



**UNILASALLE**  
**CENTRO UNIVERSITÁRIO LA SALLE**



Curso de Bacharelado em Ciência da Computação

TAÍS AMÉRICO ALMEIDA

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DO SENSORIAMENTO DE ESPECTRO EM REDES  
DE RÁDIOS COGNITIVOS**

Canoas, 2010

TAÍS AMÉRICO ALMEIDA

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DO SENSORIAMENTO DE ESPECTRO EM REDES  
DE RÁDIOS COGNITIVOS**

Trabalho de conclusão apresentado para a banca examinadora do curso de Ciência da Computação, da Universidade UNILASALLE como exigência parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. MSc. Rafael Kunst

Canoas, 2010.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por ter me dado forças para não desanimar e saúde para continuar lutando por um futuro melhor.

A toda minha família, principalmente aos meus pais, Jones e Clair, e meu namorado Rodrigo pelo apoio, compreensão e incentivo.

Aos meus amigos, colegas e professores do Unilasalle. Em especial para o Tonismar Bernardo, um colega que hoje é um grande amigo.

Aline Xavier e Fernanda Tondo minhas amigas, ou melhor, irmãs de coração pela paciência e compreensão.

Ao meu orientador Rafael Kunst que me auxiliou e me apoiou no desenvolvimento deste trabalho. Ao professor Diogo Scolari pelas dicas de matemática.

Enfim, agradeço a todos vocês que colaboraram de forma direta ou indireta para que este trabalho pudesse ser concluído. Obrigada pela atenção, paciência e pelo tempo a mim dedicado.

“(...) Leve na sua memória,  
para o resto da vida,  
como nas coisas boas que surgiram  
dificuldades.  
Serão elas uma prova de sua capacidade,  
e lhe darão confiança diante de qualquer  
obstáculo. (...)”  
(Chico Xavier)

## RESUMO

Estudos têm mostrado que vastas porções do espectro licenciado são subutilizadas. Nos Estados Unidos da América (EUA) pesquisas mostram que 85% do espectro está livre em determinados instantes de tempo. Para permitir uma melhor utilização dessas frequências foi proposto o conceito de rádio cognitivo (RC), no qual os usuários secundários (sem licença) têm permissão para transmitir e receber dados sobre partes licenciadas do espectro quando os usuários primários (licenciados) estão inativos. Este trabalho apresenta uma análise do desempenho da técnica de detecção de energia, mais especificamente a técnica *multitaper*, para resolução do problema de sensoriamento de espectro em redes rádio cognitivo. O algoritmo foi implementado na ferramenta MATLAB e os resultados foram obtidos através de simulações.

Palavras-chave: Sensoriamento espectral. Redes rádio cognitivo. *Multitaper*.

## **ABSTRACT**

Studies have shown that vast portions of licensed spectrum are underutilized. In the United States of America (USA) research shows that 85% of the spectrum is free in certain instant of time. To make better use of these frequencies was proposed the concept of cognitive radio, where the secondary users (unlicensed) are allowed to transmit and receive data over portions of the spectrum when the licensed primary users (licensees) are inactive. This paper presents a performance analysis technique for the detection of energy, more specifically multitaper technique for solving the problem of spectrum sensing in cognitive radio networks. The algorithm was implemented in MATLAB tool and the results were obtained through simulations.

Keywords: Spectral Sensing. Cognitive Radio Networks. Multitaper

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Módulos de um sistema rádio cognitivo. ....	12
Figura 2. Funcionalidades das camadas relacionadas ao sensoriamento espectral. ....	14
Figura 3. Funcionamento do Espectro em Redes Rádio Cognitivo .....	25
Figura 4. Tipos de acesso Redes Rádio Cognitivo.....	26
Figure 5. Modelagem da Ferramenta de Simulação. ....	27
Figura 6. Probabilidade Ocupação do Canal.....	29
Figura 7. Probabilidade de Falso Positivo .....	30

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA EM RÁDIO COGNITIVO .....</b>	<b>11</b>
<b>2.1 Sensoriamento Espectral .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2. Técnicas de Sensoriamento Espectral .....</b>	<b>15</b>
2.2.1 <i>Filtragem casada</i> .....	15
2.2.2 <i>Detecção de energia</i> .....	16
2.2.3 <i>Detecção de características cicloestacionárias</i> .....	17
<b>2.3 Aplicações de Redes Cognitivas .....</b>	<b>18</b>
<b>3 TRABALHOS RELACIONADOS .....</b>	<b>22</b>
<b>4 MODELAGEM DA FERRAMENTA E RESULTADOS .....</b>	<b>25</b>
4.1 Algoritmo <i>Multitaper</i> .....	27
4.2 Simulação e Resultados .....	29
<b>5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>32</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>34</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a tecnologia de rádio cognitivo tem recebido grande interesse na área de pesquisas. Esse interesse deve-se ao fato de que tais dispositivos podem representar uma solução eficiente para o problema da má utilização do espectro de frequências existente atualmente. As agências regulamentadoras dividem o espectro de frequências em faixas licenciadas e não-licenciadas. No espectro licenciado, as faixas de frequência são licenciadas por algum órgão e só podem operar nas frequências alocadas para as mesmas. Já no espectro não licenciado há liberdade para o uso comum das frequências. (AKYILDIZ et al. 2006; FREITAS et. al. 2008)

Com o aumento do número de usuários utilizando o espectro, a tecnologia de rádios cognitivos tem como objetivo diminuir a sobrecarga nas faixas de espectros não licenciadas. O sensoriamento de espectro é um dos aspectos mais importantes para atingir esse objetivo, pois ele visa detectar as faixas livres e/ou subutilizadas dos espectros, onde será baseada a rede de rádio cognitivo. Além disso, ele deve alocar essas faixas evitando causar interferências nos usuários licenciados.

Muitos trabalhos foram publicados a respeito de rádios cognitivos. Diversas soluções foram encontradas na literatura para o problema sensoriamento de espectro, dentre elas as principais são: detecção de energia (JEON et al. 2008; PARTHAPRATIM, LIANG, YING-CHANG, 2008; ZENG, LIANG, YING-CHANG, 2009), teoria de jogos (NIYATO, HOSSAIN, HAN, 2009; LEE, WON, AKYILDIZ, 2009), matriz de covariância (ZEN, LIANG, 2009) e modelos probabilísticos utilizando cadeias de Markov (JEON et al. 2008).

