

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ELÉTRICA

SENSORIAMENTO ESPECTRAL PARALELO À
TRANSMISSÃO EM REDES DE RÁDIO COGNITIVO

RENATO SALES BIZERRA

ORIENTADOR: ADONIRAN JUDSON DE BARROS BRAGA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

PUBLICAÇÃO: PPGEE.DM - 503/2012

BRASÍLIA/DF: OUTUBRO-2012.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**SENSORIAMENTO ESPECTRAL PARALELO À
TRANSMISSÃO EM REDES DE RÁDIO COGNITIVO**

RENATO SALES BIZERRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO
DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA
DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:

ADONIRAN JUDSON DE BARROS BRAGA, Dr., PPGEE/UNB
(ORIENTADOR)

ANDRÉ NOLL BARRETO, Dr., PPGEE/UNB
(EXAMINADOR INTERNO)

DAYAN ADIONEL GUIMARÃES, Dr., INATEL
(EXAMINADOR EXTERNO)

Brasília/DF, 04 de outubro de 2012.

FICHA CATALOGRÁFICA

BIZERRA, RENATO SALES

Sensoriamento Espectral Paralelo à Transmissão em Redes de Rádio Cognitivo
[Distrito Federal] 2012.

xii, 78p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Dissertação de Mestrado -
Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica.

- | | |
|------------------------|--------------------------------|
| 1. Rádio Cognitivo | 2. Sensoriamento do Espectro |
| 3. Detector de Energia | 4. Eficiência do Sensoriamento |
| I. ENE/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BIZERRA, R. S. (2012). Sensoriamento Espectral Paralelo à Transmissão em Redes de Rádio Cognitivo. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGE.DM - 503/2012, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 78p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Renato Sales Bizerra.

TÍTULO: Sensoriamento Espectral Paralelo à Transmissão em Redes de Rádio Cognitivo.

GRAU: Mestre ANO: 2012

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Renato Sales Bizerra
Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica
70910-900, Brasília/DF - BRASIL

Dedicatória

A minha esposa Wyana Kell e a meus pais Nicodemos e Maria de Jesus.

Renato Sales Bizerra

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me guiar a todo momento. A minha esposa, pelo carinho, paciência e compreensão. A meus pais, pela educação, apoio e exemplo. Aos amigos pela força. E aos mestres por colaborarem com essa conquista.

Renato Sales Bizerra

RESUMO

SENSORIAMENTO ESPECTRAL PARALELO À TRANSMISSÃO EM REDES DE RÁDIO COGNITIVO

Autor: Renato Sales Bizerra

Orientador: Adoniran Judson de Barros Braga

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Brasília, outubro de 2012

Rádio Cognitivo tem sido proposto como uma solução promissora para o problema de escassez do espectro. Nessa solução, usuários secundários não licenciados têm o desafio de usar as melhores oportunidades do espectro sem interferir na operação de usuários primários licenciados. Por isso, muitas pesquisas têm focado na maximização da taxa de transmissão do rádio cognitivo sob a restrição de se evitar interferência na rede dos usuários primários.

Entretanto, a maioria dessas pesquisas consideram que a transmissão dos usuários secundários não é permitida na mesma faixa de frequência durante o período de sensoriamento. Essa consideração resulta em uma sub-utilização do espectro disponível por parte do rádio cognitivo durante o período que realiza o sensoriamento.

Embora a tecnologia corrente não permita a transmissão e sensoriamento ao mesmo tempo, nesse trabalho é demonstrado que é possível realizar o sensoriamento e a recepção ao mesmo tempo. Nós propomos uma extensão para a tradicional técnica de detecção de energia que permite o Rádio Cognitivo sensoriar o espectro e decidir a respeito da presença do rádio primário mesmo quando outros usuários secundários transmitem na mesma banda sob sensoriamento.

Resultados obtidos neste trabalho demonstram as vantagens do modelo proposto em relação ao modelo tradicional de sensoriamento do espectro. Dentre essas vantagens, destacamos que os resultados obtidos para certos valores de SNR do rádio secundário praticamente eliminam problemas de eficiência do sensoriamento observado na técnica tradicional de sensoriamento do espectro.

ABSTRACT

SPECTRUM SENSING PARALLEL TO TRANSMISSION IN COGNITIVE RADIO NETWORKS

Author: Renato Sales Bizerra

Supervisor: Adoniran Judson de Barros Braga

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Brasília, October of 2012

Cognitive radio has been proposed as a promising solution to the spectrum scarcity problem. In such solution, unlicensed secondary users have the challenge of using the best spectrum's opportunities without interfering with the operation of licensed primary users. Hence, many researches have been carried out to maximize the cognitive radio throughput under the restriction of avoiding interference on primary user network.

However, most of these researches have considered that the transmission of secondary users is not allowed within the sensed band during the sensing period. This consideration leads the cognitive radio to underutilize the available spectrum while sensing the radio frequency environment.

Although current technologies do not allow for transmission and sensing at the same time, we show in this paper that it is possible to sense and receive at the same time. We propose an extension for the traditional energy detection technique that allows for the cognitive radio to sense the spectrum and decide about the primary user presence even while other secondary users are transmitting in the sensed spectrum band.

Obtained results show the advantages of the proposed model against the traditional spectrum sensing model. Among these advantages, we remark that the results obtained for some values of secondary user SNR practically solve the efficiency problem observed in the traditional spectrum sensing techniques.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2	OS DESAFIOS	7
1.2.1	Requisitos de Hardware	7
1.2.2	Usuário Primário Escondido - Incerteza no Receptor	7
1.2.3	Detecção de Usuários Primários Operando com Espalhamento Espectral	8
1.2.4	Duração e Frequência do Sensoriamento	9
1.3	OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	10
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	11
2	RÁDIO COGNITIVO	13
2.1	INTRODUÇÃO	13
2.2	CAPACIDADE COGNITIVA	14
2.3	SENSORIAMENTO DO ESPECTRO	15
2.3.1	Sensoriamento Baseado em Detecção de Energia	16
2.3.2	Sensoriamento Baseado em Detecção de Forma de Onda	22
2.3.3	Sensoriamento Baseado em Detecção Cicloestacionária	23
2.3.4	Sensoriamento Baseado em Identificação do Transmissor	23
2.3.5	Sensoriamento por Filtro Casado	24
2.3.6	Abordagens para o Sensoriamento do Espectro	24
2.3.7	Estratégias do Sensoriamento do Espectro	26
2.3.8	Arquiteturas do Sensoriamento do Espectro	27
2.4	ANÁLISE DO ESPECTRO	28
2.5	GERENCIAMENTO DO ESPECTRO	29
2.6	SUMÁRIO	31
3	SENSORIAMENTO PARALELO À TRANSMISSÃO	32
3.1	INTRODUÇÃO	32
3.2	SENSORIAMENTO PARALELO FORA DA BANDA DE TRANSMISSÃO	33
3.3	SENSORIAMENTO PARALELO NA BANDA DE TRANSMISSÃO	35
3.3.1	O modelo proposto para o sensoriamento o espectro	36
3.3.2	Aproximação para um grande número e amostras	39

3.3.3	Modelo Geral e Sensoriamento do Espectro	42
3.4	VALIDAÇÃO DO MODELO PROPOSTO DE SENSORIAMENTO DO ESPECTRO	43
3.5	SUMÁRIO	47
4	DESEMPENHO DO MODELO PROPOSTO	49
4.1	INTRODUÇÃO	49
4.2	MODELO DE OPERAÇÃO DO RÁDIO PRIMÁRIO	50
4.3	MODELO ANALÍTICO PARA INTERFERÊNCIA	51
4.4	MODELO ANALÍTICO PARA TAXA DE TRANSMISSÃO	53
4.5	RESULTADOS	55
4.6	SUMÁRIO	59
5	SUMÁRIO E CONCLUSÕES	60
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Taxa de Ocupação do Espectro de 30 MHz a 3 GHz em Viena [27].	3
Figura 1.2	Visão geral da Taxa de Ocupação do Espectro [1]	4
Figura 1.3	Comparação entre Rádio Tradicional, SDR e Cognitivo [6].	6
Figura 1.4	Problema do Usuário Primário Escondido [2].	8
Figura 1.5	Periodicidade do Sensoriamento [12].	10
Figura 2.1	Ciclo Cognitivo [1].	15
Figura 2.2	Linhas de pesquisa em sensoriamento do espectro [35]	16
Figura 2.3	Diagrama de Blocos do Detector de Energia	17
Figura 2.4	Exemplo de Sensoriamento Geo-Localizado com Banco de Dados	26
Figura 2.5	Exemplo de Oportunidades de Transmissão [2]	30
Figura 3.1	Modo de Sensoriamento Serial	33
Figura 3.2	Modo de Sensoriamento Paralelo fora da Banda de Transmissão do Rádio Cognitivo	34
Figura 3.3	Modo de Sensoriamento Paralelo na Banda de Transmissão	36
Figura 3.4	Curva ROC complementar (P_m vs P_f) para os modelos de sensoriamento do espectro tradicional ($\gamma_x = 10$ dB, $U = 5$) e proposto ($\gamma_x = 10$ dB, $\gamma_s = 5$ dB, $U = 5$). Valores simulados são expostos para validar o modelo proposto.	44
Figura 3.5	Evolução da P_d como uma função da SNR do usuário secundário (γ_s) para um número fixo de amostras ($2U = 10$) e para uma SNR fixa do usuário primário ($\gamma_x = 10$ dB), considerando três casos de P_f	45
Figura 3.6	Tempo de sensoriamento necessário para detectar a presença de um sinal do Rádio Primário ($\gamma_x = -21$ dB e $\gamma_x = -15$ dB) em função da SNR do usuário secundário para um desempenho do sensoriamento fixo ($P_d = 0,9$ and $P_f = 0,1$).	47
Figura 4.1	Comparação entre a taxa de transmissão atingível nos modelos tradicional e proposto de sensoriamento do espectro	55
Figura 4.2	Taxa de Transmissão Atingível para os modelos tradicional e proposto de sensoriamento do espectro em função da SNR do Rádio Cognitivo	57
Figura 4.3	Capacidade de Transmissão Normalizada pela Taxa de Transmissão teórica do canal	57

Figura 4.4 Limite de SNR do Rádio Secundário, por duração do sensoreamento no modelo tradicional, em que a taxa de transmissão dos modelos, proposto e tradicional, se igualam. 58

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
CCDF	<i>Complementary Cumulative Distribution Function</i>
CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CDR	<i>Constant Detection Rate</i>
CDT	<i>Channel Detection Time</i>
CFAR	<i>Constant False Alarm Rate</i>
CLT	<i>Central Limit Theorem</i>
CR	<i>Cognitive Radio</i>
DSA	<i>Dynamic Spectrum Access</i>
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
DVB-T	<i>Digital Video Broadcasting - Terrestrial</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FHSS	<i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i>
FSA	<i>Fixed Spectrum Access</i>
GSM	<i>Global System for Mobile</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MAP	Máximo a Posteriori
OFDM	<i>Orthogonal frequency-division multiplexing</i>
PSD	<i>Power Spectral Density</i>
PU	<i>Primary User</i>
RF	Radiofrequência
SCD	<i>Spectral Correlation Density</i>
SDR	<i>Software-Defined Radio</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SU	<i>Secondary User</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
UIT	União Internacional de Telecomunicações
VHF	<i>Very High Frequency</i>
WRAN	<i>Wireless Regional Areal Network</i>

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O espectro eletromagnético é um recurso público, porém escasso, cuja coordenação cabe a entidades governamentais que regulamentam sua utilização de forma soberana em cada país por meio de agências reguladoras como a Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) no Brasil, na maioria das vezes seguindo diretrizes internacionais recomendadas pela União Internacional de Telecomunicações - UIT. Atualmente o modelo de regulamentação dominante em todo o mundo é o de atribuição fixa de faixas de frequências, conhecido como FSA (*fixed spectrum allocation*), que pode atrelar uma dada faixa de frequência a uma Estação de Radiocomunicação de um Serviço específico em determinada Área Geográfica, como pode ser observado nos seguintes procedimentos administrativos definidos pela Anatel [3]:

- **atribuição (de uma faixa de radiofrequências):** inscrição de uma dada faixa de radiofrequências na tabela de atribuição de faixas de radiofrequências, com o propósito de usá-la, sob condições específicas, por um ou mais serviços de radiocomunicação terrestre ou espacial convencionados pela UIT, ou por serviços de radioastronomia;
- **distribuição:** inscrição de uma radiofrequência, faixa ou canal de radiofrequências para uma determinada área geográfica em um plano de distribuição editado pela Agência, sem contrariar a atribuição e a destinação estabelecidas;
- **consignação (de uma radiofrequência, faixa ou canal de radiofrequências):** procedimento administrativo da Agência que vincula o uso de uma radiofrequência, faixa ou canal de radiofrequências, sob condições específicas, a uma estação de radiocomunicações;

Apesar de o modelo FSA ter desempenhado satisfatoriamente a coordenação do espectro eletromagnético no passado, atualmente ele tem se aproximado de um ponto de estrangulamento onde restam poucas faixas de frequências a serem atribuídas ao crescente número de serviços e aplicações de sistemas de comunicação sem fio. Este cenário tem se configurado desde o início da transição das comunicações baseadas apenas em voz para as comunicações multimídia, que passaram a demandar maiores taxas

de transmissão por meio de serviços que necessitam cada vez mais banda. Além disso, os avanços na tecnologia em geral tem significativo impacto na diversidade e na qualidade dos serviços oferecidos, com conseqüente aumento na demanda dos usuários por serviços e dispositivos móveis com alto desempenho. Dessa forma, como a maior parte do espectro já se encontra alocada, tem se revelado grande o desafio das entidades governamentais de seguir a evolução tecnológica e encontrar faixas de frequências vagas para acomodar os novos serviços, ou evoluir os já existentes.

Por outro lado, embora o espectro eletromagnético esteja quase todo atribuído, estudos realizados em [10] pela *Federal Communications Commission* (FCC) revelam que a utilização do espectro varia de 15 a 85% a depender de variáveis como o período de análise e a área geográfica. Outro estudo em [27], realizado na cidade de Viena, Áustria, revela a taxa de ocupação do espectro nesta cidade entre 30 MHz e 3 GHz, como ilustrado na Figura 1.1. Analisando esta figura percebe-se que os Serviços Telefonia Celular e de Radiodifusão (TV e FM) são os de maior taxa de ocupação, e que a maioria dos outros serviços não chega a ocupar 20% do espectro que lhes foi atribuído. Percebe-se também que nem todos os canais de TV estão com uma boa taxa de ocupação. Alguns subutilizam o recurso eletromagnético que lhes foi atribuído e que poderia estar sendo utilizado por outro serviço.

Seguindo essa linha de estudos, chegou-se à conclusão em [14] que: a) algumas faixas de frequência do espectro estão desocupadas na maior parte do tempo; b) outras faixas de frequência estão ocupadas parcialmente e c) as demais faixas de frequência são muito utilizadas. A Figura 1.2 ilustra o cenário descrito nesse estudo.

Esses estudos mostram o que é evidente: a falta de faixas de frequências para os novos serviços não é um simples problema de escassez do espectro eletromagnético, mas sim de sua utilização ineficiente. Essa ineficiência tem motivado estudos de soluções que permitam a utilização oportunista dos recursos por meio de dispositivos que consigam reconhecer canais disponíveis para a transmissão em um dado instante de tempo em que o espectro não esteja sendo utilizado pelo usuário licenciado.

A primeira solução adotada por órgãos reguladores para mitigar os problemas da alocação fixa do espectro foi a criação das chamadas bandas não licenciadas. Serviços como o Móvel Celular e Radiodifusão Sonora em FM possuem suas estações transmissoras todas licenciadas pelos órgãos reguladores e operam em caráter primário, ou seja, têm direito a proteção contra interferências prejudiciais provenientes de qual-

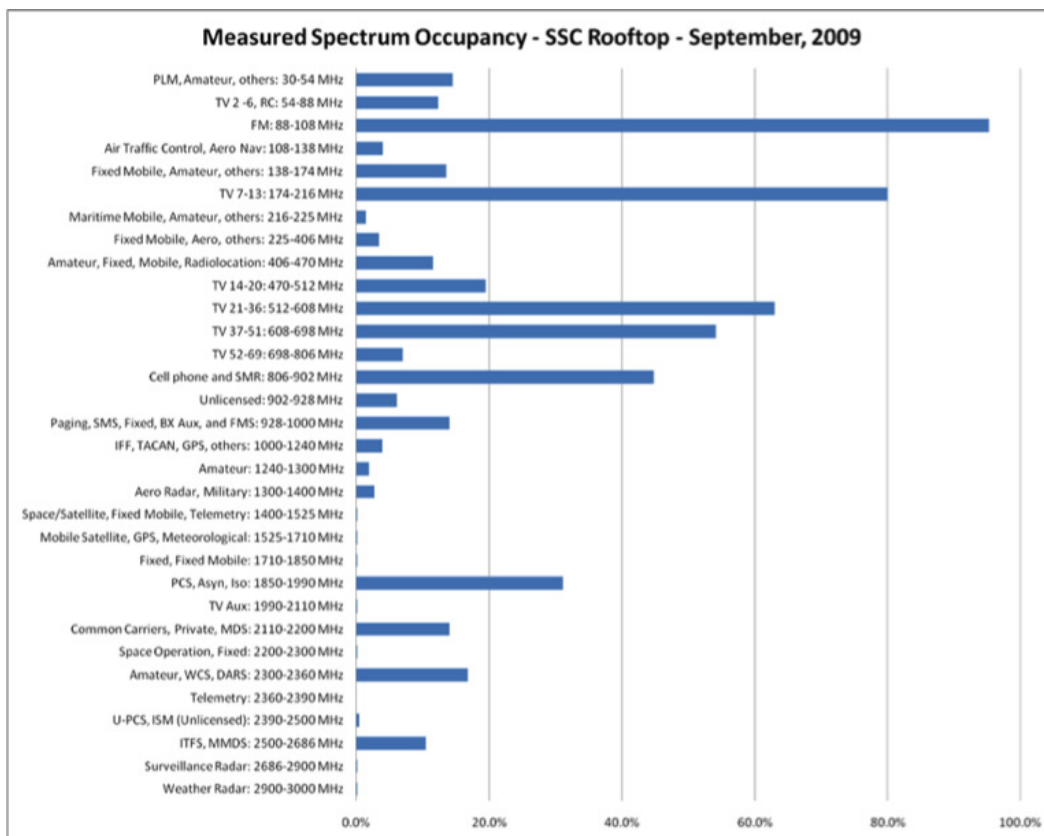


Figura 1.1: Taxa de Ocupação do Espectro de 30 MHz a 3 GHz em Viena [27].

quer outra estação de radiocomunicação. Entretanto, nas bandas não licenciadas, os usuários não precisam cadastrar suas estações no órgão regulador, pois operam em caráter secundário, ou seja, não têm direito a proteção contra interferências prejudiciais provenientes de qualquer outra estação de radiocomunicação nem podem causar interferência em qualquer sistema operando em caráter primário.

A banda não licenciada mais conhecida é a banda ISM (*Industrial, Scientific, and Medical*), que disponibiliza faixas de frequências em 900 MHz, 2.4 GHz e 5.8 GHz. No Brasil essas faixas são regulamentadas pela Resolução nº 506 da Anatel, de 01/06/2008, que em seu artigo primeiro determina o seguinte: *“Este Regulamento tem por objetivo caracterizar os equipamentos de radiação restrita e estabelecer as condições de uso de radiofrequência para que possam ser utilizados com dispensa da licença de funcionamento de estação e independentes de outorga de autorização de uso de radiofrequência.”*

Como pode ser observado no dispositivo acima, os equipamentos que operam na banda ISM são conhecidos no Brasil como equipamento de radiocomunicação de radiação restrita, cuja definição dada pela Anatel na Resolução 506 é a seguinte: *“Termo genérico aplicado a equipamento, aparelho ou dispositivo, que utilize radiofrequência*

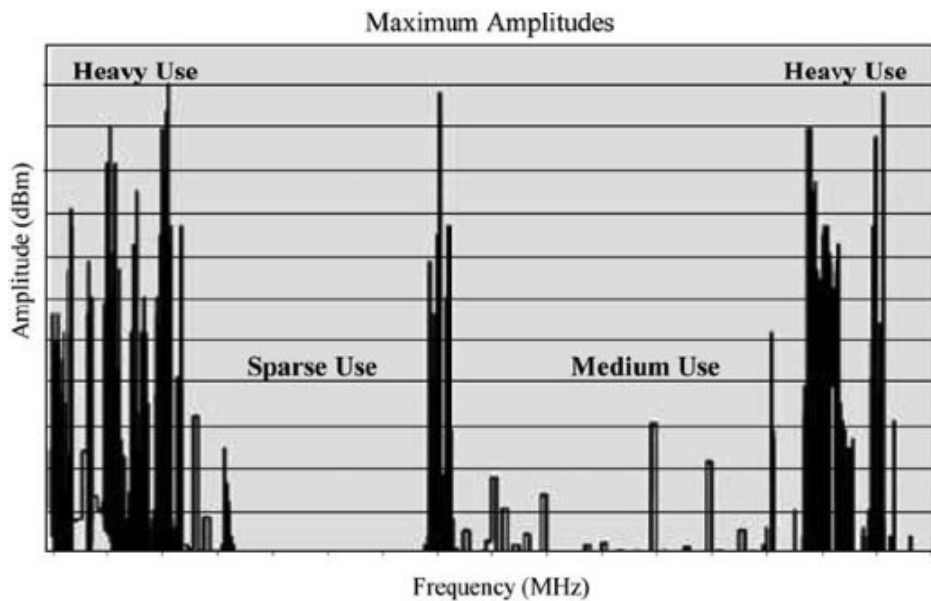


Figura 1.2: Visão geral da Taxa de Ocupação do Espectro [1]

para aplicações diversas em que a correspondente emissão produza campo eletromagnético com intensidade dentro dos limites estabelecidos neste Regulamento. Eventualmente, pode estar especificado neste Regulamento um valor de potência máxima de transmissão ou de densidade de potência máxima em lugar da intensidade de campo”.

