EULER EDSON APAZA MEDINA

**Sensoriamento Espectral Baseado na Detecção de Energia Para
Rádios Cognitivos**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de Mestre em
Ciências.**

**São Paulo
2014**

EULER EDSON APAZA MEDINA

**Sensoriamento Espectral Baseado na Detecção de Energia Para
Rádios Cognitivos**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de Mestre em
Ciências.**

**Área de Concentração:
Sistemas Eletrônicos**

**Orientador:
Prof. Dr. Silvio Ernesto Barbin**

**São Paulo
2014**

Dedicada à memória de:

Alex Israel Ccama Quispe

Aquilina Apaza Colca

Romualdo Medina Choquehuanca

*Meus seres queridos que partiram no decorrer deste Mestrado.
Vocês estarão sempre na minha memória, obrigado por tudo!!!*

Euler Edson Apaza Medina

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo apoio financeiro.

Ao professor Silvio Ernesto Barbin, pela orientação, compreensão e paciência para a conclusão deste trabalho.

Aos professores Luiz Carlos Kretly e Sergio Takeo Kofuji, que com suas valiosas sugestões durante o meu exame de qualificação contribuíram na elaboração deste trabalho.

Aos meus colegas e amigos do Laboratório de Comunicações e Sinais: Edna, Diana, Jarbas, Robson, Reynaldo e Luciano, pelas discussões e compartilhamento de experiências. Ao Dante pelas dicas, Ao Marcelo pelas ajudas no LCS. Ao Jair do laboratório de Microeletrônica pelo auxílio na parte prática deste trabalho.

Aos meus amigos *Puneños* na USP: Omar, Delver, Alan e Zenaida, companheiros do Mestrado e de muitas experiências vividas em São Paulo.

Agradeço aos meus amigos do Peru: Fredy, Jaime, David, Saul, Alfredo, Hugo, Israel, Omar, Marco, Erik, Herbert, Romel, Herberth, William, Rolando, Wilson, Elizabeth e Luana, que, na distância, sempre estiveram me apoiando e estiveram atentos a minha trajetória. À Liliana pela companhia nesta etapa da minha vida. .

À minha família, pelo constante apoio e coragem; aos meus pais, Evasio e María, pela compreensão por eu ter ficado longe de Juliaca. Aos meus avós Romualdo e Justina pelas orações.

Aos meus irmãos, Anghi, Engler, Astrit, Eduardo, Míriam del Pilar e Antonela, que sempre souberam me encorajar na vida, acompanhando meus passos e acreditando em mim para a realização dos meus sonhos.

Obrigado,

Euler Edson Apaza Medina

RESUMO

Em 1997, o conceito de rádio cognitivo foi proposto pela primeira vez e evoluiu significativamente até os dias de hoje, como solução para o problema da escassez de espectro eletromagnético. Nessa proposta, usuários oportunistas, através de acesso dinâmico ao espectro, fazem uso das faixas de frequências atribuídas a usuários licenciados, quando eles não as estão utilizando. Para que isso seja possível, sem interferir ou degradar os sinais dos usuários licenciados, é necessário atender a quatro requisitos essenciais de rádios cognitivos: Sensoriamento espectral, Decisão do espectro, Compartilhamento do espectro e Mobilidade espectral.

Neste trabalho, o sensoriamento espectral é investigado com base na detecção de energia. Um algoritmo é desenvolvido para se determinar o número de canais ocupados e o número de amostras necessárias na detecção para se atingir probabilidades de detecção e falso alarme pré-estabelecidas.

Resultados de simulações são apresentadas mostrando que a incerteza do ruído degrada o desempenho do sistema quando a relação sinal-ruído é baixa. O algoritmo desenvolvido permite também determinar o limite inferior para a relação sinal-ruído, quando há incerteza do ruído.

O comportamento da probabilidade de detecção em função da probabilidade de falso alarme parametrizado para número de amostras e relação sinal-ruído é apresentado. As curvas resultantes são muitas vezes referidas como curvas “ROC - Receiver Operation Characteristics” na literatura.

Em função do grande interesse sócio-político pela banda de TV, que o cenário das telecomunicações atualmente apresenta, a mesma foi escolhida para alguns exemplos deste estudo.

Palavras-chave: Sensoriamento Espectral, Detecção de energia, Rádio Cognitivo, Rádio Definido por Software.

ABSTRACT

In 1997, the concept of cognitive radio was proposed for the first time and evolved significantly to the present days, as a solution to the problem of electromagnetic spectrum scarcity. In the proposed approach, opportunistic users utilize frequency bands originally assigned to licensed users through dynamic spectrum access when the licensed users are not using them. To make this possible, without interfering or degrading the signals from the licensed users, it is necessary to fulfill four essential requirements of cognitive radios: spectrum sensing, spectrum decision, spectrum sharing, and spectrum mobility.

In this work, spectrum sensing based on energy detection was investigated. An algorithm was developed for the determination of channel occupation and the number of samples needed for the detection process to achieve pre-established probabilities of detection and false-alarm.

Simulations results are presented showing that noise uncertainty degrades the performance of the system when the signal-to-noise ratio is low. The developed algorithm allows determining a lower threshold for the signal-to-noise ratio, when noise uncertainty exists.

The detection probability behavior as a function of the false alarm probability having the number of samples and the signal-to noise ratio as parameters is presented. The resulting curves are often denominated ROC - Receiver Operation Characteristics in the literature.

Due to the high social and political interest in the TV broadcasting band, that telecommunications scenario currently presents, this band was chosen for some examples in this study.