Considerando as abordagens atuais da literatura, o principal objetivo deste trabalho é analisar, modelar e simular o problema de sensoriamento de espectro nas redes de rádios cognitivos. O método de detecção de energia - *multitaper* foi escolhido pelo seu baixo custo e simplicidade de implementação. Os resultados obtidos durante as simulações são utilizados para analisar eficiência do desempenho do algoritmo escolhido e também quantificar o espectro ocioso.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica sobre rádios cognitivos, técnicas e aplicações do sensoriamento espectral. No Capítulo 3 apresenta os trabalhos relacionados com o

sensoriamento em redes de rádios cognitivos. O Capítulo 4 aborda a modelagem da ferramenta de simulação e o software utilizado para o desenvolvimento deste trabalho. No Capítulo 5, são apresentados os resultados obtidos com as simulações e, finalmente, o capítulo 6 apresenta a conclusão e os trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA EM RÁDIO COGNITIVO

Como forma de buscar o equilíbrio entre confiabilidade de comunicação e o aumento do número de usuários utilizando o espectro, foi proposta a tecnologia denominada rádio cognitivo. Os sistemas de rádio baseados em cognição são caracterizados pela flexibilidade dos rádios, que podem adaptar de forma autônoma seus parâmetros de funcionamento. (MENEZES, 2007)

Existem dois tipos de acesso ao espectro: licenciado e não licenciado. No espectro licenciado as faixas de frequência são licenciadas pelas autoridades competentes para diferentes atividades e tecnologias. Cada nova tecnologia que utiliza comunicação por rádio só pode operar nas frequências alocadas para a mesma. Essa alocação é feita pelos órgãos reguladores de cada país, como a *Federal Communications Commission* (FCC), nos Estados Unidos, ou a Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel), no Brasil. Por outro lado, no acesso ao espectro não-licenciado há liberdade para o uso comum das frequências. Essas frequências são chamadas de *Industrial, Scientific and Medical* (ISM) (AKYILDIZ et al. 2006; FREITAS et al. 2008).

A maior parte das frequências apresenta-se no espectro licenciado. Os dispositivos de uma determinada tecnologia podem operar nas frequências que adquirem uma licença de uso daquela parte do espectro naquela região. Entretanto, em uma determinada região podem não estar utilizando a faixa licenciada no momento, ou estes dispositivos quando presentes podem ocupar o espectro apenas esporadicamente. Enquanto isso, as faixas de frequências não-licenciadas, sem custo, tornam-se cada vez mais ocupadas, fazendo com que os dispositivos sem fio sofram com a limitação de capacidade e os problemas de interferência (SILVA et al. 2008).

Nota-se que não há consenso na literatura em definir formalmente o rádio cognitivo. O que se tem é uma interpretação para cada contexto de aplicação. No entanto, verifica-se em todas as abordagens a intenção de aparelhar os sistemas de rádio para medir e controlar, buscando: (MENEZES, 2007)

- Identificar e utilizar faixas de frequências disponíveis;
- Medir a potência do sinal desejado, assim como das interferências;
- Reconhecer e operar em diferentes redes;

- Controlar a potência de transmissão;
- Estar a par da padronização de acesso ao espectro no local de operação.

Os rádios cognitivos implementam avanços significativos na utilização das faixas de frequência, principalmente para usuários não licenciados. Os usuários podem adaptar suas características como frequência de operação, largura de banda, potência de transmissão ou modulação, para aprimorar seu desempenho, visando alcançar a capacidade requerida pelas aplicações de seus usuários (SILVA et al. 2008; FREITAS et al., 2008). Essa adaptação é tipicamente realizada através de software, chamado de *Software Defined Radio* (SDR) (STEVENSON et al., 2009).

Sendo assim, através da implementação do conceito de SDR, os rádios cognitivos possibilitam o compartilhamento do espectro entre os usuários licenciados e não licenciados. Entretanto, há necessidade de definição de mecanismos para coordenação do compartilhamento espectral. Este é um dos problemas em aberto nas redes de rádios cognitivos: quando duas ou mais redes cognitivas operam na mesma região, o compartilhamento espectral alcançado afeta diretamente o seu desempenho (AKYILDIZ et al., 2006).

Para suportar tais capacidades, o rádio cognitivo apresenta quatro principais módulos, os quais são: sensoriamento, gerenciamento, mobilidade e compartilhamento espectral [Freitas et. al. 2008].



Figura 1. Módulos de um sistema rádio cognitivo.

Fonte: Freitas et al. 2008.

Cada módulo possui funcionalidades específicas, por exemplo: o sensoriamento espectral tem por responsabilidade detectar espectros vazios e compartilhá-los, sem causar interferências em outros usuários. O gerenciamento espectral provê o meio para determinar, em tempo real, a melhor banda e a melhor frequência para fornecer os serviços desejados pelos usuários. A mobilidade

espectral é responsável por manter a comunicação do usuário durante a transição para o melhor espectro. Enquanto que o compartilhamento espectral busca prover um método de escalonamento de espectro justo entre os usuários co-existentes (FREITAS et al., 2008). O foco deste trabalho é o sensoriamento espectral.

## 2.1 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 rádio frequência (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 (KUMMAR, SHIN, 2007).

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 (*Physical Layer* - PHY) e de controle de acesso ao meio (*Media Access Control* - MAC), conforme ilustrado na Figura 2.