Desse fragmento da resolução da Anatel observa-se que o uso das bandas não licenciadas não é completamente liberado, mas existem restrições como a potência máxima de transmissão ou densidade de potência máxima. Na realidade, o uso não licenciado do espectro foi criado com o propósito de viabilizar sistemas e aplicações simples, que utilizem radiofrequência com baixas potências, e que, geralmente, não causam interferência em outros sistemas, como, por exemplo, controle remoto de um carro, telefone sem fio ou até mesmo um roteador Wi-Fi doméstico.

Inicialmente, os órgãos reguladores estavam mais preocupados em coordenar o uso do espectro para telecomunicações a longa distância, onde a garantia de níveis mínimos de interferência entre usuários licenciados é crítica. Para alcançar esse nível de coordenação, eles supervisionam cada área de prestação do serviço, frequência, largura de banda e potência de cada estação licenciada para diminuir a interferência observada por cada usuário. Dessa forma, não fica difícil imaginar que o licenciamento de dispositivos pessoais como como telefone sem fio, brinquedos de controle remoto e roteadores sem fio de redes pessoais seria inviável com esse nível de coordenação: potência, frequência e largura de banda de cada usuário. Por esse motivo, os órgãos reguladores decidiram abrir as frequências das bandas ISM para tais aplicações, dispensando-as da

obrigatoriedade do licenciamento de estações.

Entretanto, o número de aplicações que se propõem a operar em caráter secundário sem a necessidade de licenciamento de suas estações, bem como o número de usuários dessas aplicações, tem crescido vertiginosamente nos últimos anos, de tal sorte que as bandas ISM se encontram lotadas em muitos lugares, e tem se tornado comum o registro de interferências desses equipamentos em sistemas que operam em caráter primário. Esse tem se mostrado um problema de difícil solução, pois, se por um lado não se pode impedir o crescimento dessas aplicações em caráter secundário, por outro lado não há mais bandas de frequência disponíveis para atribuição ao uso não licenciado.

Nesse contexto surgiu um novo conceito de alocação do espectro eletromagnético chamado DSA (*dynamic spectrum access*), cuja proposta é alcançar maior eficiência na utilização do espectro permitindo usuários secundários acessarem o espectro sem causar interferência nos usuários primários detentores da autorização, de forma oportunista e dinâmica.

Em atenção a esses problemas e às novas propostas de alocação do espectro que vinham surgindo à época, em 2004 a FCC tomou a iniciativa de compartilhar as bandas de TV com usuários não licenciados que poderiam acessar oportunisticamente as faixas de frequência não utilizadas [11]. Logo em seguida o IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) formou o Grupo de Trabalho 802.22 para desenvolver o padrão para Redes de Área Regional sem Fio (WRAN - *wireless regional area networks*) [7], que foi projetado para prover acesso banda larga sem fio em áreas rurais e suburbanas, com uma cobertura média com raio de 33 km, operando em bandas de TV em VHF/UHF subutilizadas, sem que haja interferência aos usuários licenciados.

Lado a lado com todos esses acontecimentos, o mercado das telecomunicações tem acompanhado o crescimento de uma nova tecnologia conhecida com Rádio Definido por Software (SDR - *Software Defined Radio*) [21]. O SDR saiu rapidamente de uma ideia para uma solução real e alcançou grandes avanços nas redes sem fio atuais. Com o SDR, o software embarcado em um celular pode, por exemplo, mudar os parâmetros de operação do aparelho, como modulação e potência de transmissão, à medida que o usuário se move de um lugar para outro. Além disso, do lado da estação rádio base com SDR, algumas atualizações tecnológicas já podem ser feitas com uma simples atualização de software, não sendo necessária a troca de um hardware.

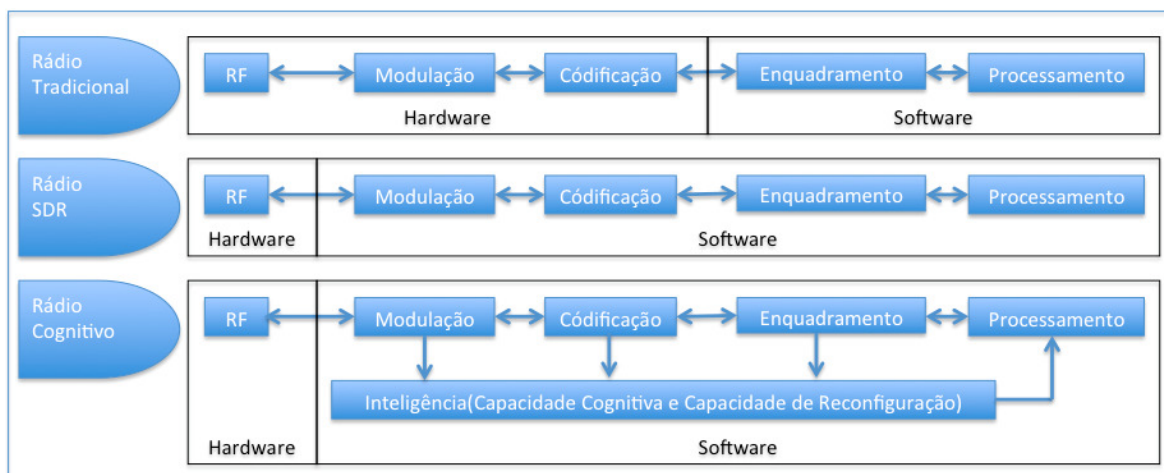


Figura 1.3: Comparação entre Rádio Tradicional, SDR e Cognitivo [6].

Entretanto, os rádios SDR ainda não são capazes de acessar o espectro de forma dinâmica, como propõe o modelo DSA de alocação do espectro. Focado nesse problema, foi proposto um novo conceito de rádio disposto a atender às demandas de alocação dinâmica do espectro: é o chamado Rádio Cognitivo (CR - *Cognitive Radio*) [22]. Um equipamento de uma rede de rádio cognitivo deve ser capaz de executar no mínimo estas duas operações: 1) Acessar dinamicamente um faixa inutilizada do espectro; 2) Transmitir de forma oportunista na faixa acessada até que um usuário licenciado seja detectado.

A Figura 1.3 mostra a evolução na arquitetura do rádio tradicional, passando para um definido por software, até chegar ao rádio cognitivo. Observa-se que, apesar do avanço do software sobre módulos antes dominados pelo hardware ocorrido com o advento do rádio SDR, é com a proposta do rádio cognitivo que o conceito de inteligência ganha espaço por meio de duas características principais: a capacidade cognitiva e a capacidade de reconfiguração, as quais serão detalhadas no Capítulo 2.

Desde que foi proposto, o modelo de rádio cognitivo tem atraído a atenção de muitos pesquisadores por permitir maior eficiência na utilização do espectro com alocação dinâmica de faixas de frequências. Sob a proposta de que usuários não licenciados possam utilizar oportunisticamente faixas de frequências subutilizadas, essa tecnologia tem demonstrado grande potencial em solucionar os principais problemas de coordenação do uso espectro, especialmente o de escassez e o de uso ineficiente do espectro. Entretanto, apesar do grande interesse da comunidade acadêmica com relação a esse tema, o desenvolvimento dessa tecnologia é bem mais complexo que o dos Rádios Definidos por Software, e muitos desafios ainda precisam ser ultrapassados até que o Rádio Cognitivo

esteja consolidado no mercado.

1.2 OS DESAFIOS

Como a principal proposta do rádio cognitivo é a de utilizar faixas de frequências licenciadas quando estas não estão sendo utilizadas pelos usuários primários - PU (*Primary User*), um dos grandes desafios dessa tecnologia é garantir que os usuários secundários - SUs (*Secondary Users*) não interfiram nas transmissões do usuário primário. Assim, o SU precisa determinar o status do PU antes de qualquer transmissão, monitorando constantemente o espectro para detectar a possível presença do PU. Para desempenhar tal detecção, com a rapidez e a confiabilidade necessária, técnicas de sensoriamento do espectro assumem um papel fundamental no desempenho do rádio cognitivo, e por isso têm sido alvo de vários estudos e pesquisas no meio acadêmico. A seguir são expostos os principais desafios associadas às técnicas de sensoriamento do espectro [35] que precisam ser superados para que o rádio cognitivo alcance a confiabilidade necessária para acessar dinamicamente o espectro com a devida proteção ao usuário primário.

1.2.1 Requisitos de Hardware

Os receptores dos sistemas de comunicação via rádios tradicionais são capazes de processar sinais em banda estreita com certa facilidade, sem muita complexidade e com um processador de baixa potência. Entretanto, os terminais do rádio cognitivo devem ser capazes de analisar uma banda bem mais larga que os rádios tradicionais para identificar qualquer oportunidade de uso no espectro. Essa banda mais larga de operação exige mais dos componentes de RF, tais como antenas e amplificadores especiais, que são necessários para varrer uma faixa de frequências mais larga. Além disso, os dispositivos do Rádio Cognitivo devem ser equipados com unidades de processamento, DSPs (*Digital Signal Processors*) e FPGAs (*Field-Programmable Gate Array*) mais poderosos para que sejam capazes de executar a demanda de processamento de sinais com o mínimo de atraso possível.

1.2.2 Usuário Primário Escondido - Incerteza no Receptor

O problema do usuário primário escondido é observado quando o usuário primário está transmitindo, mas o usuário secundário não detecta sua presença e decide transmi-

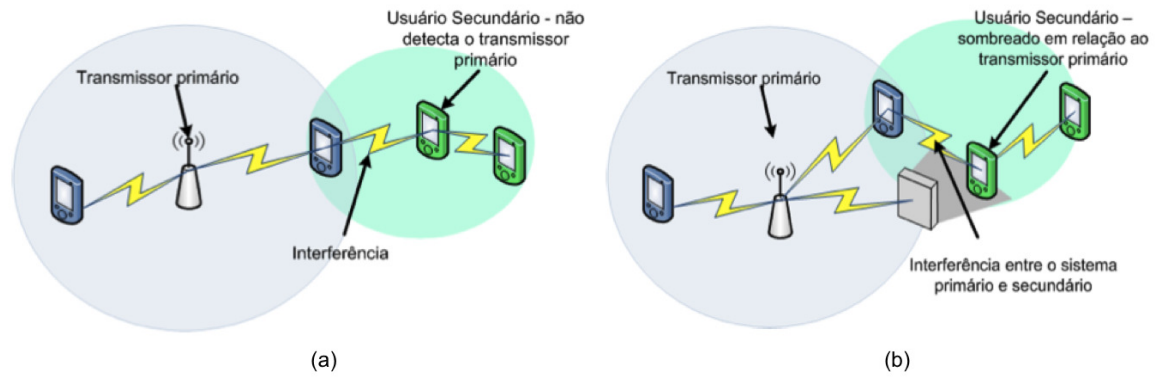


Figura 1.4: Problema do Usuário Primário Escondido [2].

tir interferindo na comunicação dos dispositivos licenciados. Isso pode acontecer por vários fatores, incluindo desvanecimento por multipercursos ou sombreadamento do sinal do usuário secundário em relação ao primário. A Figura 1.4 ilustra o problema do usuário primário escondido, onde os círculos delimitam a região de operação dos rádios primário e secundário. Na Figura 1.4.a o dispositivo do usuário secundário pode não detectar o rádio primário em decorrência da atenuação do seu sinal até o usuário secundário. Já na Figura 1.4.b o usuário secundário se encontra em uma região de sombra em relação ao sinal emitido pelo primário. Nesse caso, apesar da distância entre o rádio primário e o secundário ser menor, alguma barreira impede que o sinal do rádio primário chegue com a potência necessária para que o dispositivo secundário interprete corretamente sua presença.

1.2.3 Detecção de Usuários Primários Operando com Espalhamento Espectral

Dispositivos de telecomunicações que fazem o uso de técnicas de espalhamento espectral têm se tornado comuns nos sistemas de comunicações por sua capacidade de mitigar a interferência. Distribuindo o sinal em uma banda bem maior que a original, esses dispositivos utilizam uma sequência definida por um código previamente estabelecido para realizar o espalhamento espectral, cujas técnicas mais conhecidas são FHSS (*frequency hopping spread spectrum*) e DSSS (*direct sequence spread spectrum*). Ao contrário dos dispositivos tradicionais que operam com frequência fixa, os dispositivos FHSS mudam sua frequência de operação dinamicamente dentro de um conjunto de canais de banda estreita, seguindo uma sequência pré-definida, por isso o nome salto em frequência (*frequency hopping*). Por outro lado, os dispositivos DSSS utilizam uma única banda larga de frequência para espalhar toda a potência do sinal original.

Como no espalhamento espectral a potência do sinal original é distribuída em uma larga faixa de frequência, se torna difícil para o Rádio Cognitivo identificar sua presença sem conhecer a regra do espalhamento do sinal do rádio primário, pois não é capaz de distinguí-lo do ruído. No sistema FHSS esse problema pode ser resolvido caso o rádio cognitivo conheça a sequência de saltos e esteja bem sincronizado com o rádio primário. No caso do sistema DSSS esse problema tem solução tão complexa quanto no sistema FHSS, pois o dispositivo realizando o sensoriamento deveria conhecer o código de espalhamento do sinal do rádio primário para poder detectar sua presença.

1.2.4 Duração e Frequência do Sensoriamento

Como os usuários primários podem voltar a transmitir a qualquer momento, o rádio cognitivo deve ser capaz de identificar sua presença o mais rápido possível e disponibilizar as faixas de frequência imediatamente. Essa exigência impõe um limite mínimo no desempenho do método de sensoriamento que está ligado a dois parâmetros principais: a frequência e a duração do sensoriamento.

A frequência de sensoriamento, como o próprio nome diz, define a taxa na qual o rádio cognitivo deve realizar o sensoriamento do espectro. Esse parâmetro deve ser escolhido com muito cuidado, pois seu valor depende da própria capacidade do *hardware* do rádio cognitivo e de algumas características temporais do rádio primário no ambiente de sensoriamento [17]. Se o estado do rádio primário varia lentamente, como no caso da detecção de canais de TV que não mudam com tanta frequência em uma dada área geográfica, a frequência de sensoriamento não precisa ser tão rigorosa. Considerando tal característica, o padrão IEEE 802.22, que regulamenta o acesso banda larga sem fio em áreas rurais e suburbanas, operando em canais desocupados de TV em VHF/UHF, determina que o sensoriamento deva ser feito apenas a cada 30 segundos [7]. Por outro lado, suponha um exemplo hipotético de um rádio cognitivo que tente operar oportunisticamente em bandas licenciadas para segurança pública com tecnologia *Push-to-Talk*. Nesse caso, como o canal é ocupado aleatória e frequentemente à medida que os usuários primários desejam se comunicar, o rádio cognitivo deve realizar o sensoriamento com a maior frequência possível, pois assim que o sistema de segurança pública iniciar uma transmissão, o rádio cognitivo deve liberar o canal para evitar interferência prejudicial ao usuário primário.

A duração do sensoriamento é outro parâmetro importante a ser considerado no desem-

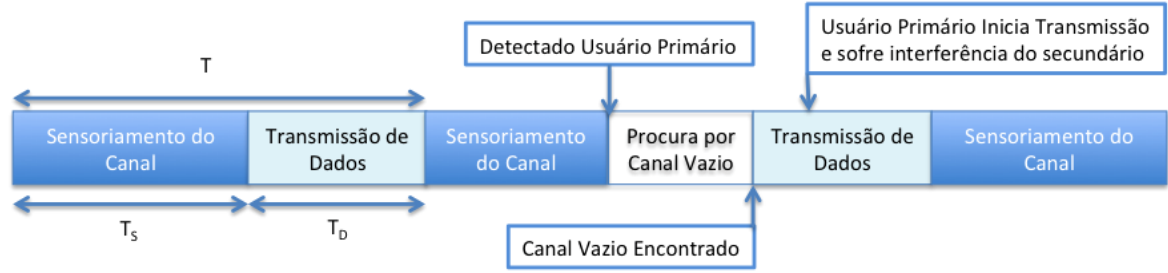


Figura 1.5: Periodicidade do Sensoriamento [12].

penho do sensoriamento feita pelo rádio cognitivo. Em [12] é apresentado um estudo que mostra que a duração ótima de sensoriamento pode ser obtida maximizando a taxa de transmissão média do rádio secundário, preservadas as condições de proteção do usuário primário dentro de um nível mínimo de interferências. A Figura 1.5 ilustra o modelo atualmente utilizado para coordenar o sensoriamento e a transmissão na rede de rádios cognitivos, onde T é o período total entre os inícios de dois sensoriamentos consecutivos, calculado como o resultado da soma do período do sensoriamento (T_s) e o período de transmissão de dados ($T_D = T - T_s$). Nesse caso, a eficiência do sensoriamento η pode ser calculada da seguinte forma [25]:

$$\eta = \frac{T - T_s}{T} \quad (1.1)$$

A Figura 1.5 mostra que mesmo que o rádio cognitivo seja capaz de detectar com precisão a presença do usuário primário durante o período de sensoriamento, pode acontecer que durante a transmissão do usuário secundário se inicie a transmissão do rádio licenciado, e este sofra interferência enquanto durar a transmissão do rádio cognitivo. Por esse motivo, o tempo de transmissão de dados deve ser o menor possível para evitar interferência prejudicial no usuário primário. Entretanto, quanto menor o período de dados menor a taxa de transmissão do usuário secundário. Assim sendo, o desafio está em determinar a duração e a frequência de sensoriamento ótimas que garanta a melhor taxa de transmissão do usuário secundário de tal forma que o nível de interferência no usuário primário esteja abaixo de um nível aceitável.

1.3 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

Como visto na seção anterior, as técnicas de sensoriamento de espectro impõem grandes exigências para os transeptores dos rádios cognitivos. Eles precisam ser versáteis e

operar em várias bandas de rádio. Essas exigências aumentam a complexidade e o custo dos terminais com rádio cognitivo. Além disso, o sensoriamento em uma faixa muito larga do espectro consome muito tempo, levando a uma indesejada latência no serviço e alto consumo de bateria dos terminais. Destaca-se também que, em certos ambientes de propagação, o rádio cognitivo corre o risco de não detectar o rádio primário devido ao desvanecimento ou a uma região de sombra do sinal que chega ao rádio secundário, o que leva a uma baixa probabilidade de detecção e respectivo aumento de interferência no usuário primário. Adicionalmente, existe um compromisso entre o período dedicado ao sensoriamento do espectro e o período dedicado à transmissão de dados em redes de rádio cognitivo.

Diante desses desafios, observa-se que o sensoriamento do espectro assume um papel fundamental no desenvolvimento da proposta de rádio cognitivo. Por esse motivo, serão analisadas neste trabalho as principais técnicas de sensoriamento propostas como soluções para os desafios do rádio cognitivo. Dentre essas técnicas, um enfoque especial é dado à técnica de detecção de energia que, apesar de não possuir a melhor desempenho dentre as técnicas de sensoriamento do espectro, é a mais utilizada devido a sua simplicidade e baixo custo. E como objetivo principal, este trabalho se propõe a desenvolver uma adaptação da técnica de detecção de energia que permita o sensoriamento do espectro do sinal do rádio primário mesmo quando o canal em análise está sendo utilizado para transmissão por outros usuários da rede de rádio cognitivo. Com a adaptação proposta, mesmo que um rádio cognitivo não seja capaz de transmitir e realizar o sensoriamento simultaneamente no canal de transmissão, os demais dispositivos da rede de rádio cognitivo, que não estão transmitindo naquele canal, são capazes de realizar o sensoriamento no canal utilizado pelo rádio cognitivo transmissor. Essa solução elimina a obrigatoriedade de interrupção da transmissão na rede de usuários cognitivos para que seja executado o sensoriamento do espectro no mesmo canal de transmissão. Essa adaptação é estendida para as técnicas de sensoriamento cooperativo com o objetivo de apresentar uma solução tanto para o compromisso entre o sensoriamento e a transmissão, quanto para os problemas de sombreamento e usuário primário escondido.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido da seguinte forma: no Capítulo 2 faz-se uma breve revisão sobre os principais conceitos da tecnologia rádio cognitivo, onde é apresentada a técnica

de detecção de energia que será analisada em detalhes. No Capítulo 3 é proposto um modelo de sensoriamento simultâneo que permite um rádio cognitivo sensoriar o espectro sem a necessidade de interromper a transmissão de outros rádios secundários que transmitem no mesmo canal. Já no Capítulo 4 são comprovados os benefícios da técnica proposta por meio do resultado de simulações. Por fim no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões deste trabalho.

