Estação Base. Em uma arquitetura *multi-hop* não há nenhuma Estação Base e os Usuários Cognitivos têm que procurar um pelo outro. Assim, o protocolo é modificado de tal modo que um Usuário Cognitivo esperará os sinais de início de conexão se a rede já está iniciada, senão, iniciará a rede emitindo sinais de início de conexão para os outros Usuários Cognitivos. Para saber se a rede está iniciada ou não, um Usuário Cognitivo tem que certificar-se que não é o primeiro usuário na rede. Assim esperará um sinal de início de conexão em cada canal por **TW** segundos. O ciclo termina em $N^2 \times TS$ segundos. Se receber um sinal de início de conexão, reconhece-o e compartilha a informação do canal. Se não recebe um sinal de início de conexão, considera-se o primeiro Usuário Cognitivo na rede e começa emitir sinais de início de conexão como a Estação Base faz na arquitetura centralizada. Este protocolo garante que um Usuário Cognitivo poderá contatar a Estação Base, quando estiver em um cenário centralizado, no pior caso de $N^2 \times TS$ segundos se existe canal livre comum entre a Estação Base e o Usuário Cognitivo. Assim, essa é uma solução determinística e foi visto nos testes que, na maioria das vezes, o tempo de busca é muito menor no cenário de pior caso.

Protocolo Randômico (PR) - Diferentemente da abordagem determinista (Protocolo PE), esta é uma abordagem probabilística. Este protocolo é útil em situações onde o número de canais **N** não é conhecido com precisão. Em um cenário centralizado, a Estação Base faz as mesmas tarefas básicas do Protocolo PE, exceto que os canais são escolhidos aleatoriamente. O primeiro canal é escolhido aleatoriamente e será mapeado por disponibilidade.

Se o canal não estiver livre, outro canal é escolhido aleatoriamente e o temporizador TS é reiniciado. Se estiver disponível, um sinal de início de conexão é enviado a Estação Base e ele aguarda uma resposta até que o temporizador expire. A Estação Base continuará escolhendo um dos C canais aleatoriamente. Há pouca diferença nas tarefas do Usuário Cognitivo desse protocolo das tarefas de um Usuário Cognitivo no Protocolo PE. A primeira diferença é que os canais são escolhidos aleatoriamente. Há mais uma variável que o Usuário Cognitivo mantém que é o número de Locais de Espera, WS . O temporizador de espera, TW está agora definido para $WS \times TS$, em vez de $N \times TS$ como no caso do Protocolo PE. Se o Usuário Cognitivo não receber um sinal de início de conexão, irá escolher um canal diferente. A mudança de canal é necessária porque, se o Usuário Cognitivo espera no mesmo canal continuamente à espera de um sinal de início de conexão e supondo que o canal escolhido não está disponível para a estação base, então o usuário não receberia nunca um sinal de início de conexão. Se o usuário recebe um sinal de início de conexão, responde a ele e negocia as informações sobre o canal. O valor do WS é escolhido estrategicamente dependendo da variedade de canais que o Usuário Cognitivo é capaz de detectar, C . Em $WS \times TS$ segundos, a Estação Base teria, pelo menos, procurado WS canais. Se todos os canais estiverem livres, a probabilidade de que o usuário receba um sinal de início de conexão em um de seus tempo de espera é $Pr = 1 - (1 - 1/C)^{TE}$. A probabilidade real depende da probabilidade de ser um canal livre tanto para a Base Estação quanto para o Usuário Cognitivo. Em um cenário *multi-hop*, todos os Usuários Cognitivos vão seguir exatamente as mesmas regras que eles seguiriam em um cenário centralizado e, adicionalmente, enviarão sinais de início de conexão a cada TS segundos. Além disso, o parâmetro de Locais de Espera, WS é escolhido aleatoriamente a partir de um intervalo pré-definido de números. Isso faz com que cada Usuário Cognitivo busque os canais a uma taxa diferente, que emula o

cenário centralizado. Ao contrário do Protocolo PE, um Usuário Cognitivo não pode esperar por um período de tempo especificado para um sinal de início de conexão e ele será o primeiro usuário se ele não receber um sinal de início de conexão. Isto se deve ao acaso, pois não é possível definir um período de tempo máximo durante o qual a Estação Base teria verificado todos os canais, pelo menos uma vez. Assim, quando um Usuário Cognitivo quer iniciar ou entrar em uma rede, ele escolhe um WS aleatório e um canal aleatório em que envia sinais de início de conexão a cada TS segundos. Após a recepção bem sucedida de um sinal de início de conexão por qualquer Usuário Cognitivo, reconhece e troca as informações sobre canal com o remetente.