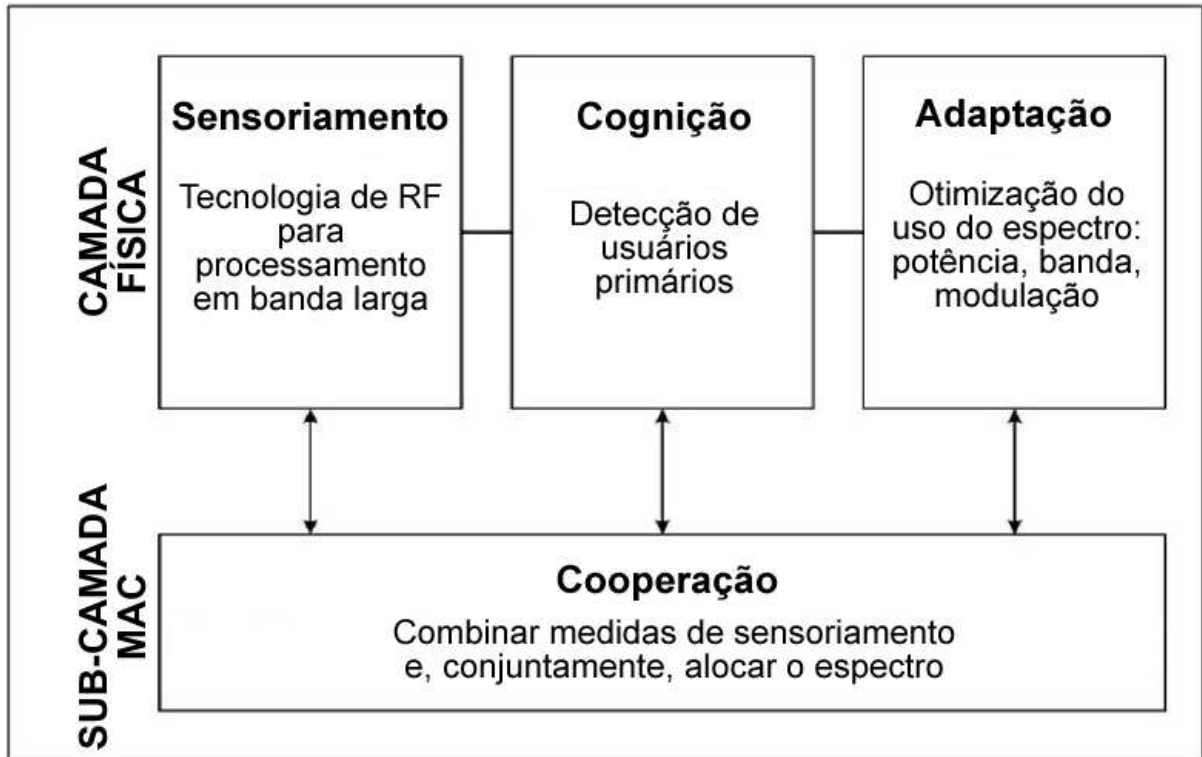


Figura 2. Funcionalidades das camadas relacionadas ao sensoriamento espectral  
Fonte: Cabric et al. 2004.

Classes diferentes de usuários primários podem requerer níveis de sensibilidade e taxas de sensoriamento distintos para sua detecção. Por exemplo, sinais de difusão de televisão (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 (CABRIC et al., 2004).

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 (CABRIC et al., 2004). 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 (GHASEMI, SOUSA, 2005).

## **2.2 Técnicas de Sensoriamento Espectral**

O rádio cognitivo deve distinguir faixas do espectro que estão livres e que estão 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.

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: filtragem casada, detecção de energia e detecção de características cicloestacionárias (GHASEMI, SOUSA, 2008).

### *2.2.1 Filtragem casada*

A forma ótima para a detecção de sinais em ruído estacionário gaussiano é a utilização de filtros casados (PROAKIS, 2001). 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.

A principal vantagem da utilização de filtros casados para sensoriamento espectral é que ele requer menos tempo de observação para atingir certo nível de sensibilidade (TANDRA, SAHAI, 2005). 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 *Wireless Regional Area Network* (WRAN) (CORDEIRO et al., 2005, IEEE802 2010).

### 2.2.2 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 (TANDRA, SAHAI, 2004). Entretanto, seu baixo custo de implementação e simplicidade tornam essa abordagem um candidato favorável para o sensoriamento espectral em redes cognitivas.

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 (TANDRA, SAHAI, 2004).

*Multitaper* é uma das técnicas utilizadas dentro de detecção de energia. As análises espectrais e o uso de uma só janela (*taper*) em uma série temporal reduz muito a influência, devido ao vazamento espectral no estimador espectral. Entretanto, ele também reduz o tamanho da amostra e causa perda de informação [Jenkins, Watts 1968]. (THOMSON, 1982) introduziu a idéia de usar múltiplas janelas para recuperar a informação perdida enquanto a influência devido ao vazamento espectral é mantida aceitável. O método é conhecido como Método de Múltiplas Janelas (MJM), ou em inglês *Multiple Taper Method*.



O MJM usa janelas ortogonais para obter, aproximadamente, estimativas independentes do espectro de potência e então unir-las para produzirem uma estimativa. Essa estimativa exibe mais graus de liberdade e permite deduzir facilmente a quantificação da influência do vazamento e a variância *TRADE-OFFS*, comparado a análise convencional de *Fourier*. O MJM tem a habilidade para detectar pequenas oscilações de amplitudes em uma curta série temporal sem a necessidade de filtrar o sinal. Ele também tem internamente uma estatística, F-teste (distribuição F), para obter o nível de significância da periodicidade encontrada. (THOMSON, 1990)

O parâmetro que controla o compromisso entre baixa variância e baixa influência de vazamento é o produto entre tempo e comprimento de banda (NJ – número de janelas). Isto é um parâmetro de resolução diretamente relacionado ao número de janelas usado para calcular o espectro. Com o aumento de NJ, existe uma maior estimativa da potência espectral e uma diminuição da variância. Entretanto, o comprimento da banda de cada janela é também proporcional ao NJ. Assim, com o aumento de NJ cada estimativa exibe mais vazamento espectral (picos largos) e a estimativa espectral total é mais influenciável. Para cada conjunto de dados um valor específico de NJ necessita ser usado (THOMSON 1982 e 1990).

### 2.2.3 Detecção de características cicloestacionárias

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 (GARDNER, 1988).

Esses sinais são caracterizados pela cicloestacionariedade, dado que sua média e autocorrelação exibem periodicidade.

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 (GHASEMI, SOUSA, 2005). 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 (CORDEIRO et al., 2005). Entretanto, é computacionalmente complexo e requer um tempo de observação significativamente longo.

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.

### 2.3 Aplicações de Redes Cognitivas

As redes cognitivas são um novo paradigma em comunicações sem fio, que tendem a disponibilizar melhores serviços para diversos tipos de mercado. Os rádios cognitivos, que integram essas redes, podem perceber o ambiente de propagação, aprender padrões e adaptarem seus parâmetros para atender os requisitos imediatos do usuário, da rede e do ambiente de rádio (YING-CHANG et al., 2008). Dentre as várias áreas de aplicações das redes de rádios cognitivos, podem ser citadas (AKYILDIZ et al., 2006).

- **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 (STINE, 2005). 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 (AKYILDIZ et al., 2006). 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 (KYASANUR,

2005). 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 (KYASANUR, 2005). 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 (GHASEMI, SOUSA, 2005). 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; (AKYILDIZ et al., 2006)

- 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; (GHASEMI, SOUSA, 2005)

- 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 (BALL, FERGUSON, 2005). 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 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: (SOUZA et. al., 2010).

- 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. Outra solução seria o estabelecimento de duas redes, uma das quais, restrita a um número reduzido de apresentadores e usuários prioritários. (SOUZA et. al., 2010).

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. (SOUZA et. al., 2010).

### 3 TRABALHOS RELACIONADOS

A comparação com outros trabalhos relacionados à pesquisa é importante para dar sustentabilidade ao estudo proposto. Em vista disso, este capítulo relata trabalhos relacionados a área de redes de rádios cognitivos.

Dentre eles (GHASEMI, SOUSA, 2008), destaca-se por apresentar um tipo de detecção de sinal coerente para o início de implantações de rádio cognitivo onde o sistema secundário é limitado a operar em algumas bandas primárias. Uma alternativa mais simples para a detecção de um primeiro sinal de ruído é o emprego de detecção de energia. Um detector de energia simplesmente mede a energia recebida em uma faixa primária durante um intervalo de observação e declara um espaço em branco se a energia for inferior a um limiar pré-definido. Já vem sendo estudada a utilização de espaços livres no espectro para utilização de serviços como, por exemplo, para faixas de frequência de TVs que a cada ano vêm crescendo com sua utilização no espectro.