2 RÁDIO COGNITIVO

2.1 INTRODUÇÃO

Dada a limitação natural do espectro, que tem se tornado cada vez mais escasso à medida que o número de serviços sem fio e a demanda por maiores taxas de transmissão tem aumentado nos últimos anos, não fica difícil prever que em um futuro não muito distante o modelo atual de alocação fixa do espectro entrará em colapso. Nesse contexto surgiu o rádio cognitivo com uma das propostas para tentar solucionar o problema de congestionamento do espectro por meio do acesso oportunista a faixas de frequências que são subutilizadas pelos usuários primários detentores de licença para seu uso.

Desde que proposto por Joseph Mitola III, em 1999 [22], a definição de rádio cognitivo vem sendo trabalhada durante esses anos e ainda não há um consenso na comunidade acadêmica a seu respeito. Por esse motivo utiliza-se neste trabalho o conceito adotado pela FCC (Federal Communications Commission) [11]: *“Rádio Cognitivo: um rádio ou sistema que observa seu ambiente eletromagnético operacional e pode ajustar seus parâmetros de rádio, dinamicamente e de forma autônoma, para modificar a operação do sistema, de modo a maximizar a taxa de transmissão, mitigar a interferência e facilitar a interoperabilidade”*.

Desse conceito observam-se duas características importantes do rádio cognitivo [14]: A capacidade cognitiva e a capacidade de reconfiguração.

- A capacidade cognitiva: diz respeito à habilidade do rádio de capturar informações do ambiente de propagação e processá-las para que subsidiem uma reconfiguração do rádio caso seja necessário. Por meio de medições, sensoriamento e aprendizado com situações passadas, o rádio cognitivo é capaz de interpretar informações importantes, tais como características dos canais do rádio, disponibilidade do espectro, situação do ambiente de operação do rádio, requisitos e aplicações do usuário, infraestrutura de rede disponível, políticas e regras locais e outras restrições operacionais.
- Capacidade de reconfiguração: refere-se à competência do rádio de adaptar seus parâmetros de transmissão, inclusive a frequência de operação, de acordo com as informações captadas por meio da capacidade cognitiva.

Para desempenhar adequadamente suas competências, foram identificadas as seguintes funções básicas a serem desempenhadas por um rádio cognitivo [1]:

- a) Sensoriamento do espectro: detecta faixas de frequências inutilizadas para que sejam utilizadas oportunisticamente sem gerar interferências prejudiciais a outros usuários;
- b) Gerenciamento do espectro: captura a melhor faixa de frequência disponível que atenda os requisitos de comunicação dos usuários;
- c) Mobilidade no espectro: mantem os requisitos de comunicação contínua durante a comutação para a melhor faixa de frequência;
- d) Compartilhamento do espectro: Proporciona métodos de agendamento de faixas de frequências suficientes para os usuários coexistentes.

2.2 CAPACIDADE COGNITIVA

O rádio cognitivo tem o desafio de utilizar oportunisticamente o espectro licenciado aos usuários primários, transmitindo com a melhor taxa de transmissão possível, sem interferir nos sistemas desses usuários. Isso é possível graças à sua capacidade cognitiva que, de um modo geral, é responsável por determinar as melhores condições de operação do rádio por meio de iteração contínua e em tempo real com o ambiente de rádio no qual está inserido.

As condições de operação do rádio cognitivo estão diretamente relacionadas à disponibilidade do espectro a ser utilizado, que pode ser classificado em três tipos principais de acordo com sua taxa de ocupação pelo rádio primário [14]:

- a) *Black spaces*: são ocupados por sinais de alta potência durante a maior parte do tempo;
- b) *Grey spaces*: são parcialmente ocupados por sinais de baixa potência;
- c) *White spaces*: estão livres de sinais de RF.

White spaces (com certeza) e *gray spaces* (em alguns casos) são bons candidatos para uso em serviços não licenciados. Entretanto, até mesmo nos *black spaces* podem surgir

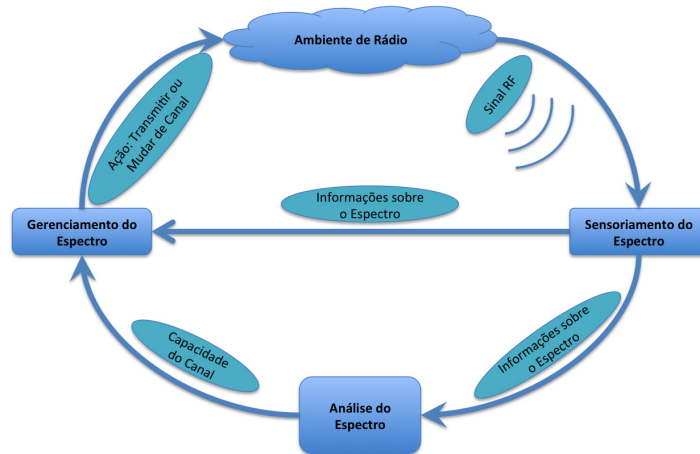


Figura 2.1: Ciclo Cognitivo [1].

oportunidades de transmissão que podem ser aproveitadas pelo rádio cognitivo que selecionará a melhor oportunidade para se adaptar ao ambiente em que se encontra.

As tarefas essenciais na operação adaptativa, que são executadas pela capacidade cognitivas, são ilustradas na Figura 2.1, que é mais conhecida com ciclo cognitivo [14]. Este ciclo inicia com o sensoriamento do espectro que monitora os sinais de RF do ambiente de rádio que o circunda e dele extrai informações que serão utilizadas pelos demais passos do ciclo. O segundo passo do ciclo é a análise do espectro, que é realizada com base nas informações coletadas pelo sensoriamento do espectro e cujo principal objetivo é estimar a capacidade do canal disponível para transmissão do rádio cognitivo. A etapa final do ciclo cognitivo fica a cargo da tarefa de gerenciamento do espectro, que alimentada pelas informações do espectro obtidas da primeira etapa e pela capacidade do canal informada pela análise do espectro, decide se irá transmitir ou não no canal selecionado.

Nesta seção são destacados os três passos do ciclo cognitivo que são: o sensoriamento, a análise e o gerenciamento do espectro.

2.3 SENSORIAMENTO DO ESPECTRO

O sensoriamento do espectro é o primeiro passo do ciclo cognitivo, e é responsável por obter o conhecimento a respeito da utilização do espectro e da existência de usuário primário em determinada área geográfica [35]. Em decorrência de sua importância, o sensoriamento do espectro tem sido amplamente explorado em várias linhas de pesqui-

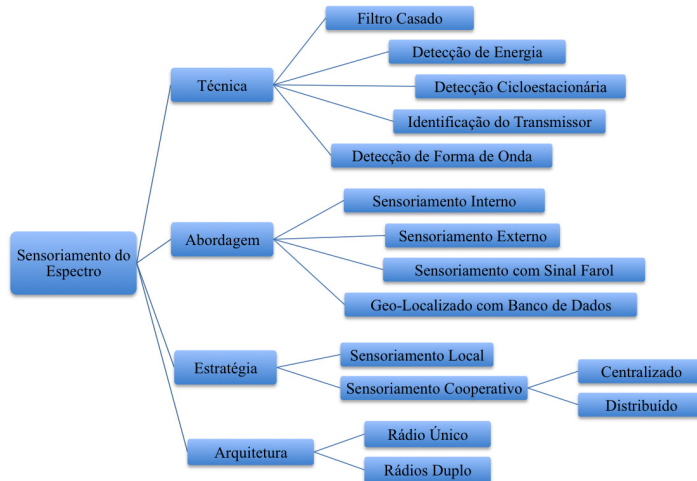


Figura 2.2: Linhas de pesquisa em sensoriamento do espectro [35]

sas.

Como pode ser observado na Figura 2.2, grande é o número de linhas de pesquisas na área de sensoriamento do espectro [35]. Entretanto, apesar de todas essas linhas de pesquisa, a literatura atual ainda se encontra em estado inicial de desenvolvimento e muitas dessas propostas permanecem em discussão na academia. Nessa seção são estudadas as principais técnicas de sensoriamento do espectro, com um enfoque no detector de energia. Além disso, também são analisadas as principais abordagens, estratégias e arquiteturas de sensoriamento do espectro.

2.3.1 Sensoriamento Baseado em Detecção de Energia

A detecção de um sinal na presença de ruído requer certo nível de conhecimento a respeito das características do ruído e do sinal a ser detectado. Na condição de pouco conhecimento a respeito do sinal, pode ser apropriado utilizar um detector de energia para determinar a presença ou ausência do sinal sob sensoriamento [30]. O detector de energia mede a energia de um sinal de entrada dentro de um intervalo específico de tempo T e uma largura de banda B . Como a forma do sinal não é importante para esse propósito, essa técnica pode ser utilizada para detecção de qualquer sinal sem que seja necessário o conhecimento prévio de suas características.

O sensoriamento baseado em detecção de energia é a forma mais comum de implementação de sensoriamento do espectro devido a sua baixa complexidade e seu baixo

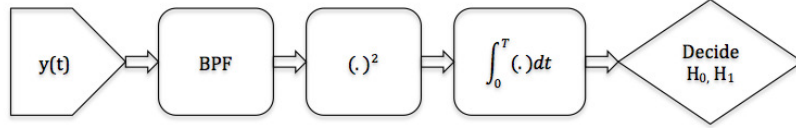


Figura 2.3: Diagrama de Blocos do Detector de Energia

custo. A Figura 2.3 detalha um dos modelos mais simples de um detector de energia, proposto em [30]. Neste modelo, inicialmente o sinal recebido $y(t)$ passa por um filtro-passa-faixa (BPF - *Band-Pass Filter*) ideal que seleciona a frequência central f_c e a banda do sinal em análise, com a seguinte função de transferência que limita a potência média do ruído e normaliza sua variância:

$$H(f) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{N_0}}, & |f - f_c| \leq B \\ 0, & |f - f_c| > B, \end{cases} \quad (2.1)$$

onde N_0 é a densidade espectral de potência unilateral do ruído aditivo branco Gaussiano (AWGN), e B é metade da largura da banda passante do sinal. O filtro é seguido por um dispositivo quadrático e por um integrador que calcula a energia do sinal de entrada no intervalo de tempo T . Embora o detector de energia funcione com um filtro passa-banda, foi demonstrado por Urkowitz [30] que o processo em banda passante é equivalente ao processo em banda base na perspectiva da decisão estatística a ser tomada para detecção do usuário primário. Portanto, por conveniência, as análises desenvolvidas neste trabalho são baseadas em um processo em banda base. A saída do integrador no instante T , denotada por Y , toma a seguinte forma:

$$Y = \frac{1}{N_0} \int_0^T |y(t)|^2 dt. \quad (2.2)$$

Considerando o teorema da amostragem [26], sabe-se que um sinal em banda base com largura de banda B pode ser amostrado sem perdas em um período T com um total de $2BT$ amostras. Assim, seja U o produto entre a largura de banda e o período de amostragem ($U = BT$). O sinal $y(t)$ pode ser aproximado como a soma de $2U$ amostras da seguinte forma:

$$y(t) = \sum_{n=1}^{2U} y[n] \text{sinc}(2Bt - n), \quad (2.3)$$

onde $\text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}$ e $y[n]$ é a n -ésima amostra do sinal recebido, que pode ser escrito

como $y[n] = y\left(\frac{n}{2B}\right)$. Substituindo (2.3) em (2.2), segue que:

$$Y = \frac{1}{N_0} \sum_{n=1}^{2U} |y[n]|^2 \int_0^T (\text{sinc}(2Bt - n))^2 dt, \quad (2.4)$$

utilizando a seguinte propriedade da função sinc [30]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \text{sinc}(2Bt - n) \text{sinc}(2Bt - k) dt = \begin{cases} \frac{1}{2B}, & n = k \\ 0, & n \neq k \end{cases}, \quad (2.5)$$

e a variância do ruído $\sigma_w^2 = 2BN_0$, pode-se aproximar Y em (2.4) da seguinte forma:

$$Y = \sum_{n=1}^{2U} \left| \frac{y[n]}{\sigma_w} \right|^2, \quad (2.6)$$

A saída do detector de energia (Y) é então comparada a um limiar de detecção (λ) que leva à decisão com relação à presença (Hipótese H_1) ou ausência (Hipótese H_0) do sinal do rádio primário. Dessa forma, o sensoriamento do espectro pode ser formulado por um teste de hipótese binário a partir do sinal recebido pelo detector de energia, da seguinte forma [9, 12]:

$$y[n] = \begin{cases} w[n], & H_0 \\ w[n] + h_p x[n], & H_1, \end{cases} \quad (2.7)$$

onde $w[n]$ é a n -ésima amostra do ruído AWGN $w(t)$, $x[n]$ é a n -ésima amostra do sinal do rádio primário $x(t)$ e h_p é o ganho instantâneo do canal entre o usuário primário e o rádio cognitivo que realiza o sensoriamento.

Para uma análise simplificada, considera-se que o sinal recebido a partir do rádio primário ($h_p x[n]$) é determinístico. Nesse caso, substituindo (2.7) em (2.6) obtém-se a seguinte métrica de decisão para as hipóteses H_0 e H_1 :

$$Y = \begin{cases} \sum_{n=1}^{2U} \left| \frac{w[n]}{\sigma_w} \right|^2, & H_0 \\ \sum_{n=1}^{2U} \left| \frac{w[n] + h_p x[n]}{\sigma_w} \right|^2, & H_1. \end{cases} \quad (2.8)$$

Como $\frac{w[n]}{\sigma_w}$ segue uma distribuição Normal com média zero e variância unitária, o somatório em H_0 de (2.8) representa uma distribuição qui-quadrada [31] com $2U$ graus

de liberdade, que pode ser escrita na forma simplificada como χ_{2U}^2 . Por outro lado, o argumento $\frac{w[n]+h_px[n]}{\sigma_w}$ segue uma distribuição normal com variância unitária e média deslocada por $h_px[n]$ e, nesse caso, o somatório em H_1 de (2.8) representa uma distribuição qui-quadrada não centralizada [31] com $2U$ graus de liberdade, e parâmetro de não centralidade ψ definido [31] como:

$$\psi = \sum_{n=1}^{2U} \left| \frac{h_px[n]}{\sigma_w} \right|^2,$$

que pode ser obtido como segue:

$$\begin{aligned} \psi &= \frac{1}{N_0} \int_0^T |h_px(t)|^2 dt \\ &= \frac{E_x}{N_0} \\ &= 2\gamma_x, \end{aligned} \tag{2.9}$$

onde γ_x representa a relação sinal-ruído do sinal do rádio primário observada durante o período de sensoriamento. Portanto no caso da hipótese H_1 em (2.7) a métrica de decisão Y é descrita por uma distribuição qui-quadrada não centralizada com $2U$ graus de liberdade e parâmetro de descentralização igual ao dobro da relação sinal-ruído do rádio primário, que pode ser escrita na forma simplificada como $\chi_{2N}^2(2\gamma_x)$, que nos leva ao teste de hipóteses tradicionalmente conhecido [9] na academia:

$$Y \sim \begin{cases} \chi_{2U}^2, & H_0 \\ \chi_{2U}^2(2\gamma_x), & H_1, \end{cases} \tag{2.10}$$

A partir de (2.10) a decisão quanto à presença do rádio primário pode ser obtida comparando a métrica de decisão Y com um limiar de detecção pré-fixado λ . Dois parâmetros são utilizados para determinar o desempenho desse método de sensoriamento do espectro: *Probabilidade de Detecção* (P_d) e *Probabilidade de Falso Alarme* (P_f). A P_d é definida como a probabilidade de o CR decidir que a banda licenciada está ocupada quando ela realmente está ocupada. A P_f é a probabilidade do CR declarar que o usuário primário está presente na banda licenciada quando na verdade esta se encontra livre. Para alcançar melhor desempenho, uma baixa P_f é exigida para maximizar a utilização do espectro disponível, enquanto uma alta P_d é desejável para evitar interferência no usuário primário. Em um ambiente sem desvanecimento, onde h_p é determinístico, a probabilidade de detecção e falso alarme pode ser encontrada utilizando a CCDF (*Complementary Cumulative Distribution Function*) da distribuição

chi-quadrada centralizada e não centralizada da seguinte forma [9]:

$$P_f = P\{Y > \lambda | H_0\} = \frac{\Gamma(U, \lambda/2)}{\Gamma(U)}, \quad (2.11)$$

$$P_d = P\{Y > \lambda | H_1\} = Q_U(\sqrt{2\gamma_x}, \sqrt{\lambda}), \quad (2.12)$$

onde $\Gamma(\cdot)$ e $\Gamma(\cdot, \cdot)$ são as funções gama completa e incompleta [13], respectivamente, e $Q_U(\cdot, \cdot)$ é a função de Marcum-Q generalizada [23], definida como:

$$Q_U(a, b) = \int_b^\infty \frac{x^U}{a^{U-1}} \exp^{-\frac{x^2+a^2}{2}} I_{U-1}(ax) dx, \quad (2.13)$$

e $I_{m-1}(\cdot)$ é a função de Bessel modificada de ordem $(m - 1)$.

2.3.1.1 Aproximação para um grande número de amostras

A análise anterior é apropriada para um número pequena de amostras ($N = 2BT$) [30]. Entretanto, caso o número de amostras seja muito grande, pode-se utilizar o teorema central do limite para se aproximar o valor da métrica estatística Y . E como em aplicações da tecnologia de rádio cognitivo o sensoriamento do espectro requer um grande número de amostras, para aumentar o desempenho do sensoriamento e evitar interferência na comunicação dos usuários primários, essa aproximação tem sido amplamente difundida nos estudos realizados na área de sensoriamento do espectro. Essa aproximação é apresentada a seguir. E para tornar o modelo mais geral a normalização da variância do ruído no filtro ideal do detector de energia (2.1) é removida. Assim, a saída do detector de energia pode ser aproximada por:

$$Y = \sum_{n=1}^{2U} |y[n]|^2, \quad (2.14)$$

Pressupondo que $2U$ é grande o suficiente, e assumindo que $y[n]$ é uma variável aleatória normal i.i.d. (*independent and identically distributed*) [20] com média zero e variância $E[|y[n]|^2] = \sigma_y^2$, pode-se utilizar o teorema central do limite (CLT - *Central Limit Theorem*) para aproximar a métrica estatística Y como uma variável aleatória normal do tipo ($Y \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$), onde a média (μ) e variância (σ^2) podem ser formuladas utilizando (2.14) da seguinte forma:

$$\mu = 2UE[|y[n]|^2], \quad (2.15)$$

$$\sigma^2 = 2U \left(E \left[|y[n]|^4 \right] - \left(E \left[|y[n]|^2 \right] \right)^2 \right), \quad (2.16)$$

onde $E[\cdot]$ é o operador Valor Esperado. Em (2.15) e (2.16) utilizou-se as propriedades: $\sigma_z^2 = E[z^2] - E^2[z]$, $E[\sum(\cdot)] = \sum(E[\cdot])$ e $var[\sum(\cdot)] = \sum(var[\cdot])$ para variáveis aleatórias independentes.