Protocolo Sequencial (PS) - Este protocolo é uma versão modificada do Protocolo PE para torná-lo mais adequado a uma rede *multi-hop*. Assim, o cenário *multi-hop* é explicado em primeiro lugar e, em seguida, estendido para o cenário centralizado. Neste protocolo, o número total de canais N , é assumido ser conhecido. Cenário *multi-hop*: O intervalo de tempo, TS é escolhido semelhante a outros protocolos. Os Usuários Cognitivos iniciam em um canal aleatório. O próximo canal é escolhido segundo a ordem crescente de frequências. Após o último canal ser atingido, o próximo canal é escolhido em ordem decrescente de frequências e não em ordem crescente novamente. Se o canal escolhido não está disponível o Usuário Cognitivo muda para o próximo canal. Se o canal está disponível, ele permanece por um período de TS segundos nesse canal e envia um sinal de início de conexão durante esse período. Se ele recebe um ACK (*Acknowledge*), então um Usuário Cognitivo vizinho recebeu seu sinal de início, portanto eles trocam informações de controle. A mesma coisa acontece se o usuário recebe um sinal de início de conexão. Devido à simetria nas funções cognitivas do usuário, este protocolo é mais adequado para uma rede *multi-hop*. Em um cenário centralizado, a única diferença é que o Usuário

Cognitivo não envia sinais de início de conexão, ele apenas escuta em seu canal escolhido e espera por um sinal de início de conexão.

Os protocolos foram verificados e os resultados foram analisados pelos autores através de simulações no MATLAB. Observou-se que o Protocolo PE é muito eficiente em um cenário centralizado, O protocolo PS é mais adequado para uma rede *multi-hop*. Porém, o Protocolo PS não pode ser usado quando o número exato de canais possíveis não é conhecido. O Protocolo PR é útil em ambas as situações e, além disso, tem ótimo desempenho em comparação com os Protocolos PE e PS. A Figura 10 mostra a comparação do tempo de busca que cada protocolo gastou a medida que o número de canais aumentava. Apesar do tempo de busca do protocolo PR ser um pouco maior, ele apresenta bons resultados em qualquer tipo de cenário, tornando-o assim o melhor protocolo entre os apresentados.

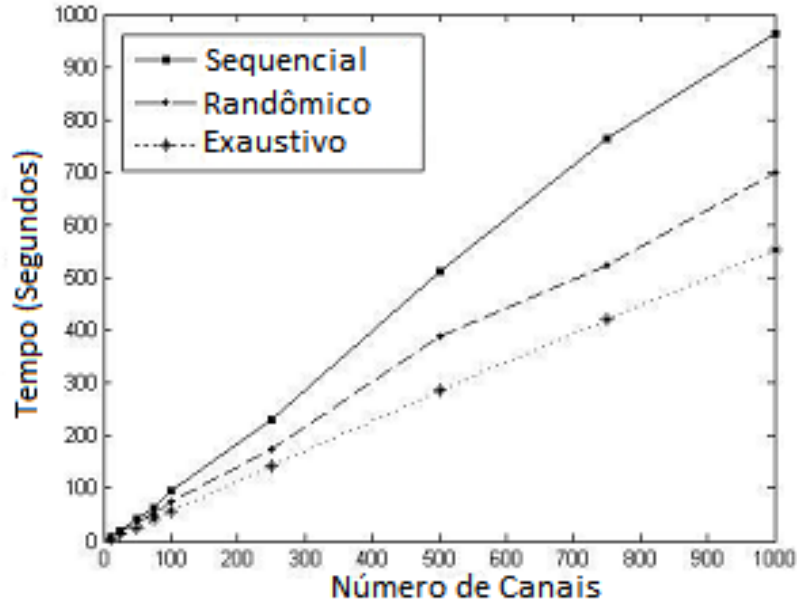


Figura 10 – Comparação dos Protocolos. Fonte: Kondareddy *et al.* (2008).