Keywords: Spectrum sensing, Energy Detection, Cognitive Radio, Software Defined Radio.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Porcentagem de ocupação espectral para a faixa de 30 – 3000 MHz na cidade de Chicago – 2010. [11].....	19
Figura 1.2. Descrição geral do funcionamento do Rádio Cognitivo [28].	24
Figura 1.3. Arquitetura de transceptores de Rádios Cognitivos [20].....	27
Figura 1.4. Processo do sensoriamento.....	29
Figura 1.5. a) detector de energia com pré-filtro analógico, b) detector usando FFT.....	29
Figura 1.6. Detecção por Cicloestacionariedade.....	31
Figura 1.7. Estrutura do sensoriamento espectral.....	33
Figura 2.1. Banda Segmentada BST – OFDM para TV Digital.....	40
Figura 2.2. Exemplo de transmissão com banda segmentada.....	41
Figura 2.3. Espectro de RF de canais de TV na cidade de São Paulo	46
Figura 4.1. Arquitetura de Rádios	58
Figura 4.2. Arquitetura de SDR.....	60
Figura 4.3. Arquitetura de operação de USRP.....	61
Figura 4.4. Arquitetura GNU Radio	63
Figura 4.5. Ambiente GNURadio.....	63
Figura 4.6. Diagrama de blocos do detector convencional.....	64
Figura 4.7. Diagrama de blocos do detector Bayesiano.....	65
Figura 5.1. Número de amostras x SNR – Cenário 1	69
Figura 5.2. Probabilidade de Detecção x Número de Amostras ($P_{fa} = 0,01$) – Cenário 1	69
Figura 5.3. Probabilidade de Detecção x Número de Amostras ($P_{fa} = 0,1$) – Cenário 1	70
Figura 5.4. Probabilidade de Detecção x SNR ($N=100$) – Cenário 1.....	71
Figura 5.5. Probabilidade de Detecção x SNR ($N=10000$) – Cenário 1.....	71
Figura 5.6. Probabilidade de Detecção x SNR ($N=100000$) – Cenário 1.....	72
Figura 5.7. Probabilidade de Detecção x Falso alarme ($N=100$) – Cenário 1.....	73
Figura 5.8. Probabilidade de Detecção x Falso alarme ($N=10000$) – Cenário 1.....	73
Figura 5.9. Probabilidade de Detecção x Falso alarme ($N=1000000$) – Cenário 1.....	74
Figura 5.10. Probabilidade de Detecção x SNR ($N=100$, $P_{fa}=0,1$) – Cenário 2	75
Figura 5.11. Probabilidade de Detecção x SNR ($N=2000$, $P_{fa}=0,1$) – Cenário 2	75
Figura 5.12. Probabilidade de Detecção x SNR ($N=10000$, $P_{fa}=0,1$) – Cenário 2.....	76
Figura 5.13. Probabilidade de Detecção x SNR ($u = 0,1\text{dB}$, $P_{fa}=0,1$) – Cenário 2.....	76
Figura 5.14. Número de amostras x SNR ($P_d=0,9$, $P_{fa}=0,1$) – Cenário 2	77
Figura 5.15. Potencias para 56 canais – Cenário 3.....	78
Figura 5.16. Números BEED para 56 possibilidades de ocupação – Cenário 3.....	78
Figura 5.17. Potência Recebida de TV x Distância [48]	79
Figura 5.18. Limiar de comparação x Número de amostras ($P_{fa} = 0,01$) - canal de TV	80
Figura 5.19. Limiar de comparação x Número de amostras ($P_{fa} = 0,1$) - canal de TV	81
Figura 5.20. Probabilidade de detecção x Potência do sinal ($P_{fa} = 0,1$) - canal de TV	81
Figura 5.21. Probabilidade de detecção x Potência do sinal ($P_{fa} = 0,01$) - canal de TV	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Bandas de frequência	37
Tabela 2.2. Bandas para TV	38
Tabela 2.3. Parâmetros do sistema de transmissão de TV	41
Tabela 2.4. Estações em função de características para a faixa de VHF	43
Tabela 2.5. Estações em função de características para a faixa de UHF.....	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CR	Rádio Cognitivo (<i>Cognitive Radio</i>)
SDR	Rádio Definido por Software (<i>Software Defined Radio</i>)
UP	Usuários Primários
US	Usuários Secundários
DAS	Acesso Dinâmico ao Espectro (<i>Dynamic Spectrum Access</i>)
FCC	Comissão Federal de Comunicações (<i>Federal Communications Commission</i>)
RPRM	Notificação de uma Proposta de Regulamentação (<i>Notice of Proposed Rulemaking</i>)
ATSC	Comitê para Sistema de TV Avançada (<i>Advanced Television System Committee</i>)
DVB-T	Transmissão de Vídeo Digital – Terrestre (<i>Digital Video Broadcasting – Terrestrial</i>)
FFT	Transformada Rápida de Fourier (<i>Fast Fourier Transform</i>)
ROC	Característica de Operação do Receptor (<i>Receiver Operating Characteristic</i>)
OFDM	Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal (<i>Orthogonal frequency-division multiplexing</i>)
ISDB-T	Serviço Integrado de Transmissão Digital Terrestre (<i>Integrated Services Digital Broadcasting</i>)
ISM	Industriais, Científicos e Médicos (<i>Industrial, scientific and medical</i>)
ECC	Comitê de Comunicações Eletrônicas (<i>Electronic Communications Committee</i>)
TVWS	Espaços Livres na banda de TV (<i>TV White Spaces</i>)

ITU	União Internacional de Telecomunicações <i>(International Telecommunication Union)</i>
ETSI	Instituto Europeu de Normalização na área de Telecomunicações <i>(European Telecommunications Standards Institute)</i>
ECMA	Associação Europeia de Fabricantes de Computadores <i>(European Computer Manufacturers Association)</i>
AWGN	Ruído Gaussiano Aditivo Branco <i>(Additive White Gaussian Noise)</i>
CDMA	Acesso Múltiplo por Divisão de Código <i>(Code Division Multiple Access)</i>
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
SNR	Relação Sinal – Ruído <i>(Signal-to-Noise Ratio)</i>
BEED	Detecção de Energia Baseada em Estimação Bayesiana <i>(Bayesian estimation-based energy detection)</i>
SWIG	Encapsulador Simplificado <i>(Simplified Wrapper and Interface Generator)</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$y(n)$	Vetor sinal recebido
$x(n)$	Vetor Sinal usuário primário
$w(n)$	Vetor Ruído
$n = 1, \dots, N$	Número de amostras coletadas
γ	Limiar de comparação
σ_w^2	Variância do ruído
σ_x^2	Variância do sinal
$Q(.)$	Função Q
SNR	Relação Sinal-Ruído
σ_L^2	Incerteza mínima
σ_H^2	Incerteza alta
u	Nível da incerteza
SNR_{wall}	Limite de SNR
P_D	Probabilidade de detecção
P_{FA}	Probabilidade de falso alarme
T	Teste estatístico
$i = 1, 2, 3 \dots$	Número do canal
K_T	Número total de canais
R_1	Conjunto de canais ocupados
R_2	Conjunto de canais livres

SUMÁRIO

Capítulo 1	14
INTRODUÇÃO	14
1.1. Objetivo	16
1.2. Elementos Motivadores	16
1.3. Contribuições realizadas na área do sensoriamento espectral	17
1.4. Justificativa	22
1.5. Rádio Cognitivo	24
1.5.1. Regulação e Padronização	25
1.5.2. Desafios no Rádio Cognitivo	26
1.6. Resumo dos métodos do Sensoriamento Espectral	28
1.6.1. Detecção de Energia	28
1.6.2. Filtro Casado	30
1.6.3. Cicloestacionariedade	31
1.6.4. Detecção cooperativa	31
1.6.5. Métodos Híbridos	32
1.7. Estrutura de um Sensoriamento Espectral	32
1.8. Visão Geral do Trabalho	34
Capítulo 2	36
CARACTERIZAÇÃO DO ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO	36
2.1. Oportunidade de Espectro Eletromagnético para Rádio Cognitivo	36
2.2. Caracterização do sinal de TV	38
2.3. Padrão ISDB-TB	39
2.4. Formato do sinal de RF	42
2.5. Classificação das Estações de TV	43
2.6. Medidas	44
2.7. Conclusão	47
Capítulo 3	48
MÉTODOS BASEADOS NA DETECÇÃO DE ENERGIA	48
3.1. Introdução	48
3.2. Detecção de Energia	48
3.3. Limiar de Comparação	51

3.4. Incerteza do Ruído	52
3.5. Detecção Bayesiana	54
3.6. Desvantagens em sistemas baseados em detecção de Energia	56
3.7. Conclusão	57
Capítulo 4	58
ANÁLISE DO <i>HARDWARE</i> PARA RÁDIOS COGNITIVOS	58
4.1. <i>Hardware</i> de SDR	59
4.2. Arquitetura USRP	60
4.3. GNU Radio.....	62
4.4. Sensoriamento Espectral	64
4.5. Considerações na Operação	65
4.6. Conclusão	66
Capítulo 5	67
SIMULAÇÕES E RESULTADOS.....	67
5.1. Primeiro Cenário.....	68
5.2. Segundo Cenário.....	74
5.3. Terceiro Cenário	77
5.4. Quarto Cenário.....	79
5.5. Conclusão	82
Capítulo 6	83
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	83
Referências	85
APÊNDICE	89
APÊNDICE 1: Equipamentos comerciais de SDR.....	89

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Devido à crescente demanda por mais capacidade de comunicação sem fio nos últimos anos, e com o advento de um número cada vez maior de sistemas de telecomunicações, está se desenvolvendo uma crise de falta de espectro eletromagnético, tornando-o um recurso bastante escasso.

Atualmente, o espectro é alocado a provedores de serviços de telecomunicações através de licenças. Entretanto, esses usuários nem sempre utilizam o espectro alocado por todo o tempo. Não é incomum uma certa faixa do espectro reservada a um usuário ficar por um longo tempo sem uso, e portanto podendo ser utilizada para outros serviços; neste cenário, uma tecnologia emergente que tem um papel importante na melhora do gerenciamento do espectro eletromagnético é o Rádio Cognitivo.

Na tecnologia de Rádio Cognitivo (*Cognitive Radio - CR*), definem-se dois tipos de usuários do espectro: usuários primários (UP) e usuários secundários (US). Os primários são usuários licenciados cuja frequência de operação é alocada estaticamente. Os usuários secundários têm a capacidade de reconfigurar seus parâmetros de transmissão para poder utilizar faixas do espectro alocadas aos usuários licenciados quando eles não as estiverem utilizando. Esses usuários também são chamados usuários oportunistas.