Conforme (ZHANG, 2006), a principal vantagem de se usar OFDM em relação às técnicas que utilizam uma única portadora é que ela pode obter a mesma taxa de transferência, devido ao paralelismo de subportadoras de taxas baixas. Em um sistema de portadora única, um sinal interferente, por exemplo, pode fazer um enlace inteiro falhar, mas em um sistema com multiportadoras, como o OFDM, somente uma pequena porcentagem das subportadoras é afetada.

O autor também destaca a possibilidade de se utilizar OFDM para distribuir a transmissão dos dados entre as faixas de frequências licenciadas. Porém, há o inconveniente de se utilizar várias faixas licenciadas ao invés de uma, como o preenchimento de cada uma das faixas com as restrições regulamentares do espectro. Além disso, a atribuição de períodos de detecção para as faixas de frequência reduz a eficácia para os usuários cognitivos.

Já em (ZEN, LIANG, 2009), são propostos algoritmos para o sensoriamento espectral com base em amostras no cálculo da matriz de covariância para limitação do número de amostras de sinais recebidos. Duas estatísticas de testes são extraídas da amostra da matriz de covariância. A decisão sobre a presença do sinal se faz através da comparação de duas estatísticas de testes.

Existem alguns trabalhos recentes que têm abordado a resolução do problema de compartilhamento espectral em redes cognitivas utilizando teoria de jogos. Em (NIYATO, HOSSAIN, HAN, 2009) e (LEE, WON, AKYILDIZ, 2009) os autores consideram que a solução para este jogo é dada pelo Equilíbrio de Nash. São utilizadas as melhores respostas dos jogadores para obter o equilíbrio de Nash. Esta melhor resposta de um jogador é definida como a sua melhor estratégia, dentre as estratégias dos outros jogadores.

O problema de compartilhamento do espectro entre usuários primários (licenciados) e múltiplos usuários secundários (não licenciados) formula uma concorrência de mercado e utiliza um jogo não-cooperativo para obter a alocação de espectro para usuários secundários. Equilíbrio de Nash é considerado uma solução para este jogo, pois em primeiro lugar apresenta a formulação de um jogo estático para o caso em que todos os usuários secundários tenham a informação atual das estratégias adotadas em torno do outro. Entretanto, esta suposição pode não ser realista em alguns sistemas rádio cognitivo.

Portanto, o autor considera o caso de racionalidade limitada em que os usuários secundários gradualmente e interativamente ajustem as suas estratégias baseadas nas observações sobre as estratégias anteriores. A velocidade de adaptação das estratégias é controlada pela taxa de aprendizagem. A condição de estabilidade do comportamento dinâmico para este regime de compartilhamento do espectro está sendo estudada. O autor propõe um esquema para o compartilhamento competitivo do espectro baseado em teoria de jogos para redes radio cognitivo afim de usuários primários e múltiplos usuários secundários compartilhem o mesmo espectro de frequência. No entanto, o equilíbrio de Nash fornece uma solução justa para o compartilhamento do espectro.

Além disso, há outras abordagens encontradas na literatura: (STEVENSON et al., 2009)

- *Localização*: um rádio cognitivo deve ser capaz de determinar sua localização e de outros dispositivos transmissores e selecionar os parâmetros de operação apropriados de acordo com essas informações. Em frequências como aquelas usadas para recepção de satélites, que são somente receptoras e não transmitem sinal, técnicas de localização podem solucionar o problema da interferência, já que

somente o sensoriamento não permite a localização de dispositivos receptores próximos.

- *Seleção Dinâmica de Freqüência*: um rádio cognitivo deve ser capaz de mudar sua freqüência de operação, baseado nas informações recolhidas no sensoriamento do espectro. A decisão quanto às mudanças pode utilizar sensoriamento do espectro, monitoramento da posição geográfica, entre outros fatores.
- *Modulação Adaptativa*: técnicas de modulação adaptativa podem modificar características e formas de onda de transmissão para melhorar o acesso ao espectro e minimizar interferências com outros usuários não licenciados ou licenciados. Um rádio cognitivo pode também selecionar um tipo de modulação da transmissão para permitir interoperabilidade entre sistemas diferentes.
- *Controle de Potência de Transmissão*: Controlar a potência de transmissão dinamicamente durante a transmissão de dados permite um dispositivo utilizar os limites máximos apenas quando necessário, em geral reduzindo a potência para permitir o compartilhamento do espectro interferindo minimamente na comunicação dos outros dispositivos no meio.

Levando em consideração as abordagens citadas acima, a escolha pela técnica do tipo detecção de energia – *multitaper* deu-se por ser um dos métodos mais citados na literatura. Além disso, considera-se a implementação mais simples e eficaz.



#### 4 MODELAGEM DA FERRAMENTA E RESULTADOS

O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de analisar, modelar e simular o problema de sensoriamento de espectro nas redes rádios cognitivos utilizando o algoritmo *multitaper*.

A Figura 3 mostra o funcionamento do espectro em redes rádio cognitivo: cada usuário primário tem o direito sobre a frequência e, portanto, tem prioridade. Entretanto, quando há espaços em branco (*white spaces*) os usuários secundários podem utilizar temporariamente a frequência do usuário primário. Por exemplo, a Figura 3 mostra o usuário com rádio cognitivo (1) transmitindo. Quando ele percebe a presença do usuário primário A ele pula para outra frequência (2) e continua transmitindo. Novamente, quando ele percebe a presença do usuário primário C ele pula para outra faixa de frequência livre (3).

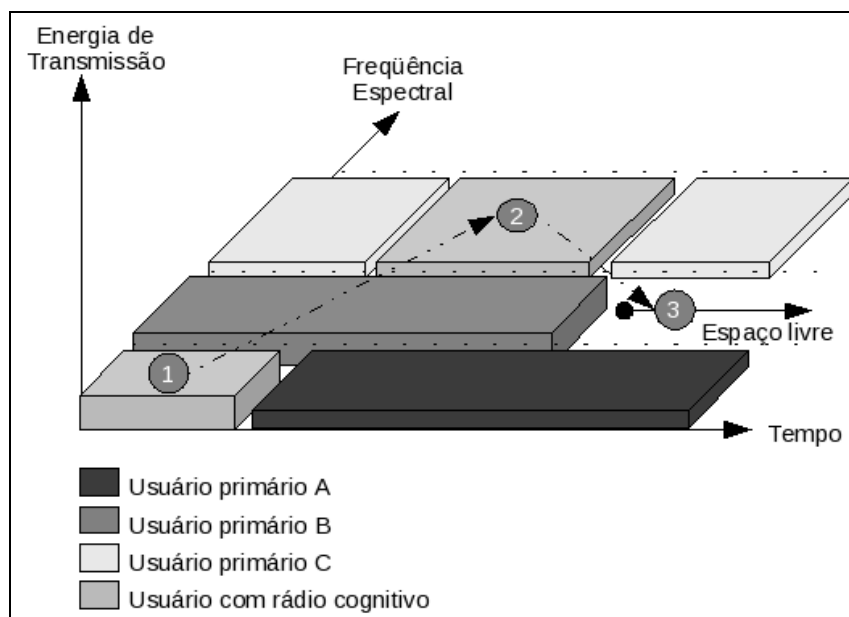


Figura 3. Funcionamento do Espectro em Redes Rádio Cognitivo

Fonte: Autoria Própria 2010

A Figura 4 mostra os três tipos de acessos diferentes que os usuários de rede rádio cognitivo podem ter: [Akyildiz et. al. 2008b]