4.5 Problema do Canal de Controle Comum

Segundo Kondareddy *et al.* (2008), dois usuários em uma Rede de Rádio Cognitivo estão conectados se eles tiverem um canal comum para comunicação. É possível que cada usuário tenha mais de um canal disponível. Nesse caso, o remetente e o receptor precisam concordar em um canal comum de comunicação que esteja disponível a ambos. O *handshake* inicial que serve para negociar a escolha de um canal comum é chamado de sinal de controle. Mas tais negociações requerem uma comunicação em cima de um canal de sinalização comum. Isto é chamado de Problema do Canal de Controle Comum (PCCC).

4.6 Arquiteturas Existentes

Algumas arquiteturas foram desenvolvidas visando um padrão para as redes cognitivas. Alguns exemplos das principais arquiteturas, além da arquitetura definida pelo protocolo IEEE 802.22 já apresentado neste trabalho, representantes das chamadas redes da próxima geração (*NeXt Generation Networks*) são descritos abaixo:

Spectrum pooling: Como descrito em Weiss *et al.* (2003, 2004), uma arquitetura centralizada de compartilhamento do espectro é proposta com base na multiplexação por divisão de frequência ortogonal (OFDM). Esta arquitetura consiste de uma Estação Base e Usuários Cognitivos. A detecção de usuários licenciados é realizada através de detecção de quadros que são periodicamente transmitidos pela estação base. Durante os quadros de detecção, os usuários móveis realizam a detecção do espectro. As informações da detecção são então reunidas na Estação Base. Terminais móveis modulam um complexo símbolo na

máxima potência nas sub-portadoras, onde um usuário licenciado aparece. Através desta operação, a estação base recebe um sinal amplificado em todas as sub-portadoras com novos usuários licenciados. Problemas nas camadas Física e da camada MAC, como a detecção de acesso de espectro, sincronização e *handoff* estão ainda em aberta nessa arquitetura.

CORVUS: No trabalho de Brodersen *et al.* (2004) e Cabric *et al.* (2005), uma abordagem cognitiva para o sistema de espectro virtual licenciado (CORVUS) é apresentado para explorar bandas licenciadas desocupadas. No CORVUS, com base na detecção local do espectro, a detecção de usuário primário e a alocação de espectro são executadas de forma coordenada. Este esforço cooperativo aumenta a capacidade do sistema de identificar e evitar interferência com os utilizadores primários. No CORVUS, um grupo de usuários forma um grupo secundário (SUG) para coordenarem a sua comunicação. Cada membro deste grupo detecta o compartilhamento do espectro, o qual é dividido em sub-canais. Um canal de controle universal é utilizado por todos os grupos de coordenação e canais de controle separado do grupo são usados pelos membros de um grupo para troca de informação de detecção e para estabelecer conexões entre os usuários secundários. O desempenho das camadas de ligação física é avaliado no trabalho de Nishra *et al.* (2005). Além disso, recentemente, um protocolo de manutenção confiável de conexão é proposto junto ao CORVUS para manter a qualidade de comunicação entre usuário secundários, segundo Willkomm *et al.* (2005). A ideia do sistema CORVUS é ilustrada na Figura 11.

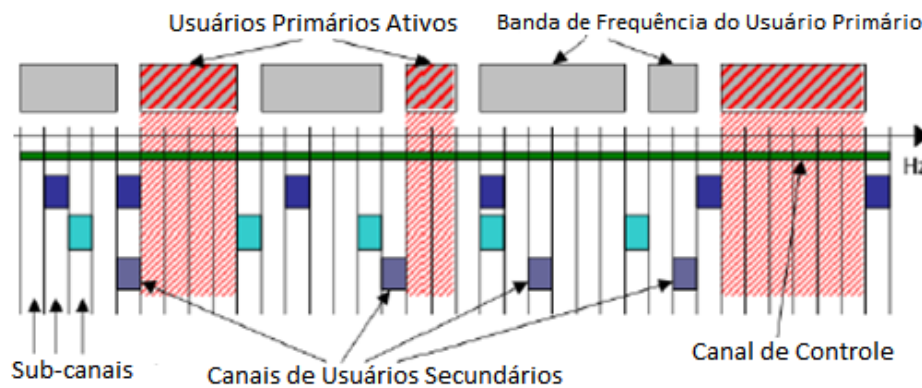


Figura 11 – A Arquitetura CORVUS. Fonte: Brodersen *et al.* (2004).