O Rádio Cognitivo está baseado na tecnologia de Rádios Definidos por Software (*Software Defined Radio - SDR*), adicionando-se inteligência para a realização de funções cognitivas. Um SDR provê frequência de transmissão variável,

modulações diversas, potência controlável, dentre outras características que o tornam suficientemente flexível. A capacidade do rádio poder mudar dinamicamente seus parâmetros de transmissão e recepção é utilizada para melhorar o aproveitamento do espectro de rádio frequência.

Com o surgimento dos Rádios Definidos por *Software* e em seguida dos Rádios Cognitivos, onde estes últimos visam o acesso dinâmico ao espectro (*DAS – Dynamic Spectrum Access*), é possível através de um gerenciamento inteligente utilizar as faixas de frequência eficientemente.

A má utilização do espectro por Rádios Cognitivos ocasionará interferência e portanto, prejudicará a qualidade das comunicações dos usuários primários [1]. Assim, para que um usuário secundário possa realizar a ocupação do espectro, em primeiro lugar ele deve ser capaz de determinar eficientemente se uma faixa de frequências está livre ou ocupada por um usuário primário. Essa operação, chamada de sensoriamento espectral, é uma das características mais essenciais de um Rádio Cognitivo. Um sensoriamento espectral ótimo garante que o usuário secundário, ou oportunista, não interfira nas comunicações dos usuários primários.

O sensoriamento espectral baseado em detecção de energia constitui-se em um tópico de pesquisa de alto interesse devido à sua simplicidade e aplicabilidade, ao seu baixo custo computacional e facilidade de implementação.

Uma das faixas de frequência com excelentes oportunidades para sistemas de Rádio Cognitivo é a banda da TV. As características de propagação nessa faixa permitem propor muitos serviços que poderiam usar a tecnologia de Rádio Cognitivo, por exemplo, comunicações rurais, segurança pública, emergências, etc. Alguns padrões que visam o reaproveitamento de espaços livres no espectro são os seguintes: IEEE 802.22, que é o padrão para *Wireless Regional Area Networks (WRAN)*; ECMA-392, que especifica o controle de acesso ao meio MAC e PHY para operações nos espaços livres de TV, especificando uma série de mecanismos de proteção estabelecidos que podem ser usados para atender às exigências regulamentares; IEEE 802.11af, que é um padrão para *Wireless Local Area Network (WLAN)* em faixas de TV; ETSI RRS (*Reconfigurable Radio System*) para sistemas de Rádio Cognitivo.

1.1. Objetivo

O objetivo desta pesquisa é o estudo de sensoriamento espectral para Rádios Cognitivos. A avaliação é feita através de simulações de desempenho de técnicas de sensoriamento baseadas em detecção do nível de energia, principalmente em ambientes que utilizam a faixa de TV em distintos cenários.

A detecção de energia facilita o sensoriamento com rapidez e simplicidade de implementação. Existem algumas considerações que levam a limitações na precisão do sensoriamento que devem ser estudadas.

Neste trabalho, são estudadas algumas técnicas de sensoriamento espectral, suas vantagens e suas desvantagens, com o propósito de se determinar seu desempenho com base em sua precisão buscando encontrar espaços vazios no espectro.

Especificamente, os objetivos deste trabalho são:

- Estudo de técnicas de sensoriamento espectral baseados em detecção de energia.
- Simulação de algoritmos de sensoriamento espectral em linguagem de programação Matlab.
- Análise do desempenho desses algoritmos em distintos cenários.
- Utilização de plataforma de Rádio Definido por *Software* comercial, para aplicações práticas.

Em função do grande interesse das faixas das emissoras de TV, o estudo foi focado nessa banda.

1.2. Elementos Motivadores

Atualmente, o espectro eletromagnético é alocado estaticamente, isto é um usuário primário é autorizado a usar uma faixa de frequências que lhe foi destinada, sem permitir seu uso por outros usuários, por mais privilegiados que sejam.

Em sistemas de Rádio Cognitivo, o usuário primário é licenciado para o uso de uma faixa fixa de frequências, o usuário secundário ou oportunista está sempre à procura de espaços livres nos canais destinados aos usuários primários. Uma vez

encontrado um espaço livre, o usuário secundário reconfigura seus parâmetros de transmissão para a faixa de frequências livre e faz uso dela até que o usuário primário necessite utilizá-la novamente. Nesse caso, o usuário secundário deverá abandonar a frequência e continuar a transmissão em outra faixa livre, anteriormente identificada.

Um dos maiores desafios para o funcionamento ótimo de um Rádio Cognitivo é o fato que um usuário secundário não deve interferir no desempenho da comunicação dos usuários primários. Para isso, ele deve ter a capacidade de detectar a presença de até sinais mais baixos dos usuários primários[2].

Sendo o sensoriamento espectral um aspecto importante da tecnologia de Rádio Cognitivo, devem ser considerados muitos detalhes na sua realização, pois as diferentes tecnologias de telecomunicações, o canal de propagação, o ruído, as posições dos usuários primários, etc. levam a limitações na precisão do sensoriamento espectral.

Os elementos motivadores deste trabalho são justamente melhor utilização do espectro eletromagnético, fazendo-se um estudo de técnicas de sensoriamento que realizem essa tarefa de forma eficiente e eficaz.

Nesse contexto surgem logo de início perguntas como: o que se precisa para fazer um sensoriamento espectral? O sensoriamento espectral baseado em algoritmos de detecção de energia é eficiente? Em que casos? Quais são as limitações físicas? Como deve ser o procedimento? Qual é a probabilidade de detecção do espectro livre na faixa de TV?

1.3. Contribuições realizadas na área do sensoriamento espectral

Em 1992, Joseph Mitola III [3] apresentou o conceito de Rádio Definido por Software (*Software Defined Radio - SDR*), como um equipamento de rádio onde a maioria dos componentes sistêmicos usualmente implementados em hardware, são implementados em software. Isto é, parâmetros como frequência e modulação, dentre outros, são definidos por software.

Anos mais tarde, em 1999, Mitola [4] introduziu o conceito de Rádio Cognitivo como uma tecnologia onde um transceptor baseado em SDR pode alterar seus

parâmetros de forma inteligente automaticamente, a fim de fazer uso de frequências temporariamente não usadas por usuários licenciados.

Existem vários métodos de sensoriamento espectral, dependendo do nível de conhecimento do sinal a ser analisado; pode-se mencionar: detecção de energia, cicloestacionariedade e filtro casado [6].

Um problema no sensoriamento por detecção de energia, é que os usuários secundários só podem detectar a presença de um usuário primário quando a energia for superior a um certo limiar, que depende do ruído. Com esta técnica, não é possível diferenciar os sinais dos usuários primários dos sinais dos usuários secundários [7].

Uma abordagem que explora as características dos espaços livres no espectro e como elas podem ser consideradas para oportunidades de transmissão é apresentada em [8]. Nesse trabalho apresenta-se também os desafios encontrados para garantir a segurança das comunicações dos usuários primários, o que leva os usuários secundários a adotar estratégias especiais de detecção.

Alguns trabalhos sobre ocupação do espectro foram realizados ao longo do tempo. Em 2009, um estudo realizado na área metropolitana de Barcelona para a faixa de frequências 75Hz a 3GHz [9] revelou a ineficiência do uso do espectro naquela região. Em [9][10] apresentam-se estudos sobre medições do espectro onde se mostra que algumas faixas de frequências são bastante usadas e outras são pouco usadas.

Em 2011 foi apresentado um estudo sobre a ocupação do espectro eletromagnético na cidade de Chicago [11]. Medições feitas na faixa de frequências de 30MHz – 3000MHz, nos anos 2008, 2009 e 2010 mostram que o espectro tinha uma ocupação global media temporal de 18%, 15% e 14%, respectivamente. Na

figura 1.1. observa-se que em nenhuma faixa de frequência tem-se um aproveitamento ótimo do espectro.