Nessa análise, tanto o ruído como o sinal do rádio primário são considerados reais e o sinal recebido a partir do rádio primário ($h_p x[n]$) é modelado como uma variável aleatória Gaussiana com média zero e variância σ_x^2 , ou seja, $h_p x[n] \sim \mathcal{N}(0, \sigma_x^2)$. Essa consideração é razoável, pois geralmente não há percurso com linha de visada entre o rádio cognitivo e o rádio primário, e o resultado é que o sinal do rádio primário recebido durante o sensoriamento é uma superposição de várias componentes refletidas do mesmo sinal enviado pelo rádio primário que pode ser modelado como Gaussiano de acordo com o teorema central do limite. Além disso, pode ser facilmente verificado que se $w(t)$ e $h_p x(t)$ são Gaussianas, então $w[n]$ e $h_p x[n]$ também são Gaussianas e tem as mesmas média e variância que $w(t)$ e $h_p x(t)$, respectivamente. Nesse caso, considerando que o sinal do rádio primário é independente do ruído e utilizando o modelo proposto em (2.7), pode-se expressar a média em (2.15) como

$$\mu = \begin{cases} 2U\sigma_w^2, & H_0 \\ 2U(\sigma_w^2 + \sigma_x^2), & H_1. \end{cases} \quad (2.17)$$

Além disso, a função geradora de momentos da distribuição normal [31] pode ser usada para mostrar que $E[|y[n]|^4] = 3\sigma_y^4$. Assim, a variância em (2.16) pode ser escrita como $\sigma^2 = 4U(\sigma_y^2)^2$ ou, para cada hipótese em (2.7), como

$$\sigma^2 = \begin{cases} 4U(\sigma_w^2)^2, & H_0 \\ 4U(\sigma_w^2 + \sigma_x^2)^2, & H_1, \end{cases} \quad (2.18)$$

Portanto, para um grande número de amostras, usando (2.17) e (2.18), a métrica estatística Y é descrita como [19]:

$$Y \sim \begin{cases} \mathcal{N}\left(2U\sigma_w^2, 4U\sigma_w^4\right), & H_0 \\ \mathcal{N}\left(2U\sigma_w^2(1 + \gamma_x), 4U\sigma_w^4(1 + \gamma_x)^2\right), & H_1. \end{cases} \quad (2.19)$$

Com esse resultado o desempenho do detector de energia pode ser avaliado usando as probabilidades de falso alarme e de detecção descritas a seguir [19]:

$$P_f = Q\left(\frac{\lambda - 2U\sigma_w^2}{2\sqrt{U}\sigma_w^2}\right), \quad (2.20)$$

$$P_d = Q\left(\frac{\lambda - 2U\sigma_w^2(1 + \gamma_x)}{2\sqrt{U}\sigma_w^2(1 + \gamma_x)}\right), \quad (2.21)$$

onde $Q(\cdot)$ é a CCDF da variável aleatória normal padrão. Nesse modelo, caso sejam exigidas determinadas P_f e P_d , os respectivos limiares de detecção (λ_f e λ_d) podem ser encontrados invertendo (2.20) e (2.21) da seguinte forma:

$$\lambda_f = 2U\sigma_w^2\left(1 + \frac{Q^{-1}(P_f)}{\sqrt{U}}\right), \quad (2.22)$$

$$\lambda_d = 2U\sigma_w^2(1 + \gamma_x)\left(1 + \frac{Q^{-1}(P_d)}{\sqrt{U}}\right). \quad (2.23)$$

Por fim, o número mínimo de amostras ($N = 2U$) necessários para alcançar determinado desempenho no sensoriamento dada pelas probabilidades P_f e P_d pode ser encontrado igualando os limiares de detecção em (2.22) e (2.23) da seguinte forma [19]:

$$N = 2\left[\frac{(Q^{-1}(P_f) - Q^{-1}(P_d))}{\gamma_x} - Q^{-1}(P_d)\right]^2. \quad (2.24)$$

Apesar de suas vantagens, como simplicidade e baixo custo de implementação, a técnica de sensoriamento baseada em detecção de energia tem sérias limitações. Como observado, essa técnica tem um problema no qual rádios cognitivos só detectam a presença do rádio primário se a energia detectada estiver acima de um certo limiar. Caso um rádio primário esteja operando abaixo desse limiar, ele não será detectado por causa da presença do ruído. Além disso, utilizando apenas a técnica de detecção de energia o rádio cognitivo não será capaz de distinguir o usuário primário de outro usuário secundário, com quem ele pode compartilhar o espectro.

2.3.2 Sensoriamento Baseado em Detecção de Forma de Onda

Em sistemas sem fio é comum o uso de padrões de sinais para diversos propósitos como suporte à sincronização, por exemplo. Dentre estes citam-se, por exemplo, os padrões de preâmbulo e a transmissão de sinais pilotos regulares. Em uma comunicação que utiliza preâmbulo, por exemplo, uma sequência pré-definida é transmitida antes de cada sequência de informação útil. Na presença de um padrão conhecido, o sensoriamento pode ser executado pela correlação do sinal recebido com uma cópia dele mesmo gerada no rádio cognitivo.

Esse método se aplica apenas a sistemas com um padrão conhecido de sinal, e é chamado sensoriamento baseado em detecção de forma de onda, ou sensoriamento coerente. Em [29] é mostrado que o sensoriamento baseado em detecção de forma de onda alcança os resultados do sensoriamento baseado em detecção de energia com maior confiabilidade e tempo de convergência. Além disso, o desempenho do algoritmo de sensoriamento melhora à medida que mais se conhece o sinal.

2.3.3 Sensoriamento Baseado em Detecção Cicloestacionária

A maioria dos sinais de comunicação sem fio pode ser modelado apropriadamente como cicloestacionários devido à periodicidade do sinal ou de seus parâmetros estatísticos, como média e autocorrelação, influenciados por comportamentos operacionais periódicos tais como amostragem e modulação, por exemplo. Devido à sua sutileza, essas periodicidades não são detectadas na função PSD (*Power Spectral Density*). Entretanto, características importantes dessas periodicidades básicas são refletidas na função SCD (*Spectral Correlation Density*). A SCD pode ser obtida pela Transformada de Fourier da função de autocorrelação cíclica (uma generalização da função de autocorrelação).

Com o uso da SCD, os algoritmos de detecção cicloestacionários são capazes de diferenciar o ruído do sinal do usuário primário, pois o ruído é modelado como um processo estocástico estacionário no sentido amplo (WSS - *Wide-Sence Stationary*) e, portanto, sem correlação, enquanto que o sinal modulado é cicloestacionário com correlação espectral devido à redundância na periodicidade do sinal.

2.3.4 Sensoriamento Baseado em Identificação do Transmissor

Caso o rádio cognitivo tenha conhecimento suficiente a respeito da tecnologia de transmissão do rádio primário, é possível chegar a um alto grau de confiabilidade e precisão no sensoriamento do espectro com relação à presença ou não do rádio primário.

Nessa técnica de sensoriamento, supõe-se que o rádio cognitivo seja capaz de identificar algumas características (*features*) do rádio primário, tais como frequência central, banda ocupada, a sequência de espalhamento espectral ou do salto em frequência. A

medida que essas características são identificadas, o rádio cognitivo é capaz de decidir a melhor forma de se utilizar oportunisticamente a faixa de espectro em análise [2].

2.3.5 Sensoriamento por Filtro Casado

Filtro-casado é conhecido como o melhor método para detecção do usuário primário quando as características do sinal transmitido são conhecidas. Sua principal vantagem é o pequeno período de tempo para alcançar satisfatória probabilidade de falso alarme ou de detecção. Entretanto, a técnica de filtro-casado requer que o rádio cognitivo demodule o sinal do rádio primário. Por isso ela exige um perfeito conhecimento da sinalização, largura de banda, frequência de operação, modulação, formato de pulso e de quadro, dentre outras características do rádio primário. Assim, a complexibilidade de implementação dessa técnica para todos os tipos de sinais que o rádio cognitivo se propõe a sensoriar a torna impraticável. Outras desvantagens desse tipo de sensoriamento é o alto consumo de energia, já que exige um alto nível de processamento.

2.3.6 Abordagens para o Sensoriamento do Espectro

No Capítulo 1 foram abordados os grandes desafios do rádio cognitivo, sendo que a maioria deles está relacionada ao sensoriamento do espectro. Mesmo as técnicas mais avançadas e complexas, como o sensoriamento por filtro-casado, ainda deixam margem para falso alarme ou até mesmo para a não detecção. Por esse motivo tem sido propostas outras abordagens para o sensoriamento do espectro, além do tradicional sensoriamento interno, onde o sensoriamento é realizado internamente ao rádio cognitivo.

A primeira abordagem a tratarmos é a do sensoriamento externo [35]. Nesse caso um agente externo realiza o sensoriamento e difunde a informação a respeito da ocupação do canal para todos os rádios cognitivos a seu alcance. A abordagem de sensoriamento externo se propõe a resolver alguns problemas associados com a abordagem interna, como os de consumo de bateria e capacidade de processamento. Como o agente externo pode ser fixo, ele pode estar conectado à rede de energia e estar equipado com os melhores hardwares e softwares possibilitando a realização das mais complexas técnicas de sensoriamento. Além disso, como o rádio cognitivo não perde tempo com sensoriamento do espectro, o tempo de transmissão de dados é maior, como pode ser observado

na Figura 1.5, e a taxa de transmissão do rádio cognitivo é maior, aumentando assim a eficiência espectral do sistema.

Outra abordagem importante é a de sensoriamento do espectro com sinal farol (*beacon*). Para tratar o problema do usuário primário escondido, principalmente daqueles que operam com baixa potência como os sistemas de microfone sem fio e câmera sem fio, o padrão IEEE 802.22 [7] propõe que esses dispositivos periodicamente transmitam sinais *beacon* (farol) com alto nível de potência que permitam os rádios cognitivos detectá-los.

Uma terceira abordagem de sensoriamento do espectro propõe evitar interferências no rádio primário confrontando sua posição com uma base de dados para identificar canais que estejam sendo utilizados por usuários licenciados em sua vizinhança. Esse é o chamado Sensoriamento Geo-Localizado com Banco de Dados [5]. Para que esse tipo de sensoriamento funcione, o dispositivo precisa fazer uma estimativa de sua posição, do erro relacionado a sua posição, além de acessar um banco de dados com as áreas cobertas por usuários licenciados. Conceitualmente, considerando a posição do rádio cognitivo, a precisão dessa posição, a potência de operação e os respectivos níveis de interferência a ela relacionada, o rádio cognitivo seria capaz de delimitar uma área de cobertura não contida em qualquer área de cobertura similar de um rádio primário para que não haja interferências. A Figura 2.4 ilustra um rádio cognitivo (CR) que após realizar o Sensoriamento Geo-Localizado com Banco de Dados, percebe que pode causar interferência sobre o Usuário Primário 2 (PU2), e não sobre o Usuário Primário 1 (PU1), podendo operar na faixa de frequência deste último.

Como pode ser observado na Figura 1.5, uma baixa precisão na determinação de posição do rádio secundário pode acarretar um desperdício de oportunidades de transmissão ou interferências em canais ocupados. Portanto, o método de estimação da posição recebe atenção especial nessa abordagem de sensoriamento do espectro. Para tal propósito, pode ser utilizado o sistema GPS (*global positioning system*), que geralmente é suficientemente preciso e confiável em locais externos. Entretanto, em ambientes internos ou terrenos acidentados, o sinal do satélite pode ser bloqueado, prejudicando a precisão desse sistema e provocando falha na localização do rádio cognitivo. Além disso, o receptor GPS torna o dispositivo não licenciado mais caro. Portanto, o GPS é uma ótima opção para torres externas, mas ainda impõe alguns desafios para dispositivos móveis não licenciados de baixo custo.

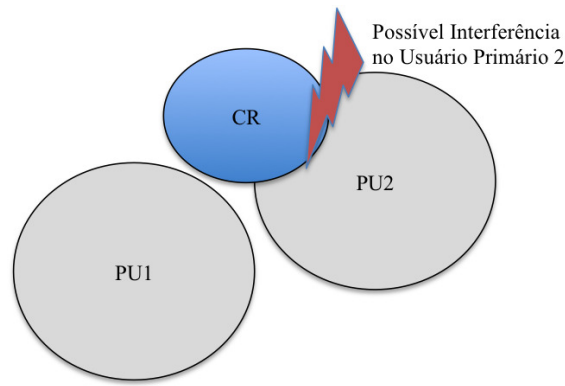


Figura 2.4: Exemplo de Sensoriamento Geo-Localizado com Banco de Dados

2.3.7 Estratégias do Sensoriamento do Espectro

Considerando a Abordagem Interna de sensoriamento do espectro, a estratégia mais simples é a de Sensoriamento Local, que é realizado de forma isolada em cada rádio cognitivo. Entretanto, como visto anteriormente, essa estratégia enfrenta grandes desafios como o do usuário primário escondido, devido ao desvanecimento, e sobretudo ao sombreamento do seu sinal. Nestes casos, estratégias de sensoriamento cooperativo têm sido propostas para solucionar estes problemas, aumentando a probabilidade de detecção e diminuindo consideravelmente a probabilidade de falso alarme. Adicionalmente, a cooperação pode resolver o problema de usuário primário escondido e diminuir o tempo de sensoriamento, aumentando assim a taxa de transmissão do sistema como um todo.

Na estratégia de sensoriamento cooperativo é comum o uso de um canal de controle (canal piloto) para comunicação entre os dispositivos secundários que cooperam com o sensoriamento, ou entre os dispositivos e um centro de fusão. Esse canal de controle pode ser implementado por meio de diferentes métodos [35]: banda dedicada, banda não licenciada como a ISM e sistemas que operam no nível do ruído como o UWB (*Ultra Wide Band*). Dependendo dos requisitos do sistema, um desses métodos pode ser escolhido. Esse canal de controle pode ser usado para compartilhar o resultado de sensoriamento do espectro entre os usuários cognitivos e para compartilhar informações a respeito da disponibilidade e alocação de canais. Entretanto, apenas o canal de controle não é suficiente para realizar a cooperação entre os usuários secundários. O grande desafio do sensoriamento cooperativo está em definir um algoritmo eficiente que permita o compartilhamento ou a fusão de informações coletadas por cada rádio cognitivo.

Em [24] é feito um estudo de esquemas simples de uma rede de dispositivos com sensoriamento baseado em Detecção de Energia com a fusão das informações dos vários usuários modelada por meio de regras OR/AND. Em sistemas de sensoriamento cooperativo utilizando a regra OR, o usuário primário é considerado presente se qualquer um dos rádios cognitivos decidir pela presença do usuário primário. Já na regra AND, todos os rádios cognitivos precisam confirmar a presença do PU para que seja emitida uma decisão final indicando a presença do usuário licenciado. Esse estudo mostra que mesmo com regras simples como essas é possível melhorar a probabilidade de detecção ou a de falso alarme.

As regras de decisão com base nas informações do sensoriamento cooperativo podem ser tomadas de duas maneiras [35]: centralizada ou distribuída. No sensoriamento cooperativo centralizado, uma unidade central coleta informações de sensoriamento dos dispositivos cognitivos e decide com relação à presença do rádio primário. Já no sensoriamento distribuído os dispositivos trocam informações entre si a respeito do sensoriamento realizado, porém cada um toma sua própria decisão com relação à utilização do espectro e à presença do rádio primário.

2.3.8 Arquiteturas do Sensoriamento do Espectro

O sensoriamento do espectro pode ainda ser classificado conforme sua arquitetura, que pode ser composta de rádio único ou de rádio duplo. Na arquitetura de rádio único existe apenas um dispositivo responsável pelo sensoriamento do espectro e por transmitir os dados envolvidos na comunicação oportunista. Uma certa parcela do tempo é reservada para o sensoriamento das bandas desejadas e outra parcela do tempo é destinada à transmissão, como ilustrado na Figura 1.5. Sua principal vantagem é a simplicidade e o baixo custo, por requerer apenas um sistema de rádio. Entretanto, por ter que dividir o tempo entre o sensoriamento e a transmissão, essa arquitetura tem a grande desvantagem de limitar a duração do sensoriamento e, conseqüentemente, sua precisão. Além disso, apresenta baixa eficiência espectral, pois não utiliza o espectro o máximo possível para transmissão de dados. Para resolver esse problema foi proposta a arquitetura de rádio duplo [35]. Como o próprio nome sugere, são necessários dois rádios: um deles exclusivo para realizar o sensoriamento do espectro, enquanto o outro é dedicado para a transmissão e recepção de dados. Essa arquitetura resolve a ineficiência observada na arquitetura de rádio único, mas exige maior complexibilidade do hardware e maior consumo de energia, o que a torna mais cara. Além disso, essa arquitetura,

por si só, não resolve o problema do usuário primário escondido.

2.4 ANÁLISE DO ESPECTRO

Após realizar o sensoriamento do espectro, o próximo passo do ciclo cognitivo (Figura 2.1) é a atividade de análise do espectro, que é responsável por compreender e caracterizar as oportunidades disponíveis para transmissão na rede de rádio cognitivo. A caracterização das bandas de espectro disponíveis poderão ser utilizadas pelo rádio cognitivo para atingir as demandas de tráfego exigidas pelo usuário secundário. Nesse sentido a caracterização do espectro não deve considerar apenas a variação temporal do ambiente de rádio, mas também o comportamento do usuário primário e informações como frequência de operação e largura de banda, além de outros parâmetros tais como nível de interferência aceitável, taxa de erro do canal, perda de percurso, atraso no link, e *Holding Time*. Esses parâmetros podem representar a qualidade de uma banda de espectro em particular, e são detalhados a seguir [1]:

- *Nível de Interferência*: Algumas faixas de frequência são mais ocupadas que outras e, por esse motivo, essas faixas de frequências são mais sensíveis à presença do rádio cognitivo e à possível interferência que ele pode causar. A partir do nível de interferência aceitável pela rede do rádio primário, pode-se definir a potência permitida para operação do usuário cognitivo, que será utilizada para calcular a capacidade do canal.
- *Perda de Percurso*: Esse parâmetro aumenta em função da frequência de operação. Assim, se a potência de transmissão do rádio cognitivo permanece a mesma, então seu alcance na transmissão diminui a medida que a frequência aumenta. Uma solução seria aumentar a potência do usuário secundário, entretanto essa estratégia aumenta a interferência na rede dos usuários primários.
- *Taxa de Erro do Canal*: A taxa de erro do canal varia dependendo do esquema de modulação, e codificação, e da relação sinal-ruído em determinada banda do espectro. Esse parâmetro deve ser monitorado para evitar retransmissão de dados nas camadas superiores e otimizar o desempenho da rede de rádios cognitivos como um todo.
- *Atraso no Link*: Para gerenciar diferentes perdas de percurso, taxa de erro do canal e níveis de interferência, diferentes tipos de protocolos na camada física são

exigidos em diferentes bandas do espectro, o que resultam em diferentes atrasos na transmissão dos pacotes e consequente variação na taxa de transmissão.

- *Holding Time*: A atividade do usuário primário pode afetar a qualidade do canal na rede. O Tempo de espera está relacionado ao intervalo de tempo que o rádio cognitivo pode ocupar uma banda licenciada sem interromper a transmissão. Obviamente, quanto maior o *Holding Time* melhor a capacidade de transmissão experimentada pelo rádio cognitivo.

A SNR é o principal parâmetro utilizada para o cálculo da capacidade do canal. Porém, como a SNR considera apenas a observação local do rádio cognitivo, esta não é suficiente para evitar interferência no usuário primário. Por isso, a análise do espectro busca caracterizar o canal com base nos demais parâmetros apresentados acima para garantir maior proteção ao usuário primário e maior capacidade do canal na rede de rádios cognitivos.

Em [33] um método de estimação da capacidade do canal (C) foi proposto considerando a largura de banda (B) do canal, a potência de transmissão máxima aceitável do rádio cognitivo (S), a potência do ruído (N) e a potência da interferência recebida no rádio cognitivo devido ao usuário licenciado (I), que, segundo a formulação tradicional, pode ser obtida da seguinte forma:

$$C = B \log \left(1 + \frac{S}{N + I} \right) \quad (2.25)$$

2.5 GERENCIAMENTO DO ESPECTRO

Nas redes de rádio cognitivo, as bandas não utilizadas provavelmente estarão espalhadas em várias faixas de frequências separadas, incluindo aquelas licenciadas e não licenciadas. Neste cenário, o rádio cognitivo tem como meta principal conseguir utilizar da melhor forma possível o espectro disponível. Para tanto, o último estágio do ciclo cognitivo (Figura 2.1), que é o gerenciamento do espectro, recebe dos estágios anteriores informações de sensoriamento do espectro e de capacidade do canal que permitam uma tomada de decisão quanto à necessidade de mudar ou não de faixa de frequência. A Figura 2.5 ilustra um cenário em que o sensoriamento do espectro de um rádio cognitivo identifica duas faixas de frequência vazias. Nesse caso, a etapa de análise

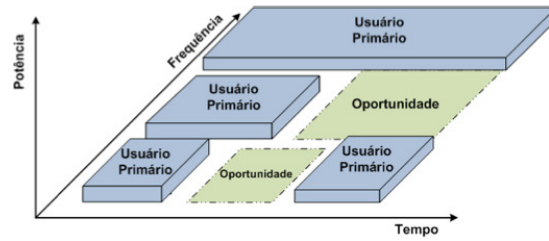


Figura 2.5: Exemplo de Oportunidades de Transmissão [2]

do espectro calcularia a capacidade do canal para cada uma dessas oportunidades e, por fim, o gerenciamento do espectro tomaria a decisão de transmitir na melhor faixa de frequência considerando a capacidade do canal e o nível de interferência que seria gerado no usuário primário.

O gerenciamento do espectro é o responsável pela Capacidade de Reconfiguração do rádio cognitivo, por meio da qual ele é capaz de ajustar seus parâmetros de transmissão sem interromper a transmissão e sem a necessidade de qualquer modificação no hardware. Assim, o gerenciamento do espectro deve ser capaz de mudar sua frequência de operação, técnica de modulação e potência de transmissão a qualquer momento durante a transmissão, com o propósito de manter a maior taxa de transmissão possível dentro dos níveis de interferência permitidos.

Uma vez que as bandas do espectro disponível foram caracterizadas, a faixa de frequência apropriada pode ser selecionada para a transmissão considerando os requisitos de qualidade de serviço (QoS) do usuário, tais como: taxa de transmissão, limites de atraso, modo de transmissão e largura de banda.

O processo em que o rádio cognitivo muda sua frequência de operação é conhecido com mobilidade no espectro. Esse processo é realizado quando as condições do canal corrente utilizado para transmissão se tornam pior que outro ou quando um usuário primário surge nesse canal. O principal desafio do Gerenciamento do espectro é realizar a mobilidade no espectro da forma mais suave possível, evitando degradação de desempenho [33].