DIMSUMnet: A gestão dinamicamente inteligente do espectro para rede móvel ubíqua (DIMSUMnet), apresentado no trabalho de Buddhikot *et al.* (2005), implementa o acesso estatisticamente multiplexado (SMA) ao espectro na banda de acesso coordenado (CAB). Enquanto o CAB melhora a eficiência e o *fairness* de acesso ao espectro, o SMA está focado em melhorar a utilização do espectro. O CAB é um bloco contíguo de espectro reservado pelas autoridades reguladoras. Um *spectrum broker* (regulador do espectro) possui o CAB permanentemente e "aluga-o" de acordo com pedidos. O DIMSUMnet visa melhorar significativamente a utilização do espectro, reduzindo a complexidade e os requisitos de agilidade dos sistemas implantados. Trabalhos recentes centram-se em funções de determinação e alocação do espectro para entidades reguladoras de espectro, segundo Buddhikot & Ryan (2005).

DRiVE/OverDRiVE: o projeto *European Dynamic Radio for IP Services in Vehicular Environments* (DRiVE) centra-se na atribuição do espectro dinâmico em redes heterogêneas, assumindo um canal de coordenação comum, apresentado no trabalho de Xu *et al.* (2000). A continuação do projeto, *Spectrum Efficient Uni- and Multicast Over Dynamic Radio Networks in Vehicular Environments* (OverDRiVE) visa melhorias no UMTS (*Universal Message*

Transmission System) e coordenação de redes de rádio existentes em uma rede híbrida para garantir o fornecimento eficiente do espectro em serviços móveis de multimídia, segundo Grandblaise *et al.* (2002). Dois aspectos da atribuição do espectro dinâmico foram investigadas no projeto DRiVE/OverDRiVE, ou seja, a atribuição temporal dinâmica do espectro (DSA), e o DSA espacial, segundo Leaves *et al.* (2004). No caso da DSA temporal, uma rede pode usar o espectro que não está sendo usado atualmente por outras redes naquele momento. Por outro lado, o DSA espacial permite a alocação de espectro para se adaptar às flutuações regionais na demanda de tráfego. A eficácia destes esquemas DSA depende da capacidade de prever a carga de tráfego. Embora esses projetos têm mostrado um potencial significativo para o aumento da eficiência espectral, a implementação do sistema reconfigurável para DSA's temporais e DSA's espaciais ainda é um grande desafio.

Nautilus: o Nautilus foi projetado para enfatizar o compartilhamento coordenado e distribuído do espectro sem depender de um controle centralizado, segundo a descrição do projeto Nautilus em seu *website* oficial (www.cs.ucsb.edu/~htzheng/cognitive/nautilus.html). No projeto Nautilus, um *framework* distribuído de coordenação, escalável e eficiente para redes *ad hoc* de espectro aberto, é proposto, visando a heterogeneidade do espectro à medida que não se baseia na existência de um canal comum pré-definido para o controle de tráfego, segundo Zheng & Peng (2005) e Zheng & Cao (2005). Com base neste *framework*, três diferentes sistemas colaborativos de acesso ao espectro são apresentados. No trabalho de Zheng & Peng (2005), um esquema de acesso ao espectro baseado em grafos é proposto, onde um algoritmo otimizado de atribuição é utilizado para uma topologia fixa. Em redes móveis, no entanto, a topologia da rede muda, devido à mobilidade do nó. Utilizando esta abordagem de otimização global, a rede precisa recalcular completamente a atribuição de espectro para todos os usuários após cada mudança, resultando em alto custo

computacional e sobrecarga de comunicação. Assim, a atribuição do espectro distribuído com base no local de negociação é proposto em Cao & Zheng (2005), onde os usuários móveis negociam a atribuição de frequências dentro de grupos organizados localmente. Para redes de recursos limitados, tais como redes de sensores e redes *ad hoc*, uma gestão do espectro baseada em regras é proposta, onde usuários não licenciados acessam o espectro de forma independente de acordo com as observações locais e com regras pré-determinadas. Atualmente, este projeto centra-se em selecionar o melhor canal para a transmissão de dados através de um *framework* distribuído de coordenação.