Figura 1.1. Porcentagem de ocupação espectral para a faixa de 30 – 3000 MHz na cidade de Chicago – 2010. [11]

Esses trabalhos confirmaram os estudos feitos pela Comissão Federal de Comunicações (*FCC - Federal Communications Commission*) [12], que demonstraram que uma grande parte do espectro licenciado está sendo pouco usada. O uso do espectro tem variações de acordo com o horário e o local geográfico, o que mostra que enquanto algumas frequências são muito utilizadas, outras permanecem na maioria do tempo praticamente sem uso. Assim, essas faixas de frequência livres no espectro poderiam ser reutilizadas através de Rádios Cognitivos.

Uma Notificação de uma Proposta de Regulamentação (*NPRM - Notice of Proposed Rulemaking*) emitida pela FCC no ano 2003 [13] tinha como objetivo a

reavaliação das arquiteturas de redes sem fio. A proposta da FCC foi baseada principalmente na tecnologia de Rádio Cognitivo.

Uma norma do IEEE que considera a tecnologia de Rádio Cognitivo é a IEEE802.22, cujo objetivo é permitir o uso das faixas de frequência da banda de TV sem causar interferência, compartilhando o espectro eletromagnético e oferecendo acesso de banda larga em ambientes rurais.

Em [14], propõe-se um método de detecção de usuários primários de TV que usam a norma ATSC DTV baseado na detecção de sinais piloto. O desempenho foi avaliado para um canal gaussiano usando probabilidades de detecção. Mostrou-se que o desempenho aumenta a medida em que o tempo de detecção e o número de pontos da transformada rápida de Fourier FFT aumentam.

Algumas técnicas de detecção em sinais de TV da norma europeia DVB-T foram estudadas em [15]. Entre elas estão, a detecção por nível de energia, a detecção por autocorrelação, e a detecção por sinais pilotos. Os resultados são mostrados em função da probabilidade de detecção para determinadas relações SNR usando curvas ROC (*Receiver Operating Characteristic*). Um outro estudo para detecção de sinais DVB-T em diferentes cenários de desvanecimento é apresentado em [16]. Uma comparação do estado atual da técnica de detectores de sinais OFDM é realizado. Mostrou-se, que a escolha do detector depende do conhecimento prévio de cada sinal a ser detectado.

Em [17], foi avaliado o desempenho do detector de energia considerando diversos sinais reais de usuários primários. Os resultados obtidos mostram que apesar do princípio de funcionamento geral do método de detecção de energia, a detecção pode variar de acordo com o tipo de usuário primário. Estas diferenças de desempenho são notadas em intervalos curtos de observação, onde o desempenho do detector degrada para sinais que apresentam variações de potência altas. Porém, para sinais de potência menos variável, o detector de energia apresenta resultados similares.

Um estudo feito em [18] mostra um protótipo de sensoriamento espectral para sinais de TV. É apresentado o desempenho da detecção usando características de sinais ISDB-T, como a segmentação e a largura de banda de 6MHz. O protótipo cuja

faixa de operação é 470 – 770MHz, apresentou uma probabilidade de detecção acima de 0,9 e uma probabilidade de falso alarme de 0,01 para níveis de sinais maiores que $-114dBm$.

Em [6], diferentes classes de usuários primários exigem diferentes sensibilidades, velocidades e tempos de detecção. Por exemplo, os sinais de transmissão de televisão são muito mais fáceis de detectar que os sinais de GPS.

No sensoriamento por detecção de energia, um dos maiores problemas é encontrar um limiar de comparação ótimo. Em [19], é apresentado um método de detecção de energia robusto para Rádios Cognitivos baseado na estimação bayesiana. Este método não necessita utilizar o limiar de comparação para a detecção por nível de energia.

Realizações práticas relacionadas ao sensoriamento espectral foram feitas nos últimos anos usando o equipamento de SDR chamado USRP (*Universal Software Radio Peripheral*) da empresa Ettus Research.

Em [20] é apresentada uma demonstração experimental de Rádio Cognitivo empregando a plataforma de desenvolvimento USRP da Ettus Research, que facilita o desenvolvimento de SDR. Nesse trabalho, apresenta-se uma análise de interoperabilidade com duas arquiteturas de SDR na mesma faixa de frequência, mostrando a forma em que a plataforma USRP pode ser usada em aplicações de Rádio Cognitivo. O trabalho apresenta a coexistência de dois usuários primários, que mantêm uma comunicação entre eles através de uma técnica de Divisão de Frequência Duplex (FDD), e dois usuários secundários que se comunicam oportunisticamente com uma técnica semi-duplex.

Em 2009, foi desenvolvido um trabalho que apresenta a possibilidade do uso de USRP e o GNU Radio para a análise da eficiência do sensoriamento espectral [21]. Com ajuda de um algoritmo que mede a energia do sinal numa largura de banda fixa, e ao longo de uma janela de tempo de observação, é analisada a escassez do espectro na faixa de frequências de 2,5GHz.

Outro trabalho que apresenta um projeto de implementação de Rádio Cognitivo na plataforma USRP da Ettus para a faixa de frequências de 2,3GHz até 2,7GHz é disponibilizado em [22]. O usuário da plataforma USRP é um usuário

secundário, que procura espaços livres no espectro e acessa a faixa de frequência mais adequada para comunicação. Quando é detectada a presença do usuário primário, o usuário secundário usa o “*handover*” para mudar de frequência e continuar sua comunicação. Nesse trabalho, foram usados dois dispositivos USRP para os usuários secundários a procura de espaços livres do espectro. Para o sensoriamento do espectro livre é usada a detecção da energia, utilizando-se um limiar predefinido de ruído.

Em [23] avalia-se algoritmos de detecção usando GNU Radio e unidades USRP na banda ISM 2,4 GHz. Foi avaliado o desempenho dos algoritmos de detecção em relação ao custo computacional do processo. Deve-se alcançar um equilíbrio entre esses dois parâmetros, o que é essencial num sistema de Rádio Cognitivo. No caso ideal, um bom desempenho deverá ser obtido com um baixo custo computacional.

Outros trabalhos experimentais de sensoriamento espectral, baseados em detecção de energia são apresentados em [24] e [25]. Neste último, para o sensoriamento do espectro propõe-se um sistema multiantena. A presença do usuário primário é detectada usando-se a correlação do sinal recebido por um usuário secundário equipado com múltiplas antenas. Em [25], conclui-se que, apesar da existência de numerosos estudos teóricos sobre sensoriamento espectral, faz-se necessário a realização de estudos experimentais que possam avaliar o desempenho das técnicas de sensoriamento espectral na prática, para uma determinada aplicação.

1.4. Justificativa

Segundo estudos sobre ocupação espectral [9],[10],[11],[12], existe grande parte do espectro licenciado que não está sendo usado eficientemente.

Não se tem dúvida de que o Rádio Cognitivo traz muitos benefícios para os sistemas de telecomunicações por adotar um acesso dinâmico ao espectro. Entretanto, é necessário um sensoriamento espectral para garantir que não haja interferência com os usuários licenciados [4] [5].

Quando se faz um sensoriamento espectral numa determinada faixa de frequências, ocorrem as seguintes situações:

- determinar que uma certa frequência está sendo usada, e na realidade está.
- determinar que uma certa frequência está sendo usada, quando em realidade não está.
- determinar que uma certa frequência não está sendo usada, e na realidade não está.
- determinar que uma certa frequência não está sendo usada, quando em realidade está.

Com base nesses resultados, pode-se determinar se o sensoriamento espectral é eficiente ou não. O caso mais prejudicial é determinar que o espectro está disponível quando na realidade não está, causando assim interferência nas comunicações dos usuários primários.

Como visto em [1], [6] e [7], o sensoriamento espectral baseado em detecção de energia constitui-se em um tópico de pesquisa de alto interesse devido à sua simplicidade e aplicabilidade, ao seu baixo custo computacional e facilidade de implementação. Estudos sobre detecção de energia devem ser feitos para distintos cenários.

Alguns estudos experimentais sobre sensoriamento espectral usando plataformas comerciais são apresentados em [20], [21], [22], [23], [24], [25]. Em todos esses trabalhos, estudos práticos mais extensos para casos distintos e diversos cenários são recomendados.