- acesso a rede rádio cognitivo: usuários rádio cognitivos podem acessar sua própria estação base rádio cognitivo, em ambas bandas de espectro licenciado e não licenciado. Todas as interações ocorrem dentro da rede

de rádio cognitivo e a sua política de compartilhamento do espectro pode ser independente da rede primária.

- acesso *ad hoc* rádio cognitivo: usuários rádio cognitivo podem se comunicar com outros usuários rádio cognitivo através de uma conexão *ad hoc* em ambas as bandas de espectro licenciado e não licenciado.
- acesso a rede primária: os usuários rádio cognitivo também podem acessar a estação base primária através da banda licenciada. Ao contrário de outros tipos de acesso, usuários rádio cognitivo exigem um controle de acesso ao meio adaptativo (protocolo MAC), que permite *roaming* em múltiplas redes primárias com diferentes tecnologias de acesso.

As simulações serão realizadas baseadas no primeiro tipo de acesso à rede rádio cognitivo, ou seja, usuários rádio cognitivo podem acessar sua própria estação base rádio cognitivo em ambas as bandas de espectro licenciada e não licenciada.

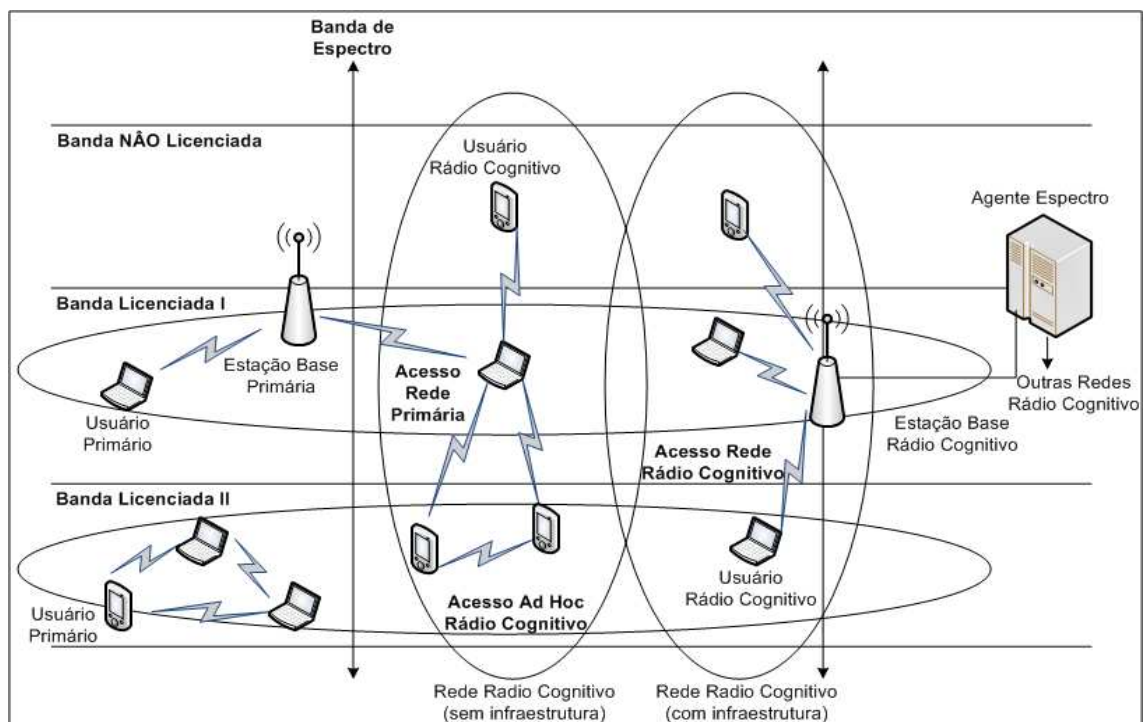


Figura 4. Tipos de acesso Redes Rádio Cognitivo

Fonte: Akyildiz et. al. 2008b

A Figura 5 mostra as camadas e a modelagem que será utilizada neste trabalho. O foco do estudo é trabalhar com a camada física e camada de enlace, a fim de simular o comportamento da técnica de *multitaper* para sensoriamento do espectro. Na modelagem, a tomada de decisão será o módulo que poderá receber

qualquer algoritmo, tendo em vista que a implementação da ferramenta de simulação será modularizada.

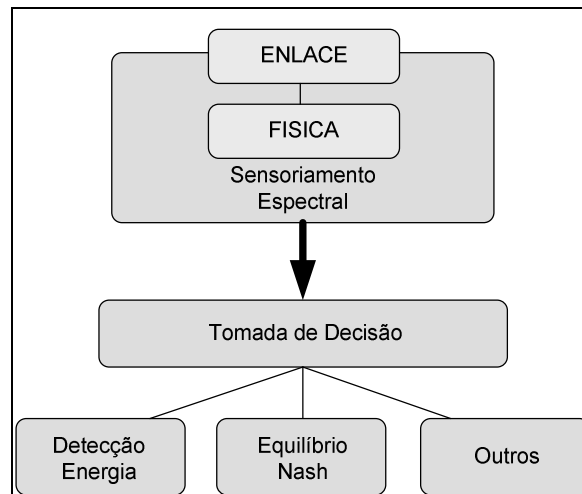


Figure 5. Modelagem da Ferramenta de Simulação.  
Fonte: Autoria própria, 2010.

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 (GHASEMI, 2008). 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 (CORDEIRO et. al., 2005; IEEE 802 2010). 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.