OCRA: Em Akyildiz & Li (2006), uma Rede de Rádio Cognitivo baseada em OFDM (OCRA) é proposta. A rede OCRA considera todos os cenários possíveis de implantação sob o ambiente de redes cognitivas heterogêneas e desenvolve operações *cross-layer* para acesso dinâmico ao espectro baseado em OFDM. Para a decisão e alocação do espectro, a rede OCRA cria um novo conceito de gestão do espectro baseada em OFDM sob o ambiente heterogêneo do espectro. Com base na estrutura da camada física (PHY), um *framework* de modo duplo de compartilhamento do espectro é proposto, o qual permite o acesso às redes existentes, bem como a coordenação entre os usuários cognitivos. Além disso, um novo paradigma de roteamento que considera uma conexão de re-encaminhamento e alocação do espectro é proposto. A rede OCRA introduz várias técnicas de transporte multi-espectro para explorar o espectro sem fio disponível, porém não contíguo, para comunicação de alta qualidade. No trabalho de Akyildiz & Li (2006), o projeto experimental para avaliação e integração da rede OCRA é proposto. A avaliação do OCRA é baseada no protocolo IEEE 802.11a/g, que explora a tecnologia OFDM. Além disso, uma unidade autônoma de sensoriamento cognitivo é

desenvolvida para emular a capacidade de detecção do espectro presente nos rádios cognitivos.

A Tabela 2 mostra um comparativo entre as arquiteturas levando em consideração o estado de desenvolvimento atual, se existe alguma aplicação desenvolvida a partir dessa arquitetura e qual o modelo do Canal de Controle utilizado.

Tabela 2 – Comparação entre as arquiteturas.

Arquitetura	Em Desenvolvimento	Aplicação	Canal de Controle
Spectrum Pooling	Sim	Não	Fixo
CORVUS	Sim	Sim	Dinâmico
DIMSUMnet	Sim	Sim	Fixo
DRiVE/overDRiVE	Sim	Sim	Fixo
Nautilus	Sim	Não	Dinâmico
OCRA	Sim	Não	Dinâmico

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

As Redes de Rádio Cognitivo estão sendo desenvolvidas para resolver os atuais problemas resultantes do espectro limitado e reduzido e à ineficiência na utilização do espectro através da exploração oportunista do espectro sem fio existente. Essas redes, equipadas com as capacidades intrínsecas do rádio cognitivo, irão fornecer um novo paradigma de comunicação sem fio. Neste trabalho, essas propriedades e os desafios para a pesquisa atual das Redes de Rádio Cognitivo foram apresentados. Além disso, novas funcionalidades de gestão do espectro, como a detecção de espectro, análise de espectro, a decisão do espectro, bem como a mobilidade do espectro são introduzidos.

Um dos maiores obstáculos na área de pesquisa se deve a uma questão mais política do que técnica. As redes da nova geração irão utilizar faixas de frequência que atualmente são alocadas estaticamente para serviços específicos, como o espectro TV (principalmente), espectro de transmissão de dispositivos móveis, entre outras. As empresas e operadoras que possuem licença das frequências que seriam vizinhas dos rádios 802.22 não aprovaram a ideia por acharem que essa utilização oportunista do espectro irá inviabilizar os meios de comunicação abertos.

Um dos grupos que mais tem combatido a ideia do protocolo 802.22 nos EUA é o das emissoras de TV de sinal aberto, pois é exatamente na faixa de frequências livres das emissoras que os primeiros trabalhos estão sendo focados.

A questão principal é um dos maiores problemas da área de pesquisa: Como alegar com certeza que um equipamento 802.22 está ocupando uma frequência livre? E se esse mecanismo de verificação falhar? E se o equipamento

possuir um problema técnico e começar a gerar interferências nas faixas de frequência reservadas?