Existem varias normas para Rádio Cognitivo; uma delas é o IEEE 802.22, cujo objetivo é permitir o uso das faixas de frequência da banda de TV para compartilhamento do espectro eletromagnético, oferecendo acesso de banda larga em ambientes rurais. Em [14], [15], [16], [18], diversos métodos de sensoriamento espectral para essa faixa foram estudados.

Neste trabalho, será abordado o sensoriamento espectral baseado na detecção de energia, na faixa de TV.

1.5. Rádio Cognitivo

Existem várias definições para Rádio Cognitivo, mas a definição mais adotada [26] é a da União Internacional de Telecomunicações (UIT) [27].

Um Sistema de Rádio Cognitivo é um sistema de rádio que usa uma tecnologia que permite ao sistema:

- Obter conhecimento de seu ambiente operacional e geográfico, as políticas estabelecidas (capacidades cognitivas);
- Ajustar dinâmica e automaticamente seus parâmetros e protocolos de operação de acordo ao conhecimento obtido, a fim de atingir os objetivos predefinidos (características reconfiguráveis);
- Aprender dos resultados obtidos (capacidade de aprendizagem).

A capacidade cognitiva trata de obter informações sobre o tipo de usuário, seu estado, entorno geográfico e necessidades dos usuários secundários. Os métodos para se obter essas informações são o sensoriamento do espectro, a rádio-localização, a utilização de banco de dados, dentre outros.

A capacidade de reconfigurabilidade faz uso do conhecimento obtido e, automaticamente, faz decisões de reconfiguração de parâmetros como potência de transmissão, faixa de frequências, protocolos, tipo de modulação e tecnologia.

A figura 1.2 apresenta uma ilustração do funcionamento de um Rádio Cognitivo e como se dá o acesso ao espectro de forma dinâmica.

Figura 1.2. Descrição geral do funcionamento do Rádio Cognitivo [28].

Para poder atender a essas características, um Rádio Cognitivo deve utilizar diversas tecnologias. Assim, na sua implementação é necessário considerar pelo menos as seguintes funções [28]:

Sensoriamento Espectral (*Spectrum Sensing*): consiste na determinação da existência de espaços livres no espectro em um certo ambiente. Permite saber quais faixas de frequência do espectro estão sendo ocupadas por usuários primários e quais podem ser consideradas como oportunidades de transmissão.

Decisão do espectro (*Spectrum Decision*): consiste na análise de todas as faixas de frequência livres encontradas por sensoriamento espectral, e na seleção de qual delas atende melhor aos requisitos de transmissão do usuário secundário, e dessa forma, fazer uso do espectro oportunisticamente.

Compartilhamento do Espectro (*Spectrum Sharing*): consiste no gerenciamento de forma imparcial do compartilhamento do espectro livre entre os diversos usuários secundários.

Mobilidade Espectral (*Spectrum Mobility*): consiste na habilidade de um usuário secundário de, ao detectar a presença de um usuário primário, alterar seus parâmetros de transmissão para não causar interferência ao usuário licenciado.

1.5.1. Regulação e Padronização

As principais agências reguladoras são a FCC nos Estados Unidos e o Comitê de Comunicações Eletrônicas (ECC) na Europa. A FCC estabeleceu em 2010 as regras finais para TVWS [29], enquanto a ECC estudou os requisitos para o funcionamento de Rádio Cognitivo na faixa de UHF [30].

As normas são feitas pelos organismos ITU, IEEE, ETSI e ECMA, para auxiliar e facilitar o desenvolvimento e a implantação da tecnologia de Rádio Cognitivo. Essas normas consideram, principalmente, o aumento na eficiência do uso do espectro eletromagnético para quem têm que criar novas formas de acessar e repartir o espectro.

O Rádio Cognitivo é uma tecnologia em que o equipamento muda seus parâmetros constantemente. Assim, é preciso haver normas que determinem em

quais faixas de frequências é permitido fazer uso dessa tecnologia. Quando se trata do uso em faixas licenciadas, necessita-se de restrições técnicas para garantir sua operação sem interferir com as transmissões dos usuários licenciados.

São necessárias normas para a compatibilidade de equipamentos de distintos fabricantes e a coexistência com os usuários primários, bem como normas que ajudem na implementação ótima do sensoriamento espectral, visto que é uma parte fundamental de um Rádio Cognitivo. Atualmente, dentre as principais normas tem-se a IEEE 802.22, que é a primeira norma baseada em tecnologia de Rádio Cognitivo [31],[32]. Ela é uma norma para redes sem fio de área regional (WRAN, *Wireless Regional Access Network*) nas faixas UHF/VHF de televisão, entre 54MHz e 862MHz. Nessa norma, propõe-se o uso dos canais de televisão. O grupo de IEEE 802.22 foi formado em 2004. Nas normas especifica-se os seguintes limiares para desocupar um canal quando se observa a presença dos seguintes sinais [26].

- Televisão digital: -116 dBm sobre um canal de 6 MHz.
- Televisão Analógica (NTSC): -94 dBm no pico da portadora.
- Microfones sem fio: -107 dBm numa largura de banda 200 kHz.

O protocolo 802.22 considera a utilização de tabelas de ocupação do espectro para diminuir a interferência sobre os usuários primários. Além disso, a norma estabelece limites para a potência máxima de transmissão e interferência em faixas adjacentes.

1.5.2. Desafios no Rádio Cognitivo

Os desafios de Rádio Cognitivo abrangendo várias áreas de pesquisa. Os principais tópicos de interesse são: a cognição, a comunicação entre usuários secundários, a distribuição dos canais de frequências livres, a segurança nas comunicações, os algoritmos de sensoriamento, os protocolos, o projeto de *hardware*, a flexibilidade e a rapidez de funcionamento

Um dos problemas mais relevantes é o desempenho de algoritmos que permitam saber com certeza se o Rádio Cognitivo vai interferir ou não com comunicações de usuários primários. Quando vários usuários secundários querem fazer uso de um espectro livre, algoritmos de gestão do espectro, cooperação e

coordenação devem ser desenvolvidos, respeitando uma adequada canalização e sub-canalização.

Outro desafio a se superar surge quando se apresenta o caso do terminal “oculto”. Uma solução que está sendo pesquisada para esse problema é o uso de redes de rádios cognitivas cooperativas que possam compartilhar informações para aperfeiçoar o processo de sensoriamento espectral.

Desafios de *hardware* no projeto de circuitos analógicos e digitais devem ser cuidadosamente considerados. Métodos de processamento digital que possam cumprir os requisitos de um equipamento de alta sensibilidade, com rapidez na reconfiguração de frequência devem ser empregados.

.Desafios da Implementação: Devem ser consideradas técnicas para ajustar e selecionar dinamicamente a frequência, o controle da potência e da conversão analógico-digital. Na parte de RF do Rádio Cognitivo existem dificuldades na obtenção de rapidez de mudança de frequência de operação, comunicação com vários pontos no mesmo tempo, além de realização da tarefa do sensoriamento.

Com relação às arquiteturas do transmissor e do receptor, eles podem ser classificados em rádios de banda larga e rádios sintonizáveis. No caso da arquitetura de banda larga, necessita-se de uma alta faixa dinâmica e alta linearidade do LNA (*Low-noise amplifier*). No caso de um rádio sintonizável, os problemas comuns se apresentam na operação da antena para frequências dinâmicas, bem como nos duplexadores e filtros passivos. Na figura 1.3 apresenta-se essas duas arquiteturas.

Figura 1.3. Arquitetura de transceptores de Rádios Cognitivos [20]

Desafios no ADC/DAC: Para conseguir a flexibilidade que o Rádio Cognitivo precisa, o sinal deve ser processado de forma digital. Um cenário ideal é converter o sinal analógico em sinal digital no bloco mais próximo possível da antena.

Como o Rádio Cognitivo deve operar em diferentes frequências, o conversor deve ter uma alta faixa dinâmica de funcionamento e ter a capacidade de operar numa faixa muito ampla de frequências [25], Esses requisitos são muito mais que a tecnologia disponível atualmente permite. Por isso, os receptores de Rádio Cognitivo estão baseados em *down-converters* e os sinais são filtrados antes do ADC, para reduzir a faixa dinâmica e a largura de banda requeridas.