2.6 SUMÁRIO

Neste capítulo foram apresentadas as principais características da proposta rádio cognitivo. Foram analisadas as etapas relevantes do chamado ciclo cognitivo, com ênfase dada ao sensoriamento do espectro devido à sua importância no estabelecimento da solução rádio cognitivo.

Foram apresentadas as principais linhas de pesquisa na área de sensoriamento do espectro, com um enfoque na técnica baseada em detecção de energia, a qual servirá de base para os estudos realizados nos próximos capítulos. Além disso, também foram analisadas as principais abordagens, estratégias e arquiteturas de sensoriamento do espectro.

3 SENSORIAMENTO PARALELO À TRANSMISSÃO

3.1 INTRODUÇÃO

No Capítulo 1 deste trabalho observou-se que, dentre várias outras dificuldades, o rádio cognitivo enfrenta o desafio de conciliar a transmissão de dados sem interferir no rádio primário, dividindo seu tempo entre a transmissão e o sensoriamento do espectro. Como foi visto, os usuários primários podem transmitir a qualquer momento e o rádio cognitivo deve ser capaz de identificar sua presença o mais rápido possível, disponibilizando a faixa de frequência imediatamente caso o primário retorne e interferindo o mínimo possível no rádio licenciado. Essa exigência impõe um limite mínimo no desempenho do método de sensoriamento em termos do tempo de sensoriamento e do tempo de transmissão de dados.

Esse desafio de conciliar transmissão e sensoriamento é mais acentuado na arquitetura de rádio único, em que existe apenas um dispositivo responsável pelo sensoriamento do espectro e por transmitir os dados envolvidos na comunicação oportunista. Nessa arquitetura, uma certa parcela do tempo é reservada para o sensoriamento das bandas desejadas, e outra parcela do tempo é destinada à transmissão. Como foi exposto anteriormente, essa arquitetura tem duas grandes desvantagens: a limitação na precisão do sensoriamento e a baixa eficiência espectral devido à sua relação inversa com o tempo de sensoriamento, conforme (1.1). A Figura 3.1 ilustra uma situação hipotética em que o rádio cognitivo é utilizado para transmitir em uma arquitetura de rádio único. Nessa situação, o rádio cognitivo realiza o sensoriamento do espectro durante o período de sensoriamento, aqui chamado T_{sens} , até o instante de tempo T_1 quando decide que o Canal $Ch.1$ está disponível e nele inicia a transmissão. A transmissão dura T_{Dados} até o instante T_2 , quando o rádio para a transmissão e realiza mais um sensoriamento de duração T_{sens} e detecta que os canais $Ch.2$ e $Ch.3$ estão desocupados, iniciando mais uma transmissão em T_3 .

Como ilustrado na Figura 3.1, não fica difícil perceber a ineficiência espectral do rádio cognitivo. Nessa situação, observa-se que entre os instantes T_0 e T_1 o canal $Ch.1$ está livre, e entre o instante T_2 e T_3 os canais $Ch.2$ e $Ch.3$ estão disponíveis para o uso oportuno, entretanto, em ambos os casos o rádio cognitivo não transmite pois está realizando o sensoriamento do espectro. Neste trabalho, este modo de operação é tratado com *Sensoriamento Serial à Transmissão*, pois o sensoriamento do espectro e

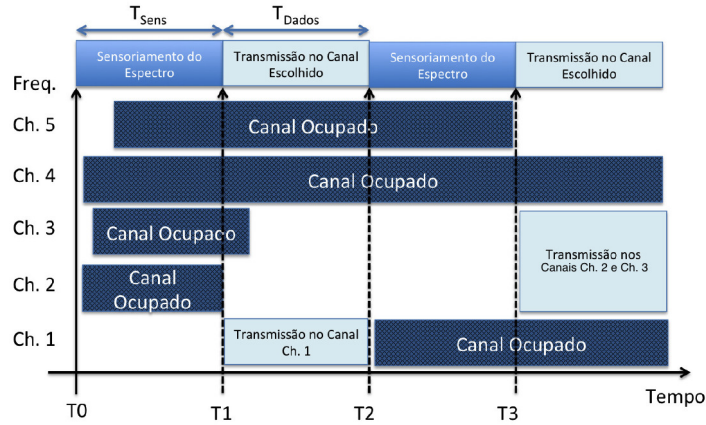


Figura 3.1: Modo de Sensoriamento Serial

a transmissão são realizados de forma serial no domínio do tempo.

Muitos estudos têm sido desenvolvidos [8,12,32,36] com o propósito de otimizar o tempo de sensoriamento e maximizar a taxa de transmissão do rádio cognitivo para uma dada restrição de interferência na rede de rádio primário. Entretanto, nesses estudos, a eficiência do rádio cognitivo é limitada pela exigência de que a transmissão de dados seja interrompida periodicamente para que o sensoriamento do espectro seja realizado. Para resolver esse problema de ineficiência espectral têm sido propostas técnicas de sensoriamento do espectro paralelo à transmissão de dados. Neste capítulo é estudado o conceito por trás dessas técnicas e é proposta uma nova técnica de sensoriamento paralelo do espectro que permite detectar a presença do rádio primário mesmo quando outros rádios cognitivos estão transmitindo na mesma banda sob sensoriamento e no mesmo intervalo de tempo.

3.2 SENSORIAMENTO PARALELO FORA DA BANDA DE TRANSMISSÃO

Para evitar essas interrupções periódicas no modo de operação com *Sensoriamento Serial* e melhorar a eficiência espectral do rádio cognitivo, alguns estudos [15,16,25,34] têm proposto técnicas de sensoriamento do espectro a serem realizadas de forma paralela à transmissão do rádio cognitivo, utilizando para tanto uma arquitetura de rádio duplo. Nessa proposta de sensoriamento existe um rádio dedicado para realizar o sensoriamento do espectro e outro exclusivo para a transmissão e recepção de dados. Enquanto um rádio está transmitindo o outro realiza o sensoriamento de forma simultânea em outras faixas de frequência à procura de outros canais disponíveis para transmissão.

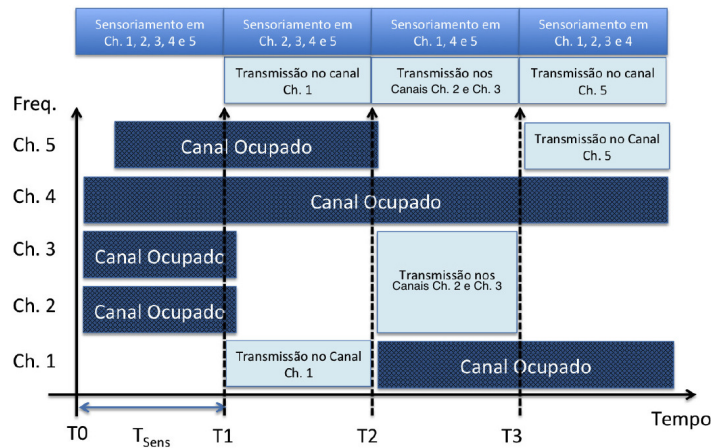


Figura 3.2: Modo de Sensoriamento Paralelo fora da Banda de Transmissão do Rádio Cognitivo

Nesse modelo o sensoriamento não pode ser realizado na banda de operação do rádio cognitivo, pois este não é capaz de transmitir e sensoriar ao mesmo tempo na mesma faixa de frequência. Por isso, esse método é conhecido como *Sensoriamento Fora da Banda de Transmissão (out-of-band sensing)*.

A Figura 3.2 ilustra o modo de operação do Sensoriamento Paralelo Fora da Banda de Transmissão. No exemplo dessa figura considera-se um rádio cognitivo com arquitetura de rádio duplo capaz de sensoriar até 5 canais. Entre os instantes T_0 e T_1 o rádio cognitivo inicia sua operação com o sensoriamento do espectro à procura de uma oportunidade nos canais de 1 a 5 para sua primeira transmissão, de forma similar ao modo de operação com sensoriamento serial à transmissão. Decorrido esse período de sensoriamento, o rádio cognitivo decide que o canal $Ch.1$ é sua melhor oportunidade e inicia a transmissão nesse canal. A partir daí, de forma paralela à transmissão no canal $Ch.1$, o equipamento também realiza o sensoriamento nos canais $Ch.2$, $Ch.3$, $Ch.4$ e $Ch.5$ entre os instantes T_1 e T_2 . Finalizado esse período de sensoriamento, o rádio cognitivo decide que os canais $Ch.2$ e $Ch.3$ estão livres e muda sua banda de transmissão para esses canais. Novamente, dessa vez entre os instantes T_2 e T_3 , o rádio secundário realiza de forma paralela a transmissão e o sensoriamento do espectro. Porém, como o rádio cognitivo não é capaz de sensoriar o mesmo canal em que transmite, não percebe que os canais $Ch.2$ e $Ch.3$ estão livres e, após o instante T_3 , ele é obrigado a abandonar esses canais e passa a transmitir no canal $Ch.5$. Nesse caso hipotético percebe-se o ganho na eficiência de transmissão em relação ao modo de sensoriamento serial, pois não há mais necessidade de interrupção na transmissão do rádio cognitivo para que seja realizado o sensoriamento do espectro entre os instantes T_2 e T_3 .

Um método de sensoriamento paralelo à transmissão chamado DFH (*Dynamic Frequency Hopping*) ficou muito conhecido por ser adotado pelo padrão IEEE 802.22 [15]. No método DFH, durante a transmissão do rádio cognitivo no canal de operação, o sensoriamento é realizado em paralelo em outros canais. Após o período CDT (*Channel Detection Time*), definido no padrão IEEE 802.22 [7] como o período em que o rádio primário suporta interferência do rádio secundário, o rádio cognitivo muda o canal de operação para o melhor canal recentemente sensoriado, e a banda anteriormente utilizada é liberada. Assim, enquanto houver canais disponíveis para que seja realizado o salto após o sensoriamento, não há necessidade de interrupção na transmissão do rádio cognitivo [15].

3.3 SENSORIAMENTO PARALELO NA BANDA DE TRANSMISSÃO

Apesar dos avanços do sensoriamento paralelo em relação ao sensoriamento serial, alguns problemas de eficiência no uso do espectro ainda persistem. O problema mais evidente é que essa solução exige ao menos dois canais disponíveis para que não haja interrupção na transmissão. Porém, em certas situações essa exigência pode não ser atendida devido ao problema de escassez espectral que é um dos principais motivadores da proposta de rádio cognitivo. Além disso, pode acontecer de o rádio cognitivo ser forçado a vagar uma banda de frequência que seria sua melhor oportunidade de transmissão para operar em um canal pior sem a necessidade dessa migração, como descrito anteriormente em relação ao instante de tempo T_3 da Figura 3.2.

Diante dessa análise, fica fácil perceber que o problema de eficiência do sensoriamento do espectro, tanto em modo serial quanto paralelo, surge da exigência imposta ao rádio cognitivo de que um canal sendo sensoriado não pode ser utilizado para transmissão, e vice versa. Em outras palavras, sempre que uma faixa de frequência permanecer inutilizada devido à necessidade de sensoriamento do espectro, será observado o problema de ineficiência do sensoriamento. A origem desse problema está no fato de que, nas propostas de rádio cognitivo tradicionais, o sensoriamento do espectro têm sido tratado como um problema convencional de detecção de sinal [18] sem nenhuma adaptação relacionada aos objetivos da rede de rádio cognitivo. Assim sendo, como os métodos convencionais de detecção de sinal não foram modelados para tratar o reuso oportunista do espectro, os modelos de sensoriamento tradicionalmente adotados tendem a degradar tanto a capacidade de transmissão quanto a próprio desempenho do sensoriamento nas redes de rádio cognitivo .

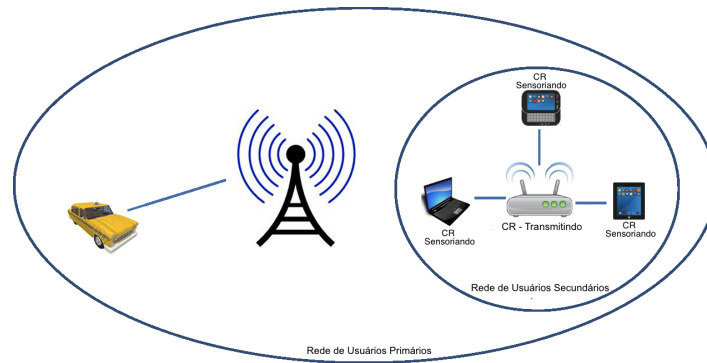


Figura 3.3: Modo de Sensoriamento Paralelo na Banda de Transmissão

Por esse motivo, é proposta neste trabalho uma adaptação na técnica tradicional de detecção de energia que considera o reuso oportunista das faixas de frequência sob sensoriamento. Com essa adaptação o rádio cognitivo é capaz de decidir a respeito da presença do usuário primário, mesmo que a banda de frequência sob sensoriamento esteja sendo simultaneamente utilizada para transmissão por outro usuário secundário. Esse cenário é ilustrado na Figura 3.3, onde uma rede de rádio cognitivo se beneficia das oportunidades de transmissão de uma rede licenciada de rádio-taxi. Nesse exemplo o ponto de acesso pode continuar transmitindo de forma oportunista até que os demais dispositivos da rede de usuários secundários decidam com relação à presença do sinal do rádio primário, ou até que tenha finalizado sua transmissão. Essa análise se aplica também aos outros dispositivos da rede, ou seja, quando um dos dispositivo móveis estiver transmitindo os demais estarão sensoriando o espectro, e essa transmissão pode durar até que seja detectada a presença do rádio primário.

Nessa proposta, como a tarefa de sensoriamento não é realizada no dispositivo que usa o canal para transmissão, não há mais a necessidade de interrupção do sensoriamento para realização da transmissão e vice-versa. Além disso, é demonstrado que para sensoriar o espectro dessa forma, o rádio cognitivo necessita apenas da informação adicional a respeito da SNR do sinal dos usuários secundários recebido na faixa de frequência sob sensoriamento, e não é necessária nenhuma alteração no *hardware* do detector de energia convencional.

3.3.1 O modelo proposto para o sensoriamento o espectro

Nesta sessão é apresentada uma proposta de adaptação do modelo de detecção de energia que considera a presença do sinal de um usuário secundário na faixa de frequência

sob sensoriamento. Para tanto, adotam-se as considerações feitas na Seção 2.3.1. Adicionalmente, para simplificar a análise, assume-se que o sinal do rádio cognitivo transmissor ($s(t)$) é determinístico e independente do sinal do usuário primário e do ruído.

Uma vez que se considera a presença do sinal de um usuário secundário na faixa sob sensoriamento, a seguinte formulação é proposta para o sinal recebido pelo detector de energia:

$$y[n] = \begin{cases} w[n] + h_s s[n], & H_0 \\ w[n] + h_p x[n] + h_s s[n], & H_1, \end{cases} \quad (3.1)$$

onde $w[n]$ é a n -ésima amostra do ruído $w(t)$, $x[n]$ é a n -ésima amostra do sinal do usuário primário $x(t)$, h_p é o ganho instantâneo do canal entre o usuário primário e o rádio cognitivo receptor que realiza o sensoriamento, $s[n]$ é a n -ésima amostra do sinal do rádio cognitivo transmissor $s(t)$ e h_s é o ganho instantâneo do canal entre o rádio cognitivo transmissor e o receptor que realiza o sensoriamento.

Considerando o mesmo *hardware* do detector de energia analisado na Seção 2.3.1, pode-se substituir o modelo de sinal em (3.1) na formulação para a métrica de decisão Y em (2.6). Na hipótese H_0 , a métrica de decisão segue a seguinte forma:

$$Y = \sum_{n=1}^{2U} \left| \frac{w[n] + h_s s[n]}{\sigma_w} \right|^2. \quad (3.2)$$

Em (3.2) tem-se a soma do quadrado de variáveis aleatórias normais independentes com variância unitária e média deslocada por $h_s s[n]$. Por isso, a métrica de decisão segue uma distribuição qui-quadrada não centralizada [31] com $2U$ graus de liberdade, e parâmetro de não-centralidade ψ_0 dado por:

$$\psi_0 = \sum_{n=1}^{2U} \left| \frac{h_s s[n]}{\sigma_w} \right|^2,$$

que pode ser obtido como segue:

$$\begin{aligned} \psi_0 &= \frac{1}{N_0} \int_0^T (h_s s(t))^2 dt \\ &= \frac{E_s}{N_0} \\ &= 2\gamma_s. \end{aligned} \quad (3.3)$$

onde γ_s é a relação sinal-ruído do sinal do rádio cognitivo transmissor observada durante o período de sensoriamento no rádio cognitivo receptor. Assim, a métrica de decisão Y , na hipótese H_0 , pode ser escrita na forma simplificada como $\chi_{2U}^2(2\gamma_s)$.

Por outro lado, se o sinal do usuário primários está presente na banda sob sensoriamento, e se for definido $c[n] = h_x x[n] + h_s s[n]$, a métrica de decisão pode ser formulada como:

$$Y = \sum_{n=1}^{2U} \left| \frac{w[n] + c[n]}{\sigma_w} \right|^2. \quad (3.4)$$

Novamente observa-se a soma do quadrado de variáveis aleatórias normais independentes com variância unitária e média deslocada por $c[n]$. Então a métrica de decisão segue uma distribuição qui-quadrada não centralizada com $2U$ graus de liberdade, mas, desta vez, o parâmetro de não-centralidade ψ_1 é dado por:

$$\psi_1 = \sum_{n=1}^{2U} \left| \frac{h_x x[n] + h_s s[n]}{\sigma_w} \right|^2,$$

que resulta em $\psi_1 = 2(\gamma_x + \gamma_s)$.

Portanto, se o sinal do usuário secundário está presente na banda sob sensoriamento, a métrica de decisão utilizada no sensoriamento do espectro pode ser modelada como:

$$Y \sim \begin{cases} \chi_{2U}^2(2\gamma_s), & H_0 \\ \chi_{2U}^2(2(\gamma_x + \gamma_s)), & H_1, \end{cases} \quad (3.5)$$

O resultado obtido em (3.5) difere daquele encontrado na análise do sensoriamento tradicional do espectro em (2.10) simplesmente no deslocamento das distribuições qui-quadradas devido à presença do sinal do rádio secundário na faixa de frequência sob sensoriamento. Por esse motivo, a decisão quanto à presença do rádio primário continua sendo realizada com base em um teste de hipóteses comparando a métrica de decisão Y com um limiar λ . Em um ambiente hipotético sem desvanecimento, onde h_p e h_s são determinísticos, as probabilidades P_d e P_f podem ser encontradas utilizando a CCDF da distribuição qui-quadrada não centralizada, como segue:

$$P_f = P\{Y > \lambda | H_0\} = Q_U(\sqrt{2\gamma_s}, \sqrt{\lambda}), \quad (3.6)$$

$$P_d = P\{Y > \lambda | H_1\} = Q_U(\sqrt{2(\gamma_x + \gamma_s)}, \sqrt{\lambda}), \quad (3.7)$$

onde $Q_m(.,.)$ é a função de Marcum-Q generalizada detalhada em (2.13).

Um simples teste pode ser feito para conferir a consistência do modelo proposto: se não há sinal do rádio cognitivo na banda de sensoriamento ($\gamma_s = 0$), a métrica estatística em (3.5) se torna a mesma do modelo tradicional de sensoriamento do espectro em (2.10).

Dessa forma, concluímos que o mesmo hardware de detecção de energia tradicional, mesmo os mais simples como o mostrado na Figura 2.3, até os mais complexos com o uso de FFT (*Fast Fourier Transform*), pode ser utilizado para a detecção do rádio primário considerando a presença de um sinal de um rádio secundário que ocupa a faixa sob sensoriamento de forma oportunista, tornando desnecessária a interrupção da transmissão do rádio cognitivo para que seja realizado o sensoriamento do espectro.