Como em qualquer outro país, os meios de comunicação (principalmente a TV) possuem muita força nos EUA, o que seria suficiente para demolir a idéia do uso oportunista do espectro de frequência. No entanto várias empresas multinacionais fortemente presentes no cenário mundial, além de inúmeras universidades ilustres são a favor da liberalização do uso dessas frequências, entre elas: Google, Microsoft, Intel e Dell (entre outras) representando o lado comercial e o *Georgia Institute of Technology*, a *Rutgers University WINLAB*, a *University of Kansas*, a *Carnegie Mellon University* (entre inúmeras outras universidades americanas, além de universidades no mundo inteiro) representando o meio acadêmico.

O FCC, que regula as telecomunicações nos EUA, já se mostrou favorável à idéia da liberalização dessas frequências livres desde que seja provado que existe uma tecnologia que permita o uso dessas frequências de maneira segura, sem causar interferências nos sistemas primários.

Algumas pesquisas já saíram do papel e passaram a protótipos como em um teste militar realizado pela DARPA, em Novembro de 2009. Os resultados foram bastante satisfatórios e aceleraram o ritmo da pesquisa. A previsão é que os primeiros equipamentos para uso militar devam ser produzidos até final do ano de 2010. Isso mostra um grande avanço na área e se as previsões forem concluídas, os equipamentos não devem demorar muito a chegar ao meio comercial.

O grupo de trabalho do IEEE 802.22 está propondo não apenas uma, mas várias soluções que, em conjunto, iriam garantir a segurança da comunicação. Assim o grupo do IEEE 802.22 está trabalhando ativamente para tentar solucionar os problemas citados ao longo do trabalho. O Google e a Microsoft já fizeram demonstrações de protótipos provando que a tecnologia

funciona e a associação que representa os interesses das emissoras de TV já fizeram demonstrações provando que a tecnologia não vai funcionar em todos os casos.

As técnicas apresentadas nesse trabalho, fruto de pesquisas recentes de pesquisadores do mundo inteiro, mostraram-se, embora simples, muito eficientes. A tecnologia 802.22, apresentada nesse trabalho mostra-se muito promissora. Além disso, o apoio de órgãos importantes como o Departamento de Defesa Americano e o FCC mostram que essa tecnologia tem realmente um grande potencial. O rápido desenvolvimento das pesquisas garantiu alguns protótipos e demonstrações em menos de cinco anos, o que indica um grande avanço e a viabilidade das soluções propostas até hoje. Apesar disso, vários problemas ainda não foram resolvidos, e isso pode se tornar um empecilho para a produção de uma versão comercial que seja totalmente confiável.

As soluções propostas por Yuan *et al* (2008) para o Problema de Configuração da Rede são simples porém eficientes e são de grande importância para a solução do problema maior, que é o Canal de Controle Comum.

As arquiteturas citadas ao longo desse trabalho mostram as diferentes abordagens para tratar o desenvolvimento do Rádio Cognitivo. Algumas optaram por usar um Canal de Controle fixo, apesar da inviabilidade dessa opção. No entanto, essas arquiteturas foram desenvolvidas para finalidades diferentes, focando em problemas específicos, portanto, o impacto dessa decisão não é tão grande como seria em uma arquitetura mais genérica.

Muitos pesquisadores estão atualmente envolvidos no desenvolvimento de tecnologias de comunicação e protocolos necessários para as Redes de Rádio Cognitivo. No entanto, para garantir uma comunicação eficiente, é necessária uma maior investigação ao longo das linhas apresentadas neste estudo.

5.2 Trabalhos Futuros

Os trabalhos futuros compreendem em uma maior investigação nas arquiteturas já existentes, citadas nesse trabalho, comparando-as e apontar as principais diferenças, vantagens e desvantagens de cada uma, assim como os problemas que cada uma terá que resolver e a viabilidade de cada projeto existente.

Será também proposto o desenvolvimento de novas soluções dentre os problemas citados, como por exemplo, o problema do Canal de Controle Comum.

Também, será feita uma comparação das chamadas Redes de Rádio Cognitivo com todas as outras redes classificadas como Redes de Próxima Geração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKYILDIZ, I. F., LEE, WON-YEOL, **OCRA: OFDM-based cognitive radio networks**. Broadband and Wireless Networking Laboratory Technical Report, Março 2006.

AKYILDIZ, I. F., LEE, WON-YEOL, VURAN, M. C., & MOHANTY S., **A Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks**. IEEE Communications Magazine, Vol. 46, Issue 4, pp. 40-48, Abril 2008.