#### 4.1 Algoritmo *Multitaper*

O algoritmo *multitaper* foi iniciado por Thomson (THOMSON, 1982) e mostra-se eficiente para o procedimento de estimação espectral. Em linhas gerais, este algoritmo expande parte do tempo em séries. Estas seqüências são conhecidas

como seqüências Slepian (SLEPIAN, 1978). Onde  $f$ , é a freqüência central do sinal e  $2W$  é sua largura de banda. Estas seqüências possuem as propriedades da Transformada de *Fourier*, onde pode ser utilizada para reduzir a variância da estimativa do espectro sem comprometer a sua parcialidade. Este método pode ser formalmente descrito como segue. [SENSOR NETWORK FOR DYNAMIC AND COGNITIVE RADIO ACCESS, 2010]

Para um dado vetor recebido  $\{y_k\}_{k=0}^N$  de tamanho  $N$ , é necessário determinar as seguintes entidades: [SENSOR NETWORK FOR DYNAMIC AND COGNITIVE RADIO ACCESS, 2010]

- 1 – Uma seqüência ortonormal de janelas  $L$  Slepian denotado por  $\{w_k^{(l)}\}_{k=0}^N$
- 2 – O eingspectra associado definido pela Transformada de *Fourier*

$$W_l(f) = \sum w_k^{(l)} y_k e^{-j2\pi kf}; l = 0, 1, \dots, L-1.$$

A concentração da distribuição de energia do eingspectra estão dentro de uma largura de banda de resolução  $2W$ . Os graus de liberdade disponíveis para o controle de variância da estimação do espectro são indicados pelo produto tempo largura definido como:

$$p = 2NW$$

O *tradeoff* entre a resolução espectral e a variância é regulado pela escolha dos parâmetros  $p$  e  $L$ . Com base na eingspectra podemos definir uma estimativa espectral da seguinte forma:

$$\hat{S}(f) = \frac{\sum \lambda_l(f) |W_l(f)|^2}{\sum \lambda_l(f)},$$

onde  $\lambda_l(f)$  é o autovalor associado ao eingspectrum  $l$ -th.

## 4.2 Simulação e Resultados

Para realizar a simulação do espectro de frequência, baseado em RC, foi utilizado o software MATLAB (*MATrix LABoratory*) para implementação do algoritmo com base no trabalho de Berner R. W. (THOMSON, 1982; PERCIVAL et al. 1993). O cenário utilizado durante as simulações foram semelhantes aos encontrados na literatura (NIVATO et. al. 2009; ZENG, LIANG, 2009), conforme mostra a tabela 1.

Faixa frequência TV Digital	1 a 3 GHz
Largura de Banda	$\leq 5$ MHz
<i>Threshold</i>	-116 dbm
Intervalo de Confiança	95%

Tabela 1: Cenário proposto

Fonte: Autoria própria 2010

A Figura 6 mostra a probabilidade de utilização do espectro pelo usuário primário da rede de rádio cognitivo, de acordo com a densidade espectral percebida. Com isso, estuda-se a probabilidade de detecção do usuário primário por parte de um usuário cognitivo.

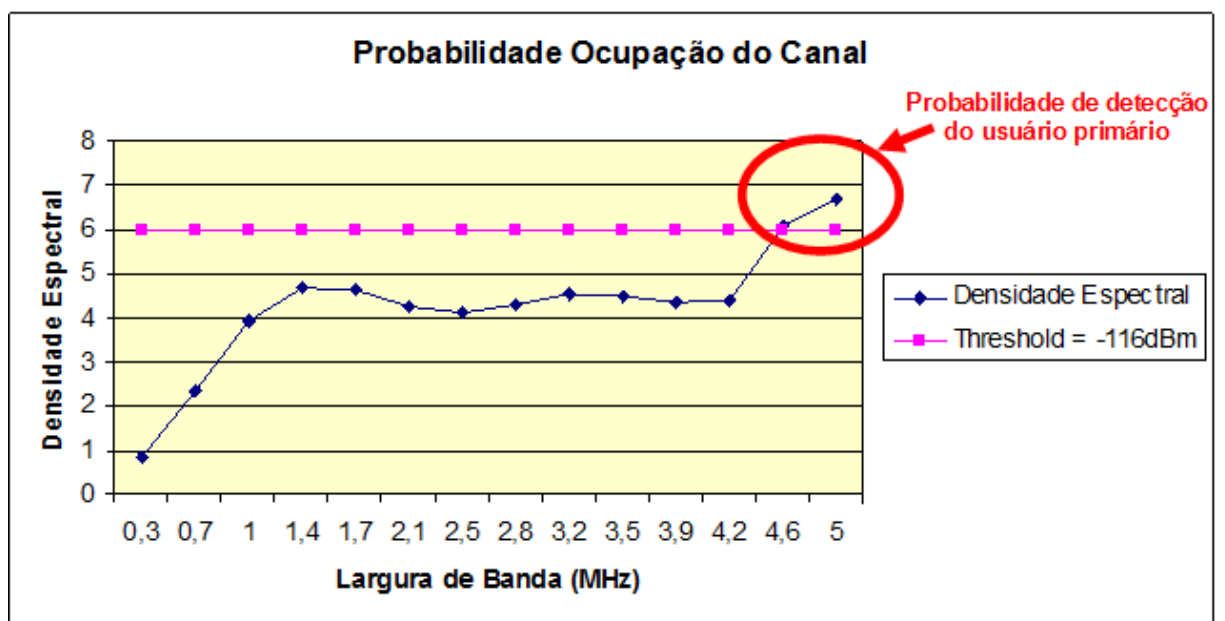


Figura 6. Probabilidade Ocupação do Canal

Fonte: Autoria Própria 2010

No gráfico apresentado na figura 6, observa-se que dentre os pontos coletados 85,7% é a probabilidade de detecção de frequência livre em uma determinada faixa. Tendo a faixa de frequência de 1 a 3 GHz e a largura de banda variável de acordo com a faixa de frequência considerada, traçou-se um *threshold* de -116dbm para delimitar as faixas de espectros que aparecem ociosas neste intervalo de tempo. As amostras para cada ponto foram analisadas e em 85,7% dos casos, os valores aparecem abaixo do *threshold*, assim sendo, existe a probabilidade de o canal estar livre nesses casos. Por outro lado, em 14,3 % dos casos, o valor está acima do *threshold*, ou seja, é provável que o canal esteja sendo utilizado naquele instante de tempo. Esta porcentagem é semelhante à indicada nas literaturas pesquisadas (NIVATO et al. 2009; ZENG, LIANG, 2009). Tendo em vista que os trabalhos utilizados como base (IEEE802 2010; ZENG, LIANG, 2009) utilizam medições realísticas para obter essas estatísticas, o algoritmo *multitaper* mostrou-se muito eficiente para o objetivo proposto.

O gráfico apresentado na Figura 7 mostra a probabilidade de ocorrência de falso positivos na decisão do usuário cognitivo em relação à ocupação de uma determinada faixa de frequência. Essa medida é muito importante, pois permite mensurar a probabilidade de que um usuário cognitivo interfira na transmissão de um usuário primário, considerando o algoritmo analisado.