3.3.2 Aproximação para um grande número e amostras

Assim como observado anteriormente na Seção 2.3.1, a modelagem utilizando a distribuição qui-quadrada é apropriada a sensoriamento com um pequeno número de amostras e para detecção de sinais determinísticos. Nesta seção assume-se que o número de amostras ($N = 2U$) é grande o suficiente que permita a utilização do teorema central do limite (CLT) para aproximar a métrica estatística Y como uma variável aleatória normal do tipo ($Y \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$), onde a média (μ) e variância (σ^2) podem ser formuladas utilizando (2.14) como demonstrado a seguir. Para tanto, assume-se que o sinal recebido do rádio cognitivo ($h_s s[n]$) é uma variável aleatória Gaussiana com média zero e variância σ_s^2 . Além disso, considera-se também que $y[n]$ é uma variável aleatória normal i.i.d. com média zero e variância $E[|y[n]|^2] = \sigma_y^2$ [20],

Utilizando o modelo proposto em (3.1), e a equação (2.15), pode-se expressar a média dessa variável aleatória normal como segue:

$$\mu = \begin{cases} 2U(\sigma_w^2 + \sigma_s^2), & H_0 \\ 2U(\sigma_w^2 + \sigma_x^2 + \sigma_s^2), & H_1. \end{cases} \quad (3.8)$$

Além disso, como vimos na Seção 2.3.1, a variância dessa variável aleatória pode ser escrita como $\sigma^2 = 4U(\sigma_y^2)^2$, e, para cada hipótese em (3.1), utilizando a equação (2.16), pode ser formulada como segue:

$$\sigma^2 = \begin{cases} 4U(\sigma_w^2 + \sigma_s^2)^2, & H_0 \\ 4U(\sigma_w^2 + \sigma_x^2 + \sigma_s^2)^2, & H_1, \end{cases} \quad (3.9)$$

Portanto, para um grande número de amostras, e assumindo a presença do sinal de um rádio cognitivo na banda sob sensoriamento, os resultados em (3.8) e (3.9) podem ser utilizados para escrever a métrica de decisão Y da seguinte forma:

$$Y \sim \begin{cases} \mathcal{N}\left(2U\sigma_w^2(1 + \gamma_s), 4U\sigma_w^4(1 + \gamma_s)^2\right), & H_0 \\ \mathcal{N}\left(2U\sigma_w^2(1 + \gamma_x + \gamma_s), 4U\sigma_w^4(1 + \gamma_x + \gamma_s)^2\right), & H_1, \end{cases} \quad (3.10)$$

Usando essa formulação e a CCDF da distribuição normal, as probabilidades de falso alarme (P_f) e de detecção (P_d) podem ser obtidas como segue:

$$P_f = Q\left(\frac{\lambda - 2U\sigma_w^2(1 + \gamma_s)}{2\sqrt{U}\sigma_w^2(1 + \gamma_s)}\right), \quad (3.11)$$

$$P_d = Q\left(\frac{\lambda - 2U\sigma_w^2(1 + \gamma_x + \gamma_s)}{2\sqrt{U}\sigma_w^2(1 + \gamma_x + \gamma_s)}\right). \quad (3.12)$$

Os limiares de detecção λ_f e λ_d podem ser encontrados para valores fixos de P_f e P_d invertendo as equações (3.11) e (3.12) da seguinte forma:

$$\lambda_f = 2U\sigma_w^2(1 + \gamma_s)\left(1 + \frac{Q^{-1}(P_f)}{\sqrt{U}}\right), \quad (3.13)$$

$$\lambda_d = 2U\sigma_w^2(1 + \gamma_x + \gamma_s)\left(1 + \frac{Q^{-1}(P_d)}{\sqrt{U}}\right). \quad (3.14)$$

Igualando λ_f e λ_d , encontra-se o número mínimo de amostras ($N = 2U$) exigidos para satisfazer determinados valores de P_f e P_d , resultando em:

$$N = 2\left[\frac{(1 + \gamma_s)(Q^{-1}(P_f) - Q^{-1}(P_d))}{\gamma_x} - Q^{-1}(P_d)\right]^2. \quad (3.15)$$

Comparando a equação (3.15) com aquela do modelo tradicional em (2.24), observa-se que a presença do sinal do rádio secundário na faixa de frequência sob sensoriamento

degrada o desempenho do sensoriamento do espectro. Isso porque quanto maior a SNR do sinal do rádio secundário (γ_s) maior o número de amostras (e conseqüentemente o tempo) necessário para que o sensoriamento do espectro atinja as mesmas probabilidades P_f e P_d que seriam alcançadas no modelo tradicional de sensoriamento do espectro. Entretanto, mesmo que o desempenho do sensoriamento proposto seja pior para um mesmo tempo de sensoriamento, o modelo proposto tem a vantagem de poder sensoriar o espectro por um tempo maior de observação, já que não é necessário interromper o sensoriamento do espectro para realizar a transmissão. Portanto, com um tempo de sensoriamento suficientemente grande pode-se atingir probabilidades de falso alarme e detecção bem melhores do que o modelo tradicional.

Entretanto, mesmo que quaisquer P_f e P_d possam ser alcançadas com um número suficientemente grande de amostras, o tempo de sensoriamento ($T = \frac{N}{2B}$) geralmente é limitado pelo período CDT, e, uma vez que o número de amostras é limitado, o desempenho do sistema é limitada pela SNR do rádio cognitivo (γ_s). Portanto, para preservar o desempenho do sensoriamento do espectro em um dado período CDT, é definida a máxima SNR do rádio cognitivo (γ_s^{max}) em função do período máximo de sensoriamento ($T^{max} = CDT$). Esse valor pode ser obtido invertendo (3.15) e fazendo $N = 2BT^{max}$, da seguinte forma:

$$\gamma_s^{max} = \frac{(\sqrt{BT^{max}} + Q^{-1}(P_d))\gamma_x}{Q^{-1}(P_f) - Q^{-1}(P_d)} - 1. \quad (3.16)$$

Finalmente, definimos a Relação de Potência Secundário-Primário (δ) como a relação entre a potência do sinal recebido do usuário secundário e a potência do sinal recebido do usuário primário suportada pelo modelo de sensoriamento do espectro proposto. Essa relação pode ser escrita como uma função das relações sinal-ruído dos sinais dos usuários primário e secundário ($\delta = \frac{\gamma_s^{max}}{\gamma_x}$), e pode ser formulada a partir de (3.16) como segue

$$\delta = \frac{(\sqrt{BT^{max}} + Q^{-1}(P_d))}{Q^{-1}(P_f) - Q^{-1}(P_d)} - \frac{1}{\gamma_x}. \quad (3.17)$$

As formulações em (3.5) e (3.10) permitem o rádio cognitivo sensoriar o espectro e decidir a respeito da presença do usuário primário mesmo que outro rádio cognitivo esteja simultaneamente transmitindo na mesma banda sob sensoriamento, desde que respeitados os limites na SNR do rádio cognitivo transmissor dadas por (3.16) ou por

(3.17). Comparando esses resultados com aqueles do modelo convencional de sensoriamento do espectro em (2.10) e (2.19), observa-se que, para sensoriar o espectro dessa forma, o rádio cognitivo só precisa da informação adicional da SNR do sinal do usuário secundário (γ_s) que transmite simultaneamente na faixa de frequência sob sensoriamento. Essa informação da SNR do sinal do usuário secundário pode ser obtida utilizando canais de controle (ou canal piloto) [35].

3.3.3 Modelo Geral e Sensoriamento do Espectro

O modelo apresentado até então considera apenas um rádio secundário transmitindo de forma oportunista na faixa de frequência sob sensoriamento. Apesar de esse cenário ser possível quando utilizada a técnica de múltiplo acesso TDMA (*Time Division Multiple Access*) e OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), é comum também a utilização de outras técnicas de múltiplo acesso em que vários usuários podem estar transmitindo durante o período de sensoriamento, como CDMA (*Code Division Multiple Access*) por exemplo. Nesta seção, o modelo proposto é reformulado prevendo que vários usuários possam estar transmitindo, simultaneamente, na banda sob sensoriamento.

Dessa forma, considerando que M rádios cognitivos transmitam de forma oportunista enquanto o sensoriamento do espectro é realizado na mesma banda de transmissão, o sinal recebido no detector de energia pode ser formulado como segue:

$$y[n] = \begin{cases} w[n] + \sum_{i=1}^M h_i s_i[n], & H_0 \\ w[n] + h_p x[n] + \sum_{i=1}^M h_i s_i[n], & H_1, \end{cases} \quad (3.18)$$

onde h_i é o ganho instantâneo do canal entre o i -ésimo rádio cognitivo transmissor e o rádio cognitivo sensoriamento, e $s_i[n]$ é a n -ésima amostra do sinal do i -ésimo rádio cognitivo transmissor. Utilizando (2.6), sob as mesmas considerações feitas anteriormente, e considerando adicionalmente que os sinais dos rádios cognitivos são independentes entre si, para um pequeno número de amostras pode-se verificar que

$$Y \sim \begin{cases} \chi_{2U}^2(2 \sum_{i=1}^M \gamma_i), & H_0 \\ \chi_{2U}^2(2(\gamma_x + \sum_{i=1}^M \gamma_i)), & H_1, \end{cases} \quad (3.19)$$

onde γ_i é a relação sinal-ruído do sinal do i -ésimo rádio cognitivo observado durante o período de sensoriamento. Por outro lado, se o número de amostras for suficientemente

grande, seguindo os mesmos passos descritos anteriormente, pode ser demonstrado que

$$Y \sim \begin{cases} \mathcal{N}\left(2U\sigma_w^2(1 + \sum_{i=1}^M \gamma_i), 4U\sigma_w^4(1 + \sum_{i=1}^M \gamma_i)^2\right), & H_0 \\ \mathcal{N}\left(2U\sigma_w^2(1 + \gamma_x + \sum_{i=1}^M \gamma_i), 4U\sigma_w^4(1 + \gamma_x + \sum_{i=1}^M \gamma_i)^2\right), & H_1. \end{cases} \quad (3.20)$$

Comparando (3.19) com (3.5), e (3.20) com (3.10), observa-se que a formulação para o cenário com múltiplos rádios cognitivos transmitindo simultaneamente ao sensoriamento do espectro é uma generalização do modelo de sensoriamento estudado anteriormente para apenas um rádio cognitivo transmissor. Em outras palavras, se substituirmos γ_s por $\sum_{i=1}^M \gamma_i$ em (3.6), (3.11), (3.7), (3.11), (3.13), (3.14) e (3.15), pode-se facilmente obter as respectivas P_f , P_d , λ_f , λ_d e N para o modelo generalizado de sensoriamento do espectro.

3.4 VALIDAÇÃO DO MODELO PROPOSTO DE SENSORIAMENTO DO ESPECTRO

A medida clássica para análise do desempenho do sensoriamento do espectro em redes de rádio cognitivo é a chamada curva de Característica Operacionais do Receptor - ROC (*Receiver Operating Characteristic*) [30], ou, de forma alternativa, sua curva complementar [9]. A curva ROC expressa P_d versus P_f , enquanto que a curva ROC complementar expressa a probabilidade de detecção perdida (*missed detection probability*: $P_m = 1 - P_d$) versus P_f . A Figura 3.4 compara o desempenho entre o modelo tradicional de sensoriamento do espectro e o modelo proposto. A curva ROC complementar é traçada para ambos os casos considerando a técnica de detecção de energia. A abordagem utilizada é a de um pequeno número de amostras ($N = 2U = 10$) com uma SNR do sinal do usuário primário de 10 dB. Para o modelo proposto é considerado o sinal de um único usuário secundário com SNR fixa em 5 dB durante todo o período de sensoriamento. Como visto anteriormente, essa análise é válida para um conjunto de M usuários secundários transmitindo de forma simultânea e independente desde que a soma das SNRs dos seus sinais atendam à seguinte condição: $10 \log(\sum_{i=1}^M \gamma_i) = 5$ dB. Para validar o modelo analítico proposto, simulações utilizando o método de Monte Carlo foram realizadas com 10000 iterações para cada modelo. Como pode ser observado na Figura 3.4, os valores simulados se aproximam satisfatoriamente das curvas teóricas.

A Figura 3.4 permite observar que, para o mesmo número de amostras, o desempenho do sensoriamento do espectro é melhor no modelo tradicional, uma vez que, para um

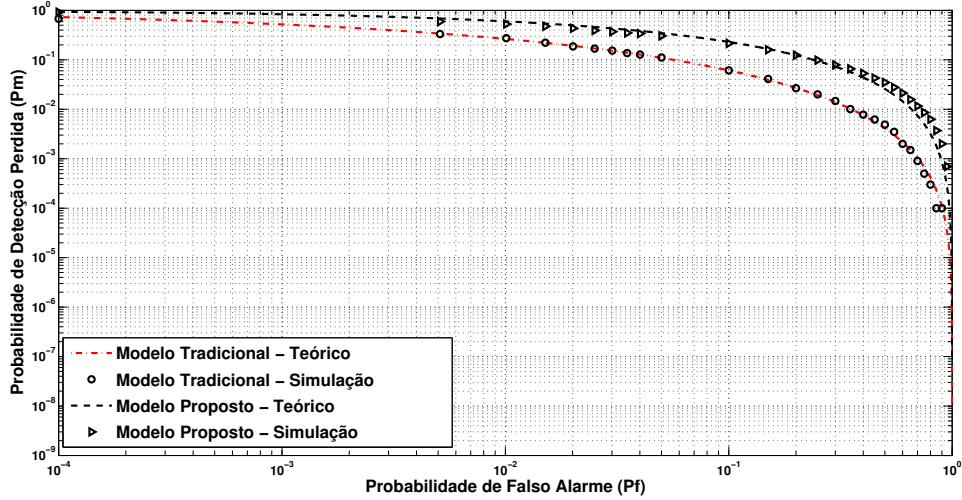


Figura 3.4: Curva ROC complementar (P_m vs P_f) para os modelos de sensoriamento do espectro tradicional ($\gamma_x = 10$ dB, $U = 5$) e proposto ($\gamma_x = 10$ dB, $\gamma_s = 5$ dB, $U = 5$). Valores simulados são expostos para validar o modelo proposto.

dado valor de P_f , a P_m no modelo proposto é maior que a do modelo tradicional. De fato, quanto maior for a SNR do rádio secundário que transmite de forma oportunista na banda sob sensoriamento, menor será o percentual da energia do sinal do rádio primário em relação ao total de energia efetivamente detectada. Por isso, quanto maior a SNR do sinal do usuário secundário, pior o desempenho do sensoriamento do espectro. Na verdade, esse desempenho diminui até um certo ponto, que pode ser visualizado fixando-se γ_s muito maior que γ_x . Se $\gamma_s \gg \gamma_x$, então $\gamma_s + \gamma_x \approx \gamma_s$ e a P_d em (3.7) se aproxima do valor de P_f em (3.6). Assim, não importa quão grande seja γ_s , a P_d nunca será menor que P_f .

Esse comportamento pode ser visualizado na Figura 3.5, a qual ilustra a curva de tendência da P_d no modelo de sensoriamento proposto, para um número fixo de amostras ($2U = 10$), para uma SNR fixa do usuário primário em $\gamma_x = 10$ dB, e considerando três casos de P_f : 0,1, 0,3 e 0,5. Adicionalmente, uma linha de referência é traçada para o caso de $P_f = 0,1$, que indica o valor de P_d para o modelo de sensoriamento do espectro tradicional. Esse gráfico mostra que a curva da P_d tende para o valor de P_d do modelo tradicional quando a SNR do usuário secundário tende a zero. Por outro lado, esse gráfico revela também que, se a SNR do usuário secundário tende a infinito, a curva da P_d diminui até o respectivo valor de P_f , como mencionado anteriormente.

Essa análise mostra que para o mesmo número de amostras, o desempenho do modelo proposto nunca será melhor que a do modelo de sensoriamento convencional. Entre-

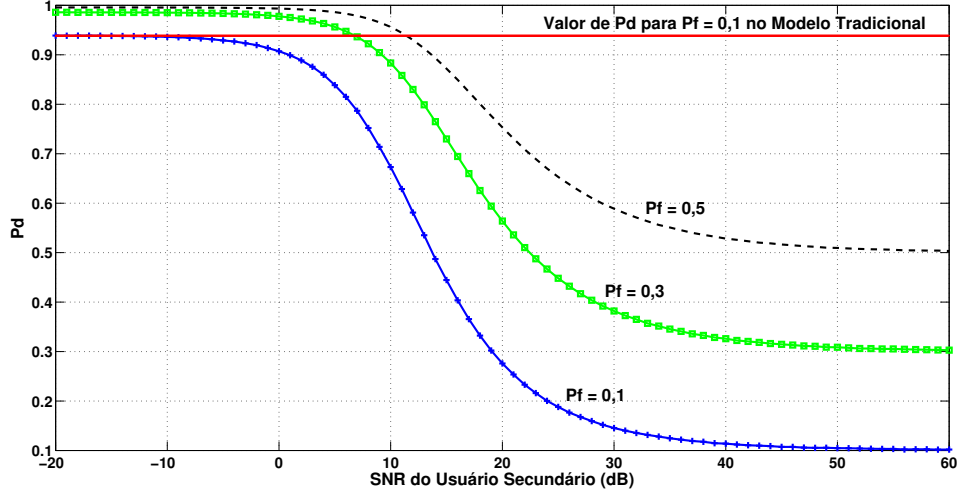


Figura 3.5: Evolução da P_d como uma função da SNR do usuário secundário (γ_s) para um número fixo de amostras ($2U = 10$) e para uma SNR fixa do usuário primário ($\gamma_x = 10$ dB), considerando três casos de P_f .

tanto, a grande vantagem do modelo proposto é que ele permite o sensoriamento do espectro paralelo à transmissão na rede de rádios cognitivos. Por isso, pode-se melhorar o desempenho do sensoriamento aumentando o tempo de sensoriamento, uma vez que não é mais preciso interromper o sensoriamento para iniciar a transmissão. Assim, é possível compensar a queda de desempenho no sensoriamento do espectro devido à presença do sinal do rádio cognitivo na banda sob sensoriamento, aumentando o número de amostras no processo de detecção de energia.

Para melhor compreensão desse processo, segue exemplo com os parâmetros estabelecidos pelo padrão IEEE 802.22 para demonstrar que o problema gerado pela presença do sinal do usuário secundário pode ser mitigado aumentando o número de amostras no detector de energia. O padrão IEEE 802.22 regulamenta o uso de canais desocupados de TV em VHF/UHF para o acesso à banda larga sem fio em áreas rurais e suburbanas. Esse padrão estabelece [7] que, em um canal de TV de 6 MHz, o período de detecção do canal (CDT - *channel detection time*) deve ser no máximo 2 segundos. Estabelece ainda que a sensibilidade do receptor no sensoriamento deve ser de -116 dBm, com probabilidade de detecção de 0,9 e probabilidade de falso alarme de 0,1. Com esse valor da sensibilidade do receptor pode-se encontrar a relação sinal-ruído do rádio primário a partir da potência do ruído no receptor. Assumindo que apenas o ruído térmico afete a recepção do sinal, e que o receptor seja equipado com uma antena isotrópica com 0 dB de ganho, a potência do ruído no receptor pode ser obtida da seguinte forma:

$$F = \frac{SNR_I}{SNR_O} = \frac{S_I/N_I}{S_O/N_O} = \frac{N_O}{N_I} = \frac{N_O}{G_A k_B T_0 B} \quad \therefore N_O = F G_A k_B T_0 B \quad (3.21)$$

em que o subscrito O está relacionado aos valores na saída do receptor, o subscrito I aos valores na entrada do receptor, N_O é a potência de ruído na saída do receptor que possui uma figura de ruído F , com um uma antena de ganho G_A (0 dB), e que realiza o sensoriamento em uma faixa de frequência com largura de banda B (6 MHz) sob a consideração de uma constante de Boltzman k_B ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K), e de uma temperatura de ruído T_0 (290 K). Utilizando a equação (3.21) pode-se calcular a potência do ruído considerando uma figura de ruído no receptor bem conservadora de 11 dB [28] e uma mais razoável de 6 dB, a partir das quais chega-se à relação sinal-ruído do rádio primário que será $\gamma_x = -21$ dB, na situação mais conservadora, e $\gamma_x = -15$ dB, na situação mais razoável. A Figura 3.6 mostra as curvas do tempo de sensoriamento necessário para se atender aos requisitos estabelecidos pelo padrão IEEE 802.22 detalhados anteriormente, em função da relação sinal-ruído do rádio secundário. Na figura são traçadas também linhas de referência que indicam o tempo de sensoriamento requerido sob as mesmas condições caso fosse utilizado o modelo tradicional de sensoriamento do espectro (2.24) para cada uma das SNRs do rádio primário ($\gamma_x = -21$ dB e $\gamma_x = -15$ dB).

Analisando a Figura 3.6 percebe-se que quanto maior o tempo de sensoriamento, maior a SNR do rádio secundário suportada pelo modelo proposto sem prejuízo no desempenho do sensoriamento do espectro. Entretanto, como o tempo de sensoriamento é limitado pelo período CDT, a SNR do rádio secundário também é limitada para garantir determinado desempenho no sensoriamento do espectro. Utilizando (3.16), encontra-se a máxima SNR do rádio secundário suportada pelo modelo proposto de sensoriamento do espectro. Temos $\gamma_s^{max} = 9,88$ dB para $\gamma_x = -21$ dB e $\gamma_s^{max} = 16,22$ dB para $\gamma_x = -15$ dB, dado o limite no tempo de sensoriamento de 2 s.

Estes resultados revelam que o modelo de sensoriamento do espectro proposto suporta uma Relação de Potência Secundário-Primário (3.17) de aproximadamente 31 dB para as especificações do padrão IEEE 802.22. Isso significa que o rádio cognitivo é capaz de detectar a presença de um sinal de TV, com -116 dBm, durante dois segundos de sensoriamento, com 90% de P_d e 10% de P_f , mesmo que haja um usuário secundário transmitindo de forma oportunista com um sinal recebido em -85 dBm.