AKYILDIZ, I. F., LEE, WON-YEOL, VURAN, M. C., & MOHANTY S., **NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey**. Computer Networks Journal, Vol. 50, pp. 2127-2159, Setembro 2006.

BIAN, K. & PARK, J.-M., **MAC-layer misbehaviors in multi-hop cognitive radio networks**. 2006 US - Korea Conference on Science, Technology, and entrepreneurship (UKC2006), Vol. 3, No. 2, pp.115–122, Agosto 2006.

BRODERSEN, R.W., WOLISZ, A., CABRIC, D., MISHRA, S.M., WILLKOMM, D., **Corvus: a cognitive radio approach for usage of virtual unlicensed spectrum**. Berkeley Wireless Research Center (BWRC) White paper, Vol. 6, pp. 44-49, Agosto 2004.

BUDDHIKOT, M.M. & RYAN, K., **Spectrum management in coordinated dynamic spectrum access based cellular networks**. IEEE DySPAN 2005, Vol. 10 pp. 299-307, Novembro 2005.

BUDDHIKOT, M.M., KOLODY, P., MILLER, S., RYAN, K., EVANS, J., **DIMSUNet: new directions in wireless networking using coordinated dynamic spectrum access.** IEEE WoWMoM 2005, Vol. 11, pp. 78–85, Junho 2005.

CABRIC, D., MISHRA, S.M., WILLKOMM, D., BRODERSEN, R., WOLISZ, A., **A Cognitive radio approach for usage of virtual unlicensed spectrum.** 14th IST Mobile and Wireless Communications Summit, Vol. 4, pp. 523-531, Junho 2005.

CAO, L. & ZHENG, H., **Distributed spectrum allocation via local bargaining.** IEEE Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON) 2005, Vol. 13 pp. 2127-2159, Setembro 2005.

CHALLAPALI, K., CORDEIRO, C., BIRRU, D., **Evolution of spectrum-agile cognitive radios: first wireless internet standard and beyond.** 2nd annual international workshop on Wireless internet, Vol. 7 pp. 49-55, Agosto 2006.

CORDEIRO, C., CHALLAPALI, K. & GHOSH, M. **Cognitive PHY and MAC layers for dynamic spectrum access and sharing of TV bands.** ACM TAPAS, Vol4. pp. 600–610, Agosto. 2006.

CORDEIRO, C., CHALLAPALI, K., BIRRU & SHANKAR., **IEEE 802.22: An Introduction to the First Wireless Standard based on Cognitive Radios.** Journal of Communications, Vol.1 pp. 38-47, Abril 2006.

FCC. **Notice of proposed rule making and order. ET Docket No. 03-322**, Acessao em Setembro 2009. Disponível em (http://hraunfoss.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-03-322A1.pdf)

FCC. **Spectrum policy task force report. ET Docket No. 02-135**, Acessado em Setembro 2009. Disponível em (<http://www.fcc.gov/sptf/files/E&UWGFfinalReport.pdf>)

GRANDBLAISE, D., BOURSE, D., MOESSNER, K., LEAVES, P., **Dynamic spectrum allocation (DSA) and reconfigurability**. Software-Defined Radio (SDR) Forum, Vol. 2 pp. 53-57, Novembro 2002.

GUMMALLA, A. C. V. & LIMB, J. O., **Wireless medium access control protocols**. IEEE Communications Surveys and Tutorials, Vol. 2 pp. 942–947, Setembro. 2000.

HAYKIN, S., **Cognitive radio: brain-empowered wireless communications**. IEEE J-SAC , Vol. 23, pp. 201-220, Fevereiro 2005.

IDA Singapore. Acessado em Setembro 2009. Disponível em (<http://www.ida.gov.sg/>).

IEEE 802.22 draft standard. **IEEE P802.22 Wireless Regional Area Networks – Requirements**. Acessado em Junho de 2009. Disponível em (<http://www.ieee802.org/22/>).

IEEE 802.22 working **group on wireless regional area networks**. Acessado em Junho de 2009. Disponível em (<http://www.ieee802.org/22/>).

IMEC Reserach Center. Acessado em Outubro de 2009. Disponível em (<http://www.imec.be/>).