1.6. Resumo dos métodos do Sensoriamento Espectral

O sensoriamento espectral é o processo mediante o qual é feita a inspeção do espectro de forma dinâmica e contínua para se encontrar faixas de frequências livres. Neste processo, podem ocorrer as seguintes situações:

- o usuário secundário não conhece nenhuma característica de transmissão do usuário primário; nesse caso, a única forma de fazer o sensoriamento espectral é por meio da detecção do nível de energia.
- o usuário secundário conhece alguma característica do sinal de transmissão do usuário primário, tal como sinais pilotos, tipo de modulação, dentre outras; nesse caso pode ser usada a cicloestacionaridade.
- o usuário secundário conhece as características do sinal do usuário primário, ou seja, tem um conhecimento completo do sinal a ser detectado; nesse caso a utilização de um filtro casado seria ideal para a sua detecção.

1.6.1. Detecção de Energia

Quando não se conhece os parâmetros de transmissão de um usuário primário, pode-se usar o método de detecção por nível de energia [33][34].

Na detecção de energia, um sinal recebido numa largura de banda é integrado durante um intervalo de tempo, e comparado com um limiar para decidir a presença ou não de um usuário primário, formando um problema de decisão binária.

Esse método faz uma comparação do nível de energia do sinal detectado com um limiar que depende do nível do ruído [35], como mostrado na figura 1.4.

Figura 1.4. Processo do sensoriamento.

Se o nível de energia do sinal detectado é mais alto que o limiar de comparação, diz-se que há transmissão na faixa de frequências, ou seja, que o canal está ocupado. Se o nível do sinal estiver abaixo do limiar, diz-se que aquela faixa de frequências está livre e os usuários secundários podem considerá-la como uma opção para transmissão.

Em [36], apresenta-se dois tipos de detector de energia, que estão representados na Figura 1.5.

Figura 1.5. a) detector de energia com pré-filtro analógico, b) detector usando FFT.

Na parte superior da figura, apresenta-se um detector convencional que utiliza um filtro específico para a faixa de frequências onde se deseja fazer o sensoriamento, seguido de unidades de processamento digital. Como opção, a parte inferior da figura apresenta uma implementação totalmente digital, usando a Transformada Rápida de Fourier (FFT).

O sensoriamento usando detecção de energia apresenta algumas dificuldades, sendo uma delas a de estabelecer um limiar de comparação ótimo. Além disso, esse método não consegue identificar o tipo de sinal analisado, mas apenas se o sinal está presente ou não [7].

Um problema na detecção por energia é que o limiar usado é altamente suscetível ao nível do ruído. Por isso, no projeto do sistema, a escolha de um limiar correto é crítica para um bom funcionamento. Devem-se também considerar que o limiar pode depender do tipo do sinal do usuário primário.

O detector de energia somente pode determinar a presença ou ausência de sinal, mas não pode saber se esse sinal é modulado, se é uma interferência ou ruído; ou se é do usuário primário ou de outro usuário de Rádio Cognitivo. O detector de energia não funciona para sinais com espalhamento espectral como CDMA, pois o nível da densidade de potência do sinal é mais baixo que a do ruído.

1.6.2. Filtro Casado

Para se fazer uso deste método, é necessário conhecer completamente as características do sinal transmitido como, por exemplo, o tipo de modulação e, o formato dos pacotes de dados transmitidos. Mesmo assim, se o Rádio Cognitivo tivesse o conhecimento dessas informações previamente, seria necessário demodular o sinal primário, o que implicaria que o Rádio Cognitivo fizesse operações de sincronismo. Assim, a forma ótima de saber se uma faixa de frequência está sendo usada por um usuário primário é com um filtro casado [37].

Como os Rádios Cognitivos necessitam analisar várias faixas de frequência, para se aplicar este método seria necessário conhecer todos os tipos de sinal, o que faria sua implementação altamente complexa [38].

1.6.3. Cicloestacionariedade

A Cicloestacionariedade é um processo que se repete ciclicamente ou periodicamente. Ela é utilizada quando não se tem conhecimento perfeito do sinal a ser analisado, mas conhecem-se algumas de suas características, como a periodicidade, frequência da portadora, ciclos prefixados, etc. [39].

Para se detectar o sinal é usada uma função de correlação cíclica, para diferenciar o sinal do ruído. Além de se detectar o usuário primário, pode-se determinar o tipo do sinal, por meio das diferentes frequências dos sinais. A figura 1.6 mostra o processo de detecção.

Figura 1.6. Detecção por Cicloestacionariedade.

Uma vantagem do detector cicloestacionário é a capacidade de classificar os sinais detectados, para diversos sinais com periodicidades e frequências diferentes. Assim, ele é mais robusto quanto a interferências e ruído.

Por outro lado, a complexidade computacional é uma de suas principais desvantagens, pois o número de operações que tem que realizar para os cálculos de correlação espectral é superior aos demais métodos. Isso ocasiona um tempo de operação também maior, o que impede a realização de um sensoriamento de alta velocidade.

1.6.4. Detecção cooperativa

Quando um dispositivo de Rádio Cognitivo faz o sensoriamento e determina quais frequências estão livres nesse local, se quiser fazer uso dessas frequências deveria ser feita sem causar interferência nos usuários primários. Entretanto por não ser conhecida a posição do receptor do usuário primário, surgem complicações.

Uma solução para esse problema é o uso da detecção cooperativa. Vários dispositivos de Rádio Cognitivo fazem o sensoriamento e compartilham as informações para melhorar a detecção.

Devido as degradações, que o sinal sofre durante a propagação, e que pioram a detecção local, uma detecção cooperativa permite diminuir esses efeitos, pois todos os rádios cognitivos recebem o sinal afetado da mesma forma. Assim, um aumento na probabilidade de detecção do usuário primário é obtido [40].

Em [41] estudam-se as limitações que um Rádio Cognitivo poderia ter se as operações de sensoriamento espectral e a transmissão de dados fossem feitas no mesmo dispositivo, devido aos conflitos que possam gerar nos dois modos de operação. Para solucionar esse problema, propõe-se a criação de duas redes separadas: uma rede dedicada a fazer o sensoriamento espectral de forma cooperativa, e outra rede para a transmissão de dados.

As desvantagens da detecção cooperativa compreende o incremento do processamento computacional nos dispositivos de Rádio Cognitivo, o incremento no tráfego nas redes, além de não determinar as posições dos receptores primários, apenas dos transmissores.

1.6.5. Métodos Híbridos

Combinações de técnicas previamente descritas são possíveis e podem ser mais robustas para fazer o sensoriamento espectral, especialmente para poder saber se o sinal presente trata-se de um usuário primário ou secundário. Entretanto, devem ser tomadas certas precauções para que o sensoriamento não tenha muito custo computacional ou necessite de muito tempo de processamento.

1.7. Estrutura de um Sensoriamento Espectral

Segundo o padrão IEEE 802.22, não se exige uma técnica definida para realizar uma detecção. Em [42], apresenta-se um modelo de avaliação do desempenho dos distintos métodos de sensoriamento espectral. Detalha-se as informações necessárias de entrada ao processo de sensoriamento e as formas de avaliar os resultados destes. Na figura 1.7 mostra-se a estrutura para poder avaliar o sensoriamento espectral.

Figura 1.7. Estrutura do sensoriamento espectral

Para se poder avaliar um método de sensoriamento espectral, precisa-se de informações iniciais. Dentre as entradas do processo de sensoriamento espectral temos:

- Número de canal, que indica que canal vai ser detectado.
- Largura de banda, que indica a largura de banda do canal a ser detectado.
- Tipo de Sinal, que fornece a informação e as características do tipo do sinal a ser detectado; por exemplo TV analógica ou TV digital.
- Modo de sensoriamento; existem três modos principais de sensoriamento. O primeiro modo é o de ativação da Decisão de Sinal Presente. O segundo é a ativação da Decisão de Sinal Presente mais uma métrica de confiança. O terceiro modo é a ativação da estimação da intensidade de campo (*Field Strength Estimate*) e a estimação da precisão da intensidade de campo (*FS Estimate Accuracy*). O segundo e o terceiro modos são opcionais; a informação que se requer num Rádio Cognitivo é se a faixa de frequência considerada está ocupada ou não, isto é, o resultado correspondente ao primeiro modo.
- Probabilidade de falso alarme (Pfa), que especifica a probabilidade máxima permitida de falso alarme quando há somente ruído no canal.