Além disso, se a SNR do usuário secundário ficar abaixo do valor γ_s^{max} , então a interferência na rede do usuário primário pode ser reduzida com a melhora do desempenho

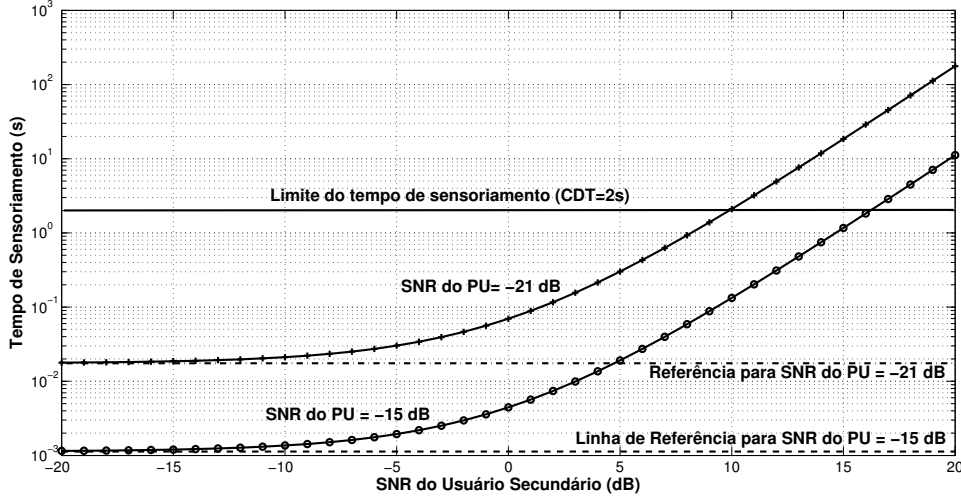


Figura 3.6: Tempo de sensoriamento necessário para detectar a presença de um sinal do Rádio Primário ($\gamma_x = -21$ dB e $\gamma_x = -15$ dB) em função da SNR do usuário secundário para um desempenho do sensoriamento fixo ($P_d = 0,9$ and $P_f = 0,1$).

do sensoriamento ou com a redução no período de detecção do canal (CDT). Por exemplo, se $\gamma_x = -21$ dB, então $\gamma_s^{max} = 9,88$ dB, mas se a SNR do rádio secundário é reduzida para $\gamma_s = 5$ dB, observa-se na Figura 3.6 que o tempo de sensoriamento pode ser reduzido de 2 segundos para 0,3 segundos, mantendo o mesmo desempenho de $P_d = 0,9$ e $P_f = 0,1$. Isso representa uma redução em 85% no tempo de possível interferência na rede dos usuários primários. Por outro lado, com $\gamma_s = 5$ dB e um período de 2 segundos de sensoriamento, pode-se utilizar (3.15) para demonstrar que o rádio cognitivo sensoriando o espectro pode decidir a respeito da presença do sinal do usuário primário com uma P_d melhor que 99.95% e uma P_f menor que 0.05%. Esse aprimoramento na probabilidade de detecção resulta em menor interferência na rede do usuário primário, pois mais vezes a detecção ocorrerá corretamente. Além disso a diminuição na probabilidade de falso alarme melhora a utilização do espectro disponível aumentando a capacidade da rede de usuários secundários, uma vez que será maior o aproveitamento das oportunidades de transmissão pela rede de rádios cognitivo.

3.5 SUMÁRIO

Nesse capítulo foi proposta uma extensão ao modelo tradicional da técnica de detecção de energia que permite o rádio cognitivo sensoriar o espectro à procura de um usuário primário mesmo quando outros rádios cognitivos transmitem na mesma faixa de frequência sob sensoriamento. Simulações utilizando o método de Monte Carlo fo-

ram realizadas para validar o modelo proposto, e foi observado que a SNR do sinal do usuário secundário precisa ser limitada para garantir desempenho satisfatória no sensoriamento do espectro. Finalmente, foram analisados resultados numéricos que indicam que o modelo de sensoriamento proposto pode reduzir a interferência na rede do usuário primário e incrementar a capacidade da rede de rádios cognitivos sob certas condições de SNR desses rádios.

4 DESEMPENHO DO MODELO PROPOSTO

4.1 INTRODUÇÃO

Na proposta de rádio cognitivo existe um compromisso natural entre aumentar a capacidade da rede de rádios cognitivos e diminuir a interferência na rede dos usuários primários. Nesse sentido, o sensoriamento do espectro assume a responsabilidade de permitir que os rádios cognitivos atinjam a maior taxa de transmissão possível desde que assegurada a devida proteção à rede de usuários primários. Portanto, uma boa forma de se avaliar o método de sensoriamento do espectro proposto é por meio da análise do seu impacto tanto na interferência na rede de usuários primários quanto na capacidade de transmissão na rede de rádios cognitivos.

No caso do modelo tradicional de sensoriamento serial do espectro, é fácil identificar esse compromisso na necessidade imposta ao rádio cognitivo de periodicamente interromper sua transmissão para realizar o sensoriamento do espectro. Nesse caso, o rádio cognitivo deve balancear a duração da transmissão e a duração do sensoriamento para que seja garantida a capacidade de transmissão desejada em sua rede e seja preservada a proteção necessária na rede dos usuários primários.

Por outro lado, no modelo proposto de sensoriamento do espectro não há necessidade de interrupção na transmissão dos rádios cognitivos. Entretanto, como estudado no capítulo anterior, a SNR do sinal transmitido pelo rádio cognitivo deve ser limitada para preservar o desempenho do sensoriamento do espectro que é realizado em paralelo na banda de operação da rede dos usuários secundários. Portanto, o compromisso natural na proposta de rádios cognitivos pode agora ser estudado sob outro ponto de vista. Neste caso, quanto maior a SNR dos usuários secundários, maior a taxa de transmissão alcançada na rede de rádios cognitivos. Entretanto, essa SNR maior degrada o desempenho do sensoriamento do espectro e gera mais interferência na rede dos usuários primários. Esse dilema pode ser traduzido no seguinte problema de otimização:

$$\begin{aligned} & \text{maximizar } R^{CR} \\ & \text{desde que } \bar{I}_p < I_{max} \end{aligned} \tag{4.1}$$

onde R^{CR} é a taxa de transmissão do canal dos rádios cognitivos e \bar{I}_p é a interferência média na rede dos usuários primários limitada pela interferência máxima estabelecida por I_{max} .

Neste capítulo, esse problema de otimização é estudado confrontando o modelo proposto e o modelo tradicional de sensoriamento do espectro. Inicialmente é apresentado o modelo estatístico que descreve a operação do usuário primário. Na Seção 4.3 a modelagem de interferência na rede dos usuários primários devida à presença do sinal do rádio cognitivo é apresentada. Em seguida, é analisada a taxa de transmissão alcançada pelos rádios cognitivos utilizando o modelo de sensoriamento do espectro proposto. Os resultados obtidos a partir dessa análise são comparados com aqueles obtidos na literatura para o modelo tradicional e apresentados na Seção 4.5. Por fim são apresentadas as conclusões com relação ao desempenho do modelo proposto.

4.2 MODELO DE OPERAÇÃO DO RÁDIO PRIMÁRIO

Tanto a análise de interferência quanto a de capacidade de transmissão em rede de rádio cognitivo é complexa e altamente dependente do serviço em que opera o rádio primário. Por exemplo, se o rádio primário é um radiodifusor de sinal de TV, pode-se considerar que este sinal mantém seu estado de operação (ativo ou inativo) por vários períodos de sensoriamento. Nesses casos, assume-se que o rádio primário opera de forma determinística e que não há variação em seu estado de operação durante o período de sensoriamento. Entretanto, este modelo se mostra impreciso quando analisados os canais mais dinâmicos, como aqueles utilizados em aplicações *Push-to-Talk* (PTT), por exemplo. Em tais aplicações, o estado do usuário primário pode mudar de inativo para ativo, e vice-versa, em poucos períodos de sensoriamento, ou pode mudar mais de uma vez dentro do mesmo período. Nesses casos, um modelo estatístico seria mais apropriado na análise do padrão de operação do usuário primário.

Adicionalmente, para facilitar as análises feitas nesse capítulo, pode-se dividir o período de transmissão do rádio cognitivo em duas categorias de acordo com o estado do rádio primário [18]:

- Transmissão no Estado Inativo: Período de transmissão do rádio cognitivo em que o rádio primário encontra-se inativo na banda licenciada.
- Transmissão no Estado Ativo: Período em que tanto o rádio cognitivo quanto o rádio primário transmitem, simultaneamente, no mesmo canal. Nesse caso, como há uma colisão entre os sinais dos usuários primário e secundário, esse tipo de operação é indesejado.

Neste estudo são analisados aqueles tipos de aplicações, como radiodifusão de sinal de TV citado acima, em que a transição do usuário primário entre os estados ativo e inativo é tão rara que considera-se que a banda de frequência se mantém ocupada ou desocupada durante todo o período de sensoriamento. Por exemplo, considerando uma localidade que possui 7 estações de TV em operação, é razoável supor que os canais dessas 7 estações estarão ocupados com probabilidade próxima a 100%, e que os outros 62 canais de TV (considerando um total de 69 canais [7]) estarão livres com probabilidade próxima a 100% também. Por isso, neste trabalho, o modelo de operação do rádio primário nesse caso é dito estático. Entretanto, como o rádio cognitivo não sabe quais canais estão ocupados ou livres, o canal selecionado para sensoriamento estará ocupado com uma probabilidade $P_{on} = \frac{7}{69} \approx 10\%$, e estará livre com probabilidade $P_{off} \approx 90\%$.

Nesse caso mais simples de operação do rádio primário, pode-se modelar a transmissão do rádio cognitivo em função do estado de atividade dos usuários licenciados da seguinte forma [18]:

- Transmissão no Estado Inativo: Dado que a banda de frequência está livre e não é gerado falso alarme na detecção do sinal do rádio primário, o rádio cognitivo opera nesse canal com probabilidade $P_{off}(1 - P_f)$.
- Transmissão no Estado Ativo: Dado que o rádio primário está ativo no canal senseado e o rádio cognitivo falha em detectá-lo, o rádio secundário opera de forma indesejada nesse canal com probabilidade $P_{on}(1 - P_d)$.

4.3 MODELO ANALÍTICO PARA INTERFERÊNCIA

A interferência na rede dos usuários primários é uma das principais limitações consideradas na proposta de rádio cognitivo. A situação ideal seria que os usuários secundários utilizassem as bandas de frequências somente quando estas estivessem realmente inutilizadas pelos rádios primários, e que estes não sofressem nenhuma interferência nesse processo. Entretanto, como se trata de uso oportunista desses canais de transmissão, não há garantias de que os usuários licenciados não sofrerão interferências devido à imprecisão do rádio cognitivo em determinar o estado de atividade do rádio primário. Portanto, um modelo analítico que permita avaliar com precisão a interferência máxima percebida pela rede de usuários licenciados é fundamental no estudo de qualquer técnica

de sensoriamento do espectro. Por isso, nesta seção são detalhados dois modelos de interferência na rede dos usuários primários: um Modelo de Interferência em Usuários Primários Estáticos e outro Modelo de Interferência em Usuários Primários Dinâmicos.

Supondo que no período de análise não ocorram mudanças no estado dos usuários licenciados, ou seja, que os canais permaneçam ocupados ou livres durante todo o período de análise, a interferência na rede de rádios primários ocorrerá apenas quando o rádio cognitivo não detectar a presença do sinal do rádio primário e decidir transmitir em um canal que se encontre ocupado. Nesse caso, a interferência média (em termos do tempo médio de interferência na rede de usuários primários), considerando o modelo proposto de sensoriamento do espectro será:

$$\bar{I} = P_{on}(1 - P_d) \quad (4.2)$$

Pode-se comparar essa interferência média com o valor obtido caso fosse considerado o modelo tradicional de sensoriamento do espectro formulada como segue:

$$\bar{I}^t = \eta P_{on}(1 - P_d^t) \quad (4.3)$$

em que P_d^t é a probabilidade de detecção no modelo tradicional considerando eficiência de sensoriamento η , dada em (1.1).

Igualando as equações (4.2) e (4.3) encontra-se a probabilidade de detecção necessária para que a interferência média gerada com a utilização do modelo proposto seja no máximo igual à interferência média gerada com a utilização do modelo tradicional:

$$P_d = 1 - \eta(1 - P_d^t) \quad (4.4)$$

Dessa forma, se a probabilidade de detecção for maior que o estabelecido na equação (4.4), ou seja $P_d > 1 - \eta(1 - P_d^t)$, o modelo proposto de sensoriamento do espectro resulta em maior proteção à rede de usuários primários que o modelo tradicional.

4.4 MODELO ANALÍTICO PARA TAXA DE TRANSMISSÃO

Outro importante fator na análise do sensoriamento do espectro é a taxa de transmissão média \bar{R} da rede de rádios cognitivos. Como na proposta de rádio cognitivo há sempre a possibilidade de colisão entre os sinais dos usuários primários e o sinal do rádio não licenciado, no âmbito desse estudo é estudada a taxa de transmissão do rádio cognitivo de acordo com o estado de atividade do rádio primário: Transmissão no Estado Ativo e Transmissão no Estado Inativo.

Na Transmissão no Estado Inativo não há colisão entre os sinais do usuário primário e do usuário secundário e a capacidade (em termos da eficiência espectral) de transmissão do rádio cognitivo nesse estado (C_{off}), em um canal AWGN, medida em bps/Hz, segue o limite de Shannon ([26]) e pode ser escrita em função da SNR do rádio secundário (γ_s) da seguinte forma:

$$C_{off} = \log_2(1 + \gamma_s) \quad (4.5)$$

No caso da Transmissão no Estado Ativo, há colisão entre o sinal do rádio cognitivo e o sinal do rádio primário. Esse tipo de colisão deve ser evitado pelo rádio secundário, mas devido a falhas na detecção do rádio primário, ou ao surgimento repentino do mesmo, nem sempre é possível impedir esse tipo de transmissão indevida. Além disso, essas colisões prejudicam também a transmissão da rede de rádios cognitivos, e o sinal do rádio primário é computado como interferência em sua capacidade de transmissão. Portanto, se o rádio primário está ativo, a capacidade de transmissão (C_{on}) do rádio cognitivo será:

$$C_{on} = \log_2 \left(1 + \frac{\gamma_s}{1 + \gamma_x} \right) \quad (4.6)$$

Dessa forma, a taxa de transmissão média atingível na rede de rádios cognitivos, também medida em bps/Hz, pode ser encontrada pela soma da Taxa de Transmissão no Estado Ativo (R_{on}) com a Taxa de Transmissão no Estado Inativo (R_{off}), que serão definidas a partir do modelo de atividade do usuário primário.

Caso os canais utilizados pelo rádio cognitivo de forma oportunista permaneçam ocu-

pados, ou livres, durante todo o período de análise, a taxa de transmissão média pode ser encontrada considerando as probabilidades de transmissão no estado ativo e inativo, e utilizando as respectivas capacidades de transmissão dadas em (4.6) e (4.5), resultando nas seguintes equações [18]:

$$R_{on} = P_{on}(1 - P_d)C_{on} \quad (4.7)$$

$$R_{off} = P_{off}(1 - P_f)C_{off} \quad (4.8)$$

Caso P_d assuma o valor dado pela equação (4.4), limitando a interferência no modelo proposto ao mesmo valor do modelo tradicional de sensoriamento do espectro, também será limitada a taxa de transmissão no estado ativo (R_{on}) à mesma do modelo tradicional. Dessa forma, pode-se encontrar a SNR do rádio secundário em que a taxa de transmissão alcançada pelo modelo proposto se iguala à do modelo tradicional fazendo R_{off} igual a R_{off}^t , em que $R_{off}^t = \eta P_{off}(1 - P_f)C_{off}$ é a taxa de transmissão alcançada pelo modelo tradicional de sensoriamento do espectro durante a transmissão no estado inativo [18]. Nessas condições, o seguinte valor para a P_f do modelo proposto é obtido:

$$P_f = 1 - \eta(1 - P_f^t) \quad (4.9)$$

onde P_f^t é a probabilidade de falso alarme obtida pelo modelo tradicional de sensoriamento do espectro.

Substituindo (4.9) em (3.15) e fazendo as devidas manipulações matemáticas, obtém-se a seguinte equação para a SNR do rádio secundário (γ_s^T) que iguala a taxa de transmissão do modelo proposto com a taxa de transmissão obtida pelo modelo tradicional de sensoriamento do espectro:

$$\gamma_s^T = \frac{\gamma_x \left(\sqrt{\frac{N}{2}} - Q^{-1}(\eta(1 - P_d^t)) \right)}{Q^{-1}(\eta(1 - P_d^t)) - Q^{-1}(\eta(1 - P_f^t))} - 1 \quad (4.10)$$

Dessa forma, como a probabilidade de falso alarme no modelo proposto diminui com a redução de γ_s , e como γ_s^T nos dá o valor em que a taxa de transmissão do modelo

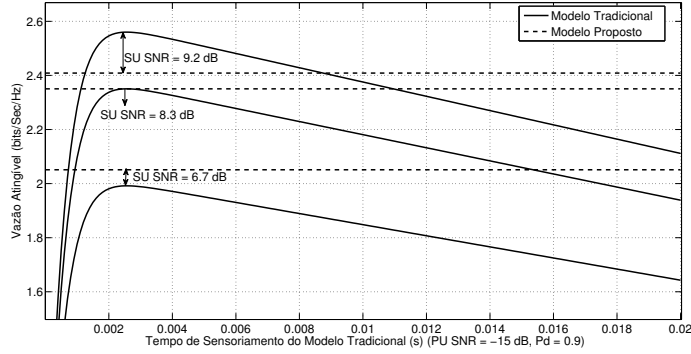


Figura 4.1: Comparação entre a taxa de transmissão atingível nos modelos tradicional e proposto de sensoriamento do espectro

proposto se iguala à do modelo tradicional sob a mesma condição de interferência, conclui-se que, para qualquer situação em que o rádio secundário transmita com SNR abaixo deste valor, o desempenho do modelo de sensoriamento do espectro proposto neste trabalho será melhor que a do sensoriamento tradicional.

4.5 RESULTADOS

No Capítulo 3 vimos que o modelo de sensoriamento proposto neste trabalho tem potencial de diminuir significativamente a interferência do rádio cognitivo na rede dos usuários primários e de aumentar a taxa de transmissão dos usuários secundários. Nesta seção são apresentados alguns resultados que revelam com mais detalhes as vantagens do modelo proposto de sensoriamento do espectro em relação ao modelo tradicional. Para o modelo de operação do rádio primário estático é apresentada uma comparação entre o sensoriamento proposto e o sensoriamento tradicional considerando as restrições de interferência na rede dos usuários primários.

Os resultados a seguir foram obtidos utilizando as equações (4.7), (4.8) e (4.10). Considerou-se uma rede de usuários secundários que tentam acessar de forma oportunista os canais desocupados de TV em VHF/UHF, de acordo com os parâmetros definidos pelo padrão IEEE 802.22 [7]. Inicialmente são comparados os resultados do modelo proposto com os resultados encontrados para o modelo tradicional seguindo o método proposto em [18] e considerando apenas o critério de taxa de transmissão. Posteriormente uma análise similar é feita, porém considerando que a interferência gerada no modelo proposto deva ser no máximo igual à do modelo tradicional.

A Figura 4.1 apresenta a taxa de transmissão atingível no modelo tradicional de sensoriamento do espectro, em função do tempo de sensoriamento, comparada à taxa de transmissão alcançada quando se utiliza o modelo proposto. Nesse caso é considerada uma probabilidade de detecção constante em ambos os modelos ($P_d = 0,9$), um período de sensoriamento $T = 0,1$ s, em um canal de TV com 6 MHz de largura de banda, a SNR do usuário primário constante em -15 dB, e 3 casos de SNR do usuário secundário, como mostrados na figura. Desta figura, destaca-se que, para uma SNR do sinal do rádio cognitivo igual a $8,3$ dB, a taxa de transmissão alcançada utilizando o modelo proposto de sensoriamento do espectro é sempre superior ou igual àquela alcançada pelo modelo tradicional. Para uma SNR do usuário secundário superior ao limite de $8,3$ dB, o modelo tradicional pode ser melhor que o modelo proposto se utilizado tempo de sensoriamento adequado que otimize a taxa de transmissão. Entretanto, para SNR do sinal do rádio cognitivo abaixo de $8,3$ dB, a taxa de transmissão do sistema utilizando o modelo de sensoriamento proposto será sempre maior que aquela alcançada pelo modelo tradicional.

Essa característica pode ser observada nas Figuras 4.2 e 4.3. A Figura 4.2 mostra a taxa de transmissão em função da SNR do Rádio Cognitivo. A curva do modelo tradicional é traçada considerando o tempo de sensoriamento ótimo, que resulta na máxima taxa de transmissão para cada valor de SNR do sinal do usuário secundário. Observa-se que, para baixos valores de SNR do SU, a taxa de transmissão do rádio cognitivo utilizando o modelo proposto permanece acima da curva do modelo tradicional. Entretanto, com o aumento da SNR do rádio secundário aumenta-se a P_f (3.11), e com o aumento da P_f o rádio cognitivo perde cada vez mais oportunidades de transmitir nos canais inutilizados pelo PU, diminuindo a taxa de transmissão R_{off} (4.8), até que se chega ao ponto em que o modelo tradicional se mostra melhor que o modelo proposto de sensoriamento do espectro.