JUNG, C. F., Metodologia para pesquisa & desenvolvimento aplicada a novas tecnologias, produtos e processos, Rio de Janeiro: Axcel Books, 2004.

KIM, H. & SHIN, K. G., In-band Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks: Energy Detection or Feature Detection? MobiCom'08, Vol. 5 pp. 1813-1827, Setembro 2008.

KONDAREDDY, Y. R., AGRAWAL, P., SIVALINGAM, K., Cognitive Radio Network setup without a Common Control Channel. Military Communications Conference, MILCOM 2008. IEEE , Vol. 5, pp.1-6, 16-19 Novembro 2008.

LEAVES, P., MOESSNER, K., TAFAZOLI, R., GRANDBLAISE, D., BOURSE, D., TONJES, R., BREVEGLIERI, M., Dynamic spectrum allocation in composite reconfigurable wireless networks. IEEE Comm. Magazine, Vol. 42 pp.49-55, Maio 2004.

LEONARDO, J, ELVIO & AILTON, A. SHINODA, Revisão de Protocolos de Acesso ao Meio em Redes Ad-Hoc Sem Fio. Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, Agosto 2004.

MITOLA J. III, & MAGUIRE, G.Q. JR., Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal, IEEE Personal Communications, Vol. 6 pp.13-18 Setembro 1999.

Nautilus Project Website. Acessado em Setembro de 2009. Disponível em (www.cs.ucsb.edu/~htzheng/cognitive/nautilus.html).

NISHRA, S. M., CABRIC, D., CHANG, C., WILLKOMM, D., SCHEWICK, B., WOLISZ, A., BRODERSEN, R. W., **A real time cognitive radio testbed for physical and link layer experiments.** IEEE DySPAN 2005, Vol. 6 pp.539-547, Novembro 2005.

REED, J. & BOSTIAN, W., **Understanding the Issues in Software Defined Cognitive Radio,** Vol. 9 pp. 611-614, Prentice Hall, 2006.

SO, J. & VAIDYA, N., **Multi-Channel MAC for Ad Hoc Networks: Handling Multi-Channel Hidden Terminals Using A Single Transceiver,** Vol.5 pp. 1039–1048, ACM MobiHoc 2004.

TANDRA, R. & SAHAI, A., **Fundamental limits on detection in low SNR under noise uncertainty.** WirelessCom 2005, Vol. 9 pp. 464–469, Junho 2005.

WEISS, T. A., HILLENBRAND, J., KROHN, A., JONDRAL, F. K., **Efficient signaling of spectral resources in spectrum pooling systems.** 10th Symposium on Communications and Vehicular Technology (SCVT), Vol. 6 pp. 341-356, Novembro 2003.

WILLKOMM, D., GROSS, J., WOLISZ, A., **Reliable link maintenance in cognitive radio systems.** IEEE DySPAN 2005, Vol. 45 pp. 271–280, Novembro 2005.

XIN, C. XIN & SHEN, C., **Novel Layered Graph Model for Topology Formation and Routing in Dynamic Spectrum Access Networks.** 1st IEEE International Symposium on New Frontiers in DynaSpectrum Access Networks (DySPAN), Vol 8. 355-360, Novembre 2005.

XU, L., TONJES, R., PAILA, T., HANSMANN, W., FRANK, M., ALBRECHT, M., **DRiVE-ing to the internet: dynamic radio for ip services in vehicular environments.** 25th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks, Vol. 58 pp. 125-130, Novembre 2000.

YUAN, Y., BAHL, P., CHANDRA, R., MOSCIBRODA, T., NARLANKA, S., & WU, Y., **Allocating Dynamic Time-Spectrum Blocks in Cognitive Radio Networks.** ACM MobiHoc, Vol. 13 pp. 151-153, Settembre 2007.

ZHAO, J., ZHENG, H., YANG, G.-H., **Distributed coordination in dynamic spectrum allocation networks.** IEEE DySPAN 2005, Vol. 18 pp. 259-268, Novembre 2005.

ZHENG , H. & PENG, C., **Collaboration and fairness in opportunistic spectrum Access.** IEEE ICC 2005, Vol. 5 pp. 219-225, Maio 2005.

ZHENG, H. & CAO, L., **Device-centric spectrum management.** IEEE DySPAN 2005, Vol. 65 pp.1102-1119, Novembre 2005.