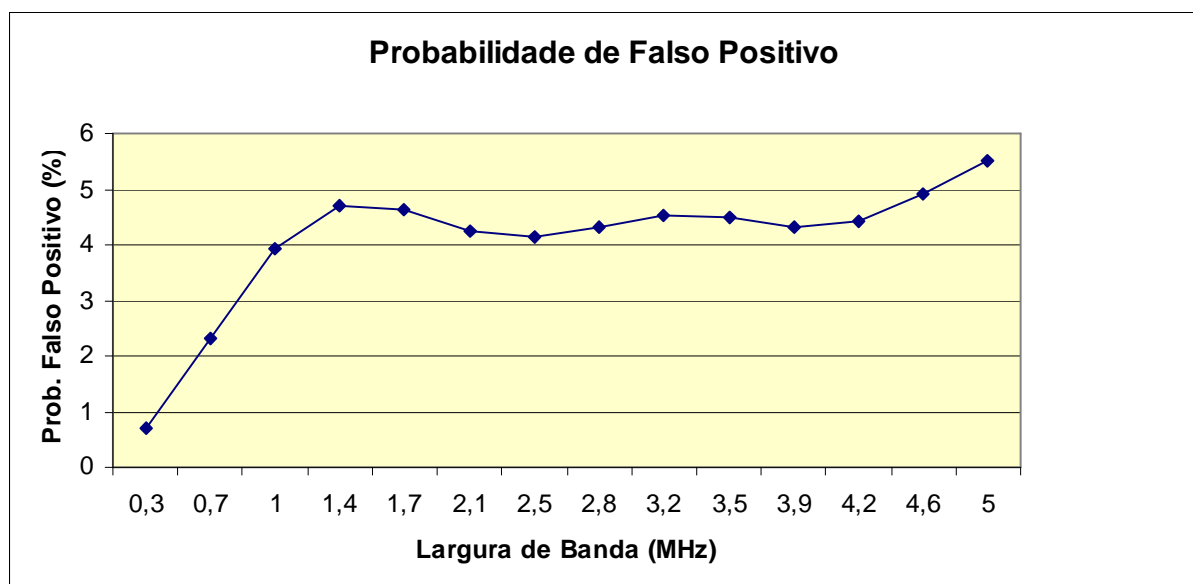


Figura 7. Probabilidade de Falso Positivo  
Fonte: Autoria Própria 2010

Para esta modelagem o método de detecção de energia – *multitaper* – foi escolhido principalmente pelo seu baixo custo e simplicidade de implementação, o qual o torna um candidato favorável para a detecção de espectros em sistemas de rádios cognitivos.

Os resultados apresentados na Figura 7 mostram que, no algoritmo estudado, a probabilidade de falso positivo aumenta de acordo com a largura de banda utilizada no canal e, conseqüentemente, em relação à faixa de frequência de operação da rede. Esse comportamento é explicado pelo fato de que quanto maior a frequência de operação, maior a probabilidade de ocorrência de ruídos e distorções que, além de afetar as transmissões, dificultam o processo de detecção de atividade do usuário primário em uma rede de rádios cognitivos. (STALLINGS, 2007)

Entretanto, analisando os trabalhos relacionados (NIVATO et. al., 2009; ZENG, LIANG, 2009), percebe-se que as taxas de falso-positivo garantidas pelo algoritmo em questão são aceitáveis. Pois os resultados atingidos foram de 85,7% de probabilidade de detecção de frequência livre, contra 88% encontrado na literatura estudada. Portanto, o algoritmo estudado mostra-se eficiente também do ponto de vista dessa métrica.

## 5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

A proposta de redes rádios cognitivos é um tema recente e com muita pesquisa ainda a ser feita para que haja implementações utilizáveis. Entretanto, não há dúvidas quanto aos benefícios que essa tecnologia tem a trazer, como resolver o problema da sobrecarga do espectro de frequências, melhorar o potencial de desempenho das comunicações sem fio em geral e minimizar a interferência entre dispositivos de rádio, cada vez mais presentes no cotidiano de todos.

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.

Algumas características do padrão IEEE 802.22 foram apresentadas neste trabalho. 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 (CORDEIRO et al., 2005; IEEE 802 2010). 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 a incertezas nas comunicações geram impactos diretos sobre o desempenho das técnicas de sensoriamento, podendo levar até mesmo a interferências com usuários primários.



Desta forma, o presente trabalho desenvolveu o estudo sobre a técnica de sensoriamento do espectro do tipo detecção de energia (*Multitaper*) em tomada de decisão para ser utilizada com rádios cognitivos. A escolha pela utilização deste algoritmo foi feita após um estudo sobre as características e vantagens do seu uso.

Através de simulações com o algoritmo desenvolvido no MATLAB, pode-se notar que os resultados foram semelhantes aos apresentados na literatura referente ao tema de sensoriamento do espectro em redes de rádios cognitivos.

A seguir, são apresentadas algumas possibilidades de trabalhos futuros a serem realizados a partir deste estudo.

- Realizar simulações com outras técnicas de sensoriamento, a fim de avaliar o comportamento dos mesmos.
- Realizar simulações em outras faixas de frequência e comparar com o resultado de outras técnicas de sensoriamento.
- Estudar a possibilidade de utilizar Inteligência Artificial para resolver o problema de sensoriamento de espectro.
- Estudar uma nova ferramenta que possa medir as conexões que são perdidas a cada tentativa de conexão e/ou troca entre as faixas licenciadas e não licenciadas.
- Utilizar estratégias cooperativas com objetivo de melhorar o sensoriamento, onde diversos rádios cognitivos compartilham seus resultados, criando um mapa global de ocupação do espectro.

## REFERÊNCIAS

Akyildiz, I.F., W. Lee, M. C. Vuran, and S. Mohanty. (2006) "NeXt Generation/ Dynamic Spectrum Access / Cognitive Radio Wireless Networks: A Survey", *Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking*, vol. 50, pp. 2127–2159.

Akyildiz, Ian F.; Lee, Won-Yeol; Vuran, Mehmet C.; Mohanty, Shantidev. (2008b) "A Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks," *Communications Magazine*, IEEE.

Ball, S.; Ferguson, A. (2005) "Consumer applications of cognitive radio defined networks." *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on, pages 518 –525, nov. 2005.

Berg, R.W.; Whitmer, D.; Kleinfeld, D. (2006) "Exploratory whisking by rat is not phase locked to the hippocampal theta rhythm." *J Neurosci*. 2006.

Cabric, D.; Mishra, S. M.; Brodersen, R. W. (2004) "Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios." *Proceedings of the Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*, 2004.

Cordeiro, C.; Challapali, K.; Birru, D.; Shankar, S. (2005) "IEEE 802.22: the first worldwide wireless standard based on cognitive radios." *Proc. IEEE 1st Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, pages pp.328–337, Baltimore, Nov. 2005.