A Figura 4.3 ilustra a capacidade de transmissão (C_N) normalizada pela taxa de transmissão teórica do canal para uma dada SNR do usuário secundário durante o estado inativo do usuário primário. Para o modelo tradicional $C_N = \frac{T-t}{T}(1 - P_f)$ [18], e para o modelo proposto $C_N = (1 - P_f)$. Novamente, para o modelo tradicional foi considerado o tempo de sensoriamento que otimiza a taxa de transmissão da rede de rádio cognitivo. Nesta figura observa-se que, para o modelo tradicional de sensoriamento do espectro, o rádio cognitivo atinge no máximo 97% da capacidade do canal. Já o modelo proposto pode alcançar aproximadamente 100% do limite teórico da taxa de transmissão do canal para valores de SNR do Rádio Secundário menores que $6,5$ dB

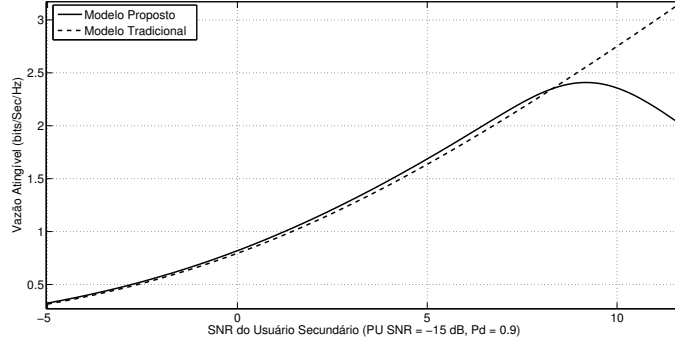


Figura 4.2: Taxa de Transmissão Atingível para os modelos tradicional e proposto de sensoriamento do espectro em função da SNR do Rádio Cognitivo

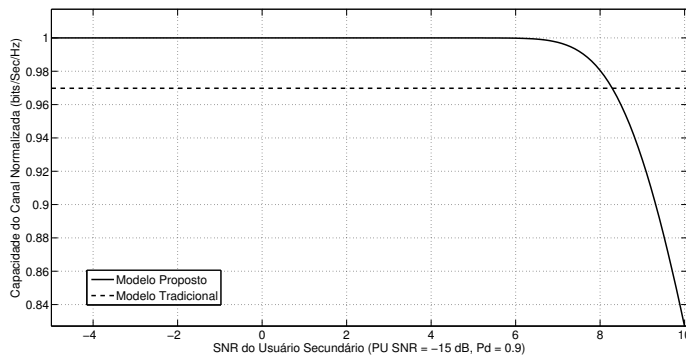


Figura 4.3: Capacidade de Transmissão Normalizada pela Taxa de Transmissão teórica do canal

aproximadamente, e se mostra mais vantajoso que o modelo tradicional para os casos em que a SNR do SU esteja abaixo de, aproximadamente, 8,3 dB. Em outras palavras, o modelo proposto permanece operando próximo à capacidade máxima do canal caso o rádio secundário opere, no máximo, até 21,5 dB acima da potência do rádio primário. O modelo proposto se mostra mais vantajoso que o modelo tradicional caso o sinal do rádio secundário esteja com potência até 23,3 dB acima da potência do sinal recebido do rádio primário.

Portanto, observa-se que existe uma região de operação do rádio secundário em que o desempenho do sensoriamento proposto é superior ao desempenho do modelo tradicional de sensoriamento do espectro. Essa região é delimitada pela equação (4.10), que calcula a SNR do rádio secundário (γ_s^T) para a qual a taxa de transmissão do modelo proposto de sensoriamento do espectro se iguala à do modelo tradicional, respeitados os níveis de interferência alcançados neste modelo. Essa análise pode ser observada na Figura 4.4, que ilustra a região onde o desempenho do modelo proposto é melhor que o desempenho do modelo tradicional de sensoriamento. Nessa figura, o parâmetro

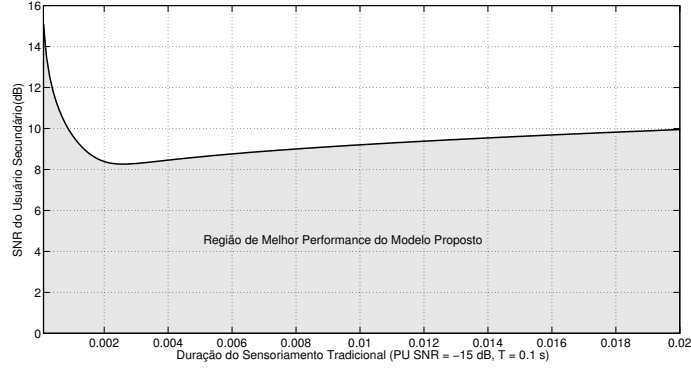


Figura 4.4: Limite de SNR do Rádio Secundário, por duração do sensoriamento no modelo tradicional, em que a taxa de transmissão dos modelos, proposto e tradicional, se igualam.

limitador do modelo proposto, que é a SNR do rádio secundário, é confrontado contra o parâmetro que limita o desempenho do modelo tradicional de sensoriamento do espectro, que é a duração do sensoriamento. Esse confronto é feito de forma que cada par de pontos sobre a curva deste gráfico revela as condições em que a taxa de transmissão dos modelos proposto e tradicional de sensoriamento do espectro se igualam. Portanto, para qualquer valor de SNR do rádio secundário abaixo dessa curva, pode-se obter maiores taxas de transmissão na rede dos usuários secundários e menor interferência na rede dos usuários primários caso seja utilizado o modelo proposto de sensoriamento do espectro. Entretanto, caso seja possível que os usuários secundários transmitam com SNR acima daquela estabelecida na curva da Figura 4.4, o modelo tradicional de sensoriamento do espectro continua sendo mais vantajoso que o modelo aqui proposto.

Essa decisão de se utilizar o modelo tradicional em vez do proposto se justifica porque, para SNR do sinal do rádio cognitivo muito altas, o modelo proposto perde em desempenho, e tanto a probabilidade de falso alarme quanto a probabilidade de detecção do usuário primário são prejudicadas devido à presença do forte sinal do usuário secundário. Nestes casos, a melhor opção é a interrupção periódica da transmissão para que seja realizado o sensoriamento do espectro nos moldes tradicionais.

Portanto, a equação (4.10) e sua curva ilustrada na Figura 4.4 são extremamente úteis na decisão de qual modelo utilizar para o sensoriamento do espectro, pois a depender da SNR do rádio cognitivo, a melhor opção talvez seja o uso do sensoriamento contínuo proposto neste trabalho ou o uso da técnica tradicional. Essa decisão deverá ser tomada pelo projetista da rede de rádios cognitivos com base em sua previsão da SNR do sinal dos rádios secundários e com base nos demais parâmetros do sistema.

4.6 SUMÁRIO

Neste capítulo estudou-se o desempenho do modelo proposto de sensoriamento do espectro em termos da taxa de transmissão alcançada na rede dos usuários secundários e do nível de interferência na rede dos usuários primários. Para tanto foram desenvolvidos modelos analíticos, tanto para a taxa de transmissão quanto para a interferência, com base nos resultados já consolidados no modelo tradicional de sensoriamento e considerando as características adicionais do modelo proposto.

Da análise dos resultados obtidos observou-se que, para as especificações do padrão IEEE 802.22, o modelo de sensoriamento do espectro proposto neste trabalho permite ao rádio cognitivo uma capacidade de transmissão teórica de aproximadamente 100% do limite de Shannon quando o sinal do rádio secundário é recebido com potência até 21,5 dB acima da potência do sinal recebido do rádio primário. Nesse caso, chega-se à conclusão de que o modelo proposto tem potencial para solucionar o problema de eficiência do sensoriamento descrito no Capítulo 2. Além disso, observou-se também que o modelo proposto se mostra mais vantajoso que o modelo tradicional de sensoriamento do espectro, ainda que o sinal recebido do rádio secundário esteja com potência até 23,3 dB acima da potência do sinal recebido do rádio primário.

Adicionalmente, foi revelado que, apesar de o novo modelo de sensoriamento eliminar a necessidade de interrupção na transmissão do rádio cognitivo, ainda assim é possível que o modelo tradicional de sensoriamento do espectro possua desempenho melhor que o modelo aqui proposto. Para que seja possível tomar uma decisão com relação a essa escolha no projeto do sistema de rádio cognitivo foi proposta uma equação que permite calcular a SNR do rádio secundário que iguala a taxa de transmissão do modelo proposto à do modelo tradicional, de tal forma que, com base na previsão de SNR do sinal do rádio secundário, seja possível indicar qual a melhor técnica a ser utilizada.

5 SUMÁRIO E CONCLUSÕES

Esta dissertação apresentou uma adaptação do sensoriamento do espectro por detecção de energia, visando mitigar o problema de eficiência do sensoriamento observado nas redes de rádio cognitivo.

Inicialmente foram apresentadas no Capítulo 1 as principais motivações e desafios relacionados a esse estudo. Dentre as motivações, destacou-se a ambiguidade entre a escassez de faixas de frequências a serem atribuídas a novos serviços e aplicações sem fio e a ineficiência espectral observada nos serviços atualmente em operação. Foi mostrado que, para reverter essa ambiguidade, tem sido proposto o modelo de rádio cognitivo que permite o acesso dinâmico àquelas faixas de frequência não utilizadas pelos usuários licenciados, por meio de técnicas de sensoriamento do espectro. Destacou-se também que o principal desafio do rádio cognitivo está em proporcionar taxas de transmissão aceitáveis a seus usuários, dada a restrição de que a rede dos usuários primários seja protegida contra interferência.

Devido a sua importância nesse estudo, o modelo de rádio cognitivo foi apresentado em detalhes no Capítulo 2. Foram apresentadas as capacidades cognitiva e de reconfiguração de um rádio cognitivo que se encontram inseridas no ciclo cognitivo. O sensoriamento do espectro, por ser uma das principais etapas desse ciclo, recebeu atenção especial; várias de suas técnicas foram abordadas. Destacou-se dentre essas técnicas a de detecção de energia, por ser o foco dessa dissertação.

No Capítulo 3 observou-se que alguns métodos convencionais de detecção de sinal não foram modelados para tratar o reuso oportunista do espectro e, portanto, sua utilização no sensoriamento do espectro compromete tanto a capacidade de transmissão das redes de rádio cognitivo quanto a proteção das redes dos usuários primários. Por esse motivo, foi proposta uma adaptação na tradicional técnica de detecção de energia que permite o rádio cognitivo sensoriar o espectro e decidir a respeito da presença do usuário primário, mesmo que a banda de frequência sob sensoriamento esteja sendo utilizada de forma oportunista para transmissão por outro usuário secundário. Foi destacado que os rádios cognitivos podem manter sua transmissão sem a necessidade de interrupção para realização do sensoriamento que, no modelo proposto, é realizado de forma paralela por outro rádio cognitivo que recebe o sinal transmitido, ou por qualquer outro rádio cognitivo que não transmite no canal em questão. Foi esclarecido que, para sensoriar o espectro dessa forma, o único requisito adicional é o da informação a respeito

da SNR do sinal dos usuários secundários que transmitem na faixa de frequência sob sensoriamento; não se faz necessária nenhuma alteração no *hardware* do detector de energia convencional. Simulações utilizando o método de Monte Carlo foram realizadas para validar o modelo proposto. Foi observado que os valores simulados se adequam satisfatoriamente aos valores teóricos. Além disso, ficou demonstrado que o modelo de sensoriamento proposto atende as especificações do padrão IEEE 802.22 mesmo que o sinal dos rádios secundários seja recebido com potência até 31 dB acima da potência do rádio primário.

Já no Capítulo 4 foram analisados os benefícios da técnica proposta em relação ao modelo tradicional de sensoriamento do espectro. Dos resultados obtidos observou-se que, para certos valores de SNR do rádio secundário, o modelo proposto é mais vantajoso que o modelo tradicional, podendo até solucionar o problema de eficiência do sensoriamento observado em algumas técnicas de sensoriamento do espectro. Adicionalmente foi revelado que, apesar de o novo modelo de sensoriamento eliminar a necessidade de interrupção na transmissão do rádio cognitivo, ele é limitado pela SNR do sinal do rádio cognitivo que transmite na banda de sensoriamento. Foi então sugerida uma equação que permite calcular a SNR do rádio secundário que iguala a taxa de transmissão do modelo proposto à do modelo tradicional, de tal forma que, com base na previsão de SNR do sinal do rádio secundário, seja possível indicar qual a melhor técnica a ser utilizada.

Apesar das vantagens descritas acima, o modelo proposto possui duas limitações consideráveis:

- O rádio secundário que transmite em determinado canal depende de outros rádios cognitivos para sensoriar aquele canal e notificá-lo caso seja detectada a presença do rádio primário. Essa característica não seria uma limitação em um sistema TDMA por exemplo, pois não haveria uma limitação na eficiência espectral uma vez que apenas um rádio transmite em cada *slot* de tempo. Entretanto, em alguns sistemas, como OFDMA por exemplo, essa limitação exigiria uma arquitetura de rádio duplo para que o sensoriamento e a transmissão ocorressem em paralelo sem comprometer a eficiência espectral do sistema. Mesmo assim, com o uso da arquitetura de rádio duplo, o modelo proposto oferece a vantagem de não obrigar a interrupção da transmissão nas situações em que apenas um canal está disponível.

- O desempenho do modelo proposto de sensoriamento do espectro cai com o aumento da SNR do sinal do rádio secundário que transmite oportunisticamente na banda sob sensoriamento. Portanto permanece o compromisso entre proteção da rede dos usuários primários e a capacidade de transmissão da rede dos usuários secundários.

Conclui-se que o modelo proposto é indicado para sistemas em que um ou mais rádios cognitivos sejam capazes de sensoriar o espectro a procura do sinal do rádio primário mesmo em faixas de frequência que estejam sendo utilizados para transmissão por outros rádios secundários. Além disso, caso seja necessária tomar uma decisão por utilizar o modelo proposto ou o modelo tradicional, a análise das SNRs dos rádios primário e secundário podem indicar qual dos dois modelos é mais vantajoso.

Como trabalhos futuros sugerimos o estudo da técnica proposta considerando modelos de desvanecimento do canal como os de Rayleigh, Nakagami ou Rice. Propõe-se também o estudo do modelo proposto utilizando técnicas sensoriamento cooperativo do espectro, bem como seu estudo considerando técnicas de múltiplo acesso como TDMA e OFDMA, por exemplo. Sugere-se ainda o estudo da performance do modelo proposto de sensoriamento do espectro considerando sistemas em que a ocupação do espectro pelo rádio primário se dá de forma aleatória, ou seja, considerando distribuições que modelam o tempo que o usuário primário permanece ativo e inativo no canal licenciado. Sugere-se também o estudo de protocolos que permitam a estimação da SNR do sinal do rádio secundário, e o impacto no desempenho do sensoriamento devido aos erros envolvidos nessa estimação. Por fim, propomos o estudo para que outras técnicas de sensoriamento do espectro possam ser adaptadas para considerar a presença do sinal do usuário secundário no processo de sensoriamento.

Por fim, cabe observar que parte desse trabalho foi publicado no *Wireless Telecommunications Symposium (WTS-2012)* [4].

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Akyildiz, I. F., Lee, W. Y., Vuran, M. C., e Mohanty, S. Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey. *Computer Networks Journal*, 50:5294–5299, 2006.
- [2] Almeida, E. P. L. Desenvolvimento de técnica de sensoriamento do espectro embasada em detecção de energia para aplicações em sistemas rádio-cognitivos. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 2010.
- [3] ANATEL. *Regulamento de uso do espectro de radiofrequência*, 2001.
- [4] Bizerra, R., Braga, A., e Carvalho, G.de . A spectrum sensing model for continuous transmission in cognitive radio network. In *Wireless Telecommunications Symposium (WTS), 2012*, pages 1–7, april de 2012.
- [5] Brown, T. X. An analysis of unlicensed device operation in licensed broadcast service bands. *First IEEE International Symposium*, pages 11–29, 2005.
- [6] Clancy, T. C. *Dynamic spectrum access in cognitive radio networks*. Tese de Doutorado, University of Maryland, College Park, MD, 2006.
- [7] Cordeiro, C., Challapali, K., e Birru, D. IEEE 802.22: An introduction to the first wireless standard based on cognitive radios. *Journal of communications*, 1(1), 2006.
- [8] Datla, D., Rajbanshi, R., Wyglinski, A. M., e Minden, G. J. Parametric adaptive spectrum sensing framework for dynamic spectrum access networks. *IEEE Int. Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, pages 482–485, 2007.
- [9] Digham, F., Alouini, M., e Simon, M. On the energy detection of unknown signals over fading channels. *Proc. IEEE Int. Conf. Commun.*, 5:3575–3579, 2003.
- [10] Federal Communications Commission. *Spectrum Policy Task Force Report*, 2002.

- [11] Federal Communications Commission. *Notice of Proposed Rulemaking, in the Matter of Unlicensed Operation in the TV Broadcast Bands (ET Docket No. 04-186) and Additional Spectrum for Unlicensed Devices Below 900 MHz and the 3 GHz Band (ET Docket No.02-380)*, FCC 04-113, 2004.
- [12] Ghasemi, A. e Sousa, E. Optimization of spectrum sensing for opportunistic spectrum access in cognitive radio networks. *IEEE Consumer Commun. And Networking Conf.*, pages 1022–1026, 2007.
- [13] Gradshteyn, I. S. e Ryzhik, I. M. *Table of Integrals, Series, and Products*. Academic Press, 5 edition, 1994.
- [14] Haykin, S. Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 23(2):201–220, February de 2005.
- [15] Hu, W., Willkomm, D., Abusubaih, M., Gross, J., Vlantis, G., Gerla, M., e Wolisz, A. Dynamic frequency hopping communities for efficient IEEE 802.22 operation. *IEEE Commun. Mag.*, 45(5):80 – 87, 2007.
- [16] Hur, Y., Park, J., Woo, W., Lim, K., Lee, C., Kim, H., e Laskar, J. A wideband analog multi-resolution spectrum sensing (MRSS) technique for cognitive radio (cr) systems. *IEEE Int. Symp. Circuits and Systems*, pages 4090 – 4093, 2006.
- [17] Jones, S. D. Characterization of spectrum activities in the *u.s.* public safety band for opportunistic spectrum access. *IEEE Int. Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Network*, pages 137–146, 2007.
- [18] Liang, Y.-C., Zeng, Y., Peh, E. C. Y., e Hoang, A. T. Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 7(4):1326–1337, 2008.
- [19] LIN, W. e ZHANG, Q. A design of energy detector in cognitive radio under noise uncertainty. *11th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems*, pages 213–217, 2008.
- [20] Ma, J., Zhao, G. D., e Li, Y. G. Soft combination and detection for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 7:4502–4507, 2008.
- [21] Mitola, J. Software rádios: survey, critical evaluation and future directions. *IEEE Aerosp. Electron Syst. Mag.*, 8:25–31, April de 1993.

- [22] Mitola, J. Cognitive radio: Making software radios more personal. *IEEE Pers. Commun.*, 6:13–18, Aug. de 1999.
- [23] Nuttall, A. H. Some integrals involving the Q_M function. *IEEE Transaction on Information Theory*, 21(1):95–96, 1975.
- [24] Rashid, R. A., Aripin, N. M., Fisal, N., Ariffin, S. H. S., e Yuso, S. K. S. Integration of cooperative sensing and transmission. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, pages 46–53, 2010.
- [25] Shankar, S., Cordeiro, C., e Challapali, K. Spectrum agile radios: utilization and sensing architectures. *IEEE Int. Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, pages 160–169, 2005.
- [26] Shannon, C. E. Communication in the presence of noise. *Proc. IRE*, 37:10–21, 1949.
- [27] Shared Spectrum Company. *General Survey of Radio Frequency Bands - 30 MHz to 3 GHz*, 2010.
- [28] Shellhammer, S. J. Spectrum sensing in IEEE 802.22,. *IAPR Wksp. Cognitive Info. Processing*, 2008.
- [29] Tang, H. Some physical layer issues of wide-band cognitive radio systems. *IEEE Int. Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, pages 151–159, 2005.
- [30] Urkowitz, H. Energy detection of unknown deterministic signals. *PROCEEDINGS OF THE IEEE*, 55(4):523–531, 1967.
- [31] Walck, C. *Handbook on statistical distributions for experimentalists*. University of Stockholm, 2001.
- [32] Wang, P., Xiao, L., Zhou, S., e Wang, J. Optimization of detection time for channel efficiency in cognitive radio systems. *IEEE Wireless Commun. and Networking Conf.*, pages 111 – 115, 2007.
- [33] Wild, B. e Ramchandran, K. Detecting primary receivers for cognitive radio applications. *IEEE DySPAN*, pages 124–130, 2005.
- [34] Yuan, Y., Bahl, P., Chandra, R., Chou, P. A., Ferrell, J. I., Moscibroda, T., Narlanka, S., e Wu, Y. Knows: Cognitive radio networks over white spaces. *IEEE Int. Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, pages 416 – 427, 2007.

- [35] Yücek, T. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 11(1), 2009.
- [36] Zhao, Q., Geirhofer, S., Tong, L., e Sadler, B. M. Optimal dynamic spectrum access via periodic channel sensing. *IEEE Wireless Commun. and Networking Conf.*, pages 33 – 37, 2007.