Para avaliar o processo do sensoriamento, nas saídas da estrutura devemos ter informações como:

- Modo de detecção, que é a mesma informação dada na entrada da estrutura, usado para a interpretação dos resultados.
- Tipo do sinal, mesma informação da entrada, serve para interpretação dos resultados.
- Decisão de Sinal Presente, onde obtemos um valor binário que somente determina se o sinal do determinado canal está presente ou ausente.
- Métrica da confiança, especifica a medida da confiança do resultado obtido com o método de sensoriamento. Se o teste estatístico é alto, a métrica de confiança seria alta; ou se apenas supera o limiar de comparação, a métrica de confiança seria baixa. Essas informações são importantes quando se combinam vários detectores para decisão de ocupação do espectro.
- Estimação da Intensidade de Campo, representa a intensidade do campo eletromagnético do sinal especificado, isto é usado para determinar se a estimação está perto do contorno protegido da TV.
- Estimação da precisão da intensidade de campo, é uma medida que detalha quanto é a precisão da informação da intensidade de Campo.

1.8. Visão Geral do Trabalho

Para a realização deste trabalho, primeiramente, foi feita uma revisão bibliográfica visando determinar as contribuições existentes na área de sensoriamento espectral para Rádio Cognitivo. A seguir foram feitos estudos com ênfase em sensoriamento espectral por energia.

Segundo explicado em [6], há duas faixas de frequência preferidas em que os Rádios Cognitivos poderiam ser de muito interesse em um futuro próximo: as faixas de 400-800 MHz (bandas de TV UHF) e 3-10 GHz. Neste trabalho, serão feitas simulações na banda de TV. Serão implementados algoritmos em Matlab para sensoriamento espectral baseados em detecção de energia.

Para avaliação do sensoriamento espectral, segue-se como referência a descrição apresentada na secção 1.7, detalhando primeiramente o cenário onde vai ser aplicado o algoritmo de sensoriamento incluindo o tipo de sinal, a largura de banda, o número de canais, etc. A seguir, apresenta-se o algoritmo que é usado no

sensoriamento, neste caso, a detecção de energia. Finalmente são apresentados os resultados de desempenho desse algoritmo no cenário detalhado.

No capítulo 2, faz-se uma revisão da faixa de frequências escolhida para a aplicação dos algoritmos de detecção, que é a banda de TV, dando ênfase ao padrão brasileiro de TV.

No capítulo 3, é apresentada a formulação matemática dos algoritmos de sensoriamento baseados na detecção de energia.

No capítulo 4, é apresentado o processo de sensoriamento espectral com uma visão de hardware, mostrando como o sinal é recebido na antena do Rádio Cognitivo, é amostrado e depois transformado do domínio do tempo para o domínio da frequência e finalmente como é processado para se determinar se nessa frequência há presença de sinal ou não, de uma perspectiva de *hardware*.

No capítulo 5, são apresentados resultados de simulações realizadas em diversos tipos de ambiente.

O capítulo 6 contém as conclusões do estudo, assim como sugestões para futuros trabalhos a serem desenvolvidos.

Capítulo 2

CARACTERIZAÇÃO DO ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

2.1. Oportunidade de Espectro Eletromagnético para Rádio Cognitivo

Em sistemas de telecomunicações sem fio, o espectro eletromagnético é um recurso fundamental. As ondas de rádio propagam-se transmitindo informação, e ocupando parte do espectro eletromagnético que é limitado e escasso.

O conceito de onda eletromagnética independe de frequência, mas, devido a limitações de propagação, nem toda a frequência é adequada para uso em sistemas de telecomunicações sem fio atuais. O intervalo de frequências destinado às comunicações em geral está compreendido entre 3KHz e 300GHZ. Na tabela 2.1, mostra-se as bandas de frequência usadas em telecomunicações, suas nomenclaturas e exemplos dos serviços que são oferecidos.

As características das faixas de frequência abaixo de 3GHz são de especial interesse pois as ondas podem propagar-se com facilidade na presença de obstáculos, são mais imunes ao ruído, e não há necessidade de linha de visada direta.

A transmissão de vários sinais em uma mesma frequência e em uma mesma área leva à interferência entre eles. É responsabilidade dos organismos encarregados de administrar o espectro, autorizar usuários em determinadas faixas de frequência. No Brasil, o órgão responsável pelo espectro eletromagnético é a Agencia Nacional de Telecomunicações (ANATEL).

Tabela 2.1. Bandas de frequência

Nome	Sigla	Banda ITU	Frequência	Utilização
Frequência Extremamente Baixa	ELF	1	3 a 30 Hz	Comunicações com submarinos
Frequência Super Baixa	SLF	2	30 a 300 Hz	Comunicações com submarinos
Frequência Ultra Baixa	ULF	3	300 a 3.000 Hz	Comunicações dentro de minas
Frequência Muito Baixa	VLF	4	3 a 30 KHz	Comunicações submarinas, detectores de avalanches, monitores de batimentos cardíacos, geofísica
Frequência Baixa	LF	5	30 a 300 KHz	Navegação, sinais de tempo, ondas longas radiodifusão AM
Frequência Média	MF	6	300 a 3.000 KHz	Radiodifusão Ondas Médias AM
Frequência Alta	HF	7	3 a 30 MHz	Ondas Curtas, Rádio Amadores, Comunicações aeronáuticas além do horizonte
Frequência Muito Alta	VHF	8	30 a 300 MHz	Radiodifusão FM, TV, Comunicações aeronáuticas torre-avião em visibilidade, Comunicações aeronáuticas avião-avião
Frequência Ultra Alta	UHF	9	300 a 3.000 MHz	Radiodifusão TV, Fornos de micro-ondas, telefones celulares, Redes Locais sem Fio (LAN), Bluetooth, GPS, Walkie-Talkies, Telefones sem Fio
Frequência Super Alta	SHF	10	3 a 30 GHz	Dispositivos de Micro-ondas, Redes Locais sem Fio (LAN), Radares,
Frequência Extremamente Alta	EHF	11	30 a 300 GHz	Radioastronomia, Links de Micro-ondas

Sendo possível para um Rádio Cognitivo operar em qualquer banda de frequência, uma banda de interesse e na qual há boas características de propagação é a banda de TV, entre 54MHz e 862MHz. Nesse sentido, foram desenvolvidos padrões como o IEEE 802.22, que utiliza espaços vazios de espectro

usando a tecnologia de Rádio Cognitivo [31][32], especificamente para redes sem fio de área regional (*WRAN, Wireless Regional Access Network*).

Considerando o interesse nas transmissões de TV digital nos últimos anos, pelas grandes vantagens em relação à TV analógica, tais como maior qualidade na recepção para mesmas condições de propagação, largura de banda e potência, foi proposta a mudança da TV analógica para a TV digital. Na seção seguinte serão apresentadas as características desses sinais de TV digital.

2.2. Caracterização do sinal de TV

No Brasil, as bandas destinadas para o uso de radiodifusão de televisão encontram-se nas faixas de VHF e UHF. A tabela 2.2 mostra essas bandas e sua divisão em canais.

Tabela 2.2. Bandas para TV

Banda	Sigla	Faixa UIT	Frequência	Canais
Frequência Muito Alta	VHF	8	54 – 72 MHz	2 - 4
Frequência Muito Alta	VHF	8	76 – 88 MHz	5 - 6
Frequência Muito Alta	VHF	8	174 – 216 MHz	7 - 13
Frequência Ultra Alta	UHF	9	470 – 608 MHz	14 – 36
Frequência Ultra Alta	UHF	9	614 – 806 MHz	38 – 69

Cada canal de TV tem uma largura de banda de 6 MHz, padrão M, segundo a ITU. O número de canais disponíveis para TV no Brasil é 12 na banda VHF e 55 na banda UHF, Sendo um total de 67 canais que ocupam 402 MHz do espectro eletromagnético.

Esses canais estão distribuídos pelo território nacional de acordo com regras estabelecidas pela ANATEL, que levam em consideração a localização da estação geradora, a altura da antena, a potência, a classe do serviço, a área de cobertura, a morfologia do terreno e as estações interferentes [43].

2.3. Padrão ISDB-TB

Diversos padrões foram desenvolvidos para TV digital. Dentre eles, temos: o ATSC, o DVB-T e o ISDB-TB. O ATSC (*Advanced Television System Committee*) é o sistema desenvolvido pelos Estados Unidos e adotado nos Estados Unidos, Canadá, México, Guatemala, Honduras, El Salvador, Bahamas e Coreia do Sul. A modulação adotada para esse sistema é 8VSB. Na Europa, o sistema DVB-T foi desenvolvido pelo Fórum DVB e adotado atualmente na Europa e alguns países da Ásia e África; a modulação utilizada pelo sistema europeu DVB-T de televisão digital terrestre é o COFDM de portadoras múltiplas e com intervalo de guarda.

O ISDB-T (*Integrated Services for Digital Broadcasting Terrestrial*) foi desenvolvido e adotado pelo Japão. Uma modificação do padrão Japonês feita pelo Brasil é chamado ISDB-TB, e foi adotado pelo Brasil e a maioria de países de América Latina. A modulação desse sistema é BST-OFDM (*Band Segmented – OFDM*), que é diferente do método monoportadora utilizado nos sistemas ATSC (8VSB) e semelhante ao sistema multiportador utilizado no DVB-T, em que as diferenças básicas estão na segmentação da banda do canal em treze segmentos distintos e na inserção do entrelaçamento temporal (*time interleaving*).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) disponibilizou a norma para o sistema de transmissão de TV Digital terrestre ISDB-TB denominada NBR15601, que foi elaborada pela Comissão de Estudo Especial de Televisão Digital (ABNT/CEE-00:001.85). Essa norma está baseada no trabalho do Fórum do Sistema Brasileiro de Televisão Digital Terrestre, conforme estabelecido no Decreto Presidencial nº 5.820, de 29/6/2006. [44]. Nessa norma, cada canal de TV Digital ocupa 6MHz, sendo 5,7MHz a largura de banda para transmissão e o restante para separação com o canal adjacente.

O arranjo do segmento OFDM deve obrigatoriamente ser de acordo com a figura 2.1. O segmento número 0 deve obrigatoriamente ser posicionado no centro da banda e os segmentos sucessivos colocados alternativamente acima e abaixo desse segmento. Na figura 2.1, mostra-se a canalização da banda para a TV Digital.

Figura 2.1. Banda Segmentada BST – OFDM para TV Digital

O espectro de transmissão de 6 MHz está dividido em 14 partes das quais utiliza-se 13 segmentos OFDM para a transmissão, cada um com largura de banda de 428,572 KHz, ($6\text{MHz}/14$); o segmento restante é dividido em duas partes, alocadas nas bordas para a separação com os canais adjacentes.

O sistema permite diferentes combinações desses segmentos de acordo com as necessidades e serviços desejados, como mostrado na figura 2.2. Pode-se transmitir até três tipos de serviço com modulação e outras características diferentes:

- HDTV, Televisão de alta definição (*High-Definition Television*), que faz uso de 9 segmentos e que tem uma modulação 64-QAM para receptores fixos.
- SDTV, Televisão de definição padrão (*Standard-Definition Television*), que faz uso de 3 segmentos com modulação 16QAM para receptores fixos SD e receptores móveis.
- LDTV, Televisão de baixa definição (*Low Definition Television*), que usa 1 segmento com modulação QPSK para receptores portáteis.

Figura 2.2. Exemplo de transmissão com banda segmentada

Algumas características de transmissão da TV Digital no Padrão Brasileiro segundo a Anatel são mostradas na Tabela 2.3

Tabela 2.3. Parâmetros do sistema de transmissão de TV

	Parâmetros	Valores
1	Número de segmentos	13
2	Largura do segmento	$6\,000/14 = 428,57\text{ kHz}$
3	Banda ocupada	5,575 MHz (modo 1) 5,573 MHz (modo 2) 5,572 MHz (modo 3)
4	Número de portadoras	1 405 (modo 1) 2 809 (modo 2) 5 617 (modo 3)
5	Tipo de modulação	DQPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM
6	Duração dos símbolos ativos	252 μs (modo 1) 504 μs (modo 2) 1008 μs (modo 3)
7	Espaçamento de portadoras	$B_{ws}/108 = 3,968\text{ kHz}$ (modo 1) $B_{ws}/216 = 1,984\text{ kHz}$ (modo 2) $B_{ws}/432 = 0,992\text{ kHz}$ (modo 3)
8	Duração do intervalo de guarda	1/4, 1/8, 1/16, 1/32 da duração do símbolo ativos 63; 31,5; 15,75; 7,875 μs (modo 1) 126; 63; 31,5; 15,75 μs (modo 2) 252; 126; 63; 31,5 μs (modo 3)

9	Duração total dos símbolos	315; 283,5; 267,75; 259,875 μ s (modo 1) 628; 565; 533,5; 517,75 μ s (modo 2) 1 260; 1 134; 1 071; 1 039,5 μ s (modo 3)
10	Duração do quadro de transmissão	204 símbolos OFDM
11	Codificação de canal	Código convolucional, taxa = 1/2 com 64 estados Puncionado para as taxas 2/3, 3/4, 5/6, 7/8
12	Entrelaçamento interno	Entrelaçamento intra e intersegmentos (entrelaçamento em frequência) Entrelaçamento convolucional com profundidade de <i>interleaving</i> 0; 380; 760; 1.520 símbolos (modo 1) 0; 190; 380; 760 símbolos (modo 2), 0; 95; 190; 380 símbolos (modo 3)

2.4. Formato do sinal de RF

O sinal na banda de RF é dado pelas seguintes equações:

$$s(t) = Re \left\{ e^{j2\pi f_c t} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{K-1} c(n, k) \psi(n, k, t) \right\} \quad (2.1)$$

$$\psi(n, k, t) = \begin{cases} e^{j2\pi \frac{k-K_c}{T_u}(t-T_g-nT_s)} & nT_s \leq t < (n+1)T_s \\ 0 & t < nT_s, \quad (n+1)T_s \leq t \end{cases} \quad (2.2)$$

onde

- k é o número da portadora que é sucessivo para toda a banda, com o número 0 atribuído à portadora 0 do segmento 11;
- n é o número do símbolo;
- K representa as portadoras totais (modo 1: 1405, modo 2: 2809, modo 3: 5617);
- f_c é a frequência central do sinal de RF;
- K_c é o número da portadora correspondendo a frequência central de RF (modo 1: 702, modo 2: 1404, modo 3: 2808);
- T_s é o tempo de duração do símbolo OFDM;
- T_g é o tempo de duração do intervalo de guarda;
- T_u é o tempo de duração da parte útil do símbolo;

- $c(n, k)$ é o vetor complexo do sinal ponto correspondente ao símbolo número n e portadora número k ;
- $s(t)$ é o sinal de RF.

2.5. Classificação das Estações de TV

A FCC especificou máscaras espectrais para diferentes aplicações. Essas máscaras espectrais mostram a potência de saída permitida para determinadas frequências. A aplicação das máscaras deve obrigatoriamente levar em consideração as classes e subclasses das estações. As estações digitais são classificadas em classe especial, classe A, classe B e classe C. As tabelas 2.4. e 2.5. indicam, respectivamente, para VHF e UHF os valores máximos de potência ERP para cada classe de estação, tomando-se como altura de referência 150m acima do nível médio do terreno e as distâncias máximas de contorno protegido. Cada classe está dividida em subclasses sendo a diferença de potência entre as subclasses de 1dB [45].

Tabela 2.4. Estações em função de características para a faixa de VHF

Classe	Máxima Potência ERP	Altura Referência Acima do Nível Médio Radial (m)	Distância Máxima ao Contorno Protegido (km