Freitas, L. C., Klautau, A. e Costa, J. C. W. A. (2008) "Classificadores de Modulação Digital em Sensoriamento Espectral de Rádio Cognitivo". *Universidade Federal do Pará*.

Gardner, W. A.(1988) "Signal interception: A unifying theoretical framework for feature detection." *IEEE Trans. on Communications*, vol.36(8):pp.897–906, August 1988.

Ghasemi, A.; Sousa, E. S. (2005) "Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments." *IEEE 1st Symposium on Dynamic Spectrum access Networks (DySPAN)*, pages pp.131–136, Baltimore, Nov. 2005.

Ghasemi, Amir; Sousa, Elvino S. (2008) "Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks: Requirements, Challenges and Design Trade-offs" Communications Magazine, IEEE.

IEEE 802 (2010); Committee Standards "IEEE 802.22 WG on WRANs (wireless regional area networks)". Disponível em: <<http://www.ieee802.org/22/>>. Acessado em junho de 2010.

Jeon, Wha Sook; Jeong, Dong G.; Han, Jeong Ae; Ko, Gwangzeen; Song, Myung S. (2008) "An Efficient Quiet Period Management Scheme for Cognitive Radio Systems," Wireless Communications, IEEE Transactions on, vol.7, no.2, pp.505-509.

Kummar, A.; Shin, K. (2007) "Toward context-aware wireless spectrum agility," Mobi Com'07: Proceedings of the 13<sup>th</sup> annual ACM international conference on Mobile computing and networking, pages pp.318-321, New York, USA, ACM, 2007.

Kyasanur, P. (2005) "Mesh networking protocols to exploit physical layer capabilities." Proc. IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks (WiMesh), 2005.

Lee, Won-Yeol; Akyildiz, Ian F. (2008) "Optimal Spectrum Sensing Framework for Cognitive Radio Networks," Wireless Communications, IEEE Transactions on, vol.7, no.10, pp.3845-3857.

MATHWORKS. The MathWorks. Entidade desenvolvedora da ferramenta MATLAB (MATrix LABoratory). Página oficial disponível em <http://www.mathworks.com/>. Acessado em Julho, 2010.

Menezes, Alam S. (2007) "Avaliação de Desempenho de Rádios Cognitivos e Proposta de Estrutura de Equalização Temporal em Sistemas OFDM,". Universidade Estadual de Campinas.

Niyato, D.; Hossain, E., (2008) "Spectrum trading in cognitive radio networks: A market-equilibrium-based approach," Wireless Communications, IEEE , vol.15, no.6, pp.71-80.

Niyato, D.; Hossain, E. (2008b) "Competitive spectrum sharing in cognitive radio networks: a dynamic game approach," Wireless Communications, IEEE Transactions on , vol.7, no.7, pp.2651-2660.

Niyato, Dusit; Hossain, Ekram; Han, Zhu. (2009) "Dynamic Spectrum Access in IEEE

802.22 – Based Cognitive Wireless Networks: A Game Theoretic Model for Competitive Spectrum Bidding and Pricing,” *Wireless Communications, IEEE*, 2009.

Parthaprathim, D.; Liang, Ying-Chang. (2008) “Blind Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive Radio Networks,” *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol.57, no.5, pp.2834-2842.

Percival, D.B.; Walden, A. T. (1993) “Spectral analysis for physical applications: multitaper and conventional univariate techniques.” Chap 6. Cambridge,UK. 1993

Proakis, J. (2001) “Digital communications.” McGraw-Hill, 4th. ed. edition, 2001.

Thomson, D.J. (1982) “Spectral estimation and harmonic analysis.” *Proc. IEEE*, 70, 1055-1096.

SENSOR NETWORK FOR DYNAMIC AND COGNITIVE RADIO ACCESS. (2010) “Sensor Network for Dynamic and Cognitive Radio Access.” Página disponível em <http://www.sendora.eu/node/204>. Acessado em Julho, 2010.

Seungheon Hyeon; Kim, J.; Seungwon Choi. (2008) “Evolution and standardization of the smart antenna system for software defined radio,” *Communications Magazine, IEEE* , vol.46, no.9, pp.68-74.

Silva, M. W. R., Cardoso, K. V., Moura, D. F. C., Galdino, J. F., Salles, R. M., Rezende, J. F. de. (2008) “Avaliação do Compartilhamento Espectral em Redes Cognitivas utilizando Jogos Evolucionários.” XXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 02-05, RJ.

Slepian, D. (1978) "Prolate spheroidal wave functions, Fourier analysis and uncertainty", *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 57, pp. 1371-1430, 1978.

Sousa, Marcelo P.; Lopes, Rafael F.; Lopes, Waslon T. A.; Alencar, Marcelo S. (2010) “Redes Cognitivas: Um Novo Paradigma para as Comunicações Sem Fio.” XXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, pages 153 – 197. Gramado – RS, 2010.

Stallings, W. (2007) “Data and Computer Communications.” Pearson Education, Inc. Upper Saddle River, NJ 07458; 2007.

Stevenson, C.; Chouinard, G.; Zhongding Lei; Wendong Hu; Shellhammer, S.; Caldwell, W. (2009) “IEEE 802.22: The first cognitive radio wireless regional area

network standard," *Communications Magazine, IEEE* , vol.47, no.1, pp.130-138.

Stine, J. (2005) "Spectrum management: the killer application of ad hoc and mesh networking." *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN. First IEEE International Symposium on*, pages 184 –193, Nov. 2005.

Tandra, R. ; Sahai, A. ; Hoven, N. (2004) "Some fundamental limits in cognitive radio." *Allerton Conf. on Comm., Control and Computing 2004*, October 2004.

Tandra, R. ; Sahai, A. (2005) "Fundamental limits on detection in low SNR under noise uncertainty." *Proc. International Conference on Wireless Networks, Communications and Mobile Computing*, pages pp.464–469, June 2005.

Thomson, D. J. (1982), "Spectrum estimation and harmonic analysis", *Proc. IEEE*, vol. 20, pp. 1055-1096, Sep. 1982.

Won-Yeol Lee; Akyildiz, I.F. (2008)"Optimal spectrum sensing framework for cognitive radio networks," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol.7, no.10, pp.3845-3857.

Ying-Chang Liang; Yonghong Zeng; Peh, E.C.Y.; Anh Tuan Hoang. (2008) "Sensing-Throughput Tradeoff for Cognitive Radio Networks," *Wireless Communications, IEEE Transactions on* , vol.7, no.4, pp.1326-1337.

Zeng, Yonghong; Liang, Ying-Chang. (2009) "Spectrum-Sensing Algorithms for Cognitive Radio Based on Statistical Covariances," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol.58, no.4, pp.1804-1815.

ZHANG, Qiwei. et al. (2006) "Cognitive Radio for Emergency Network." *Mobile Multimedia: Communication. Nova Publishers, U.S.A. Engineering Perspective. 2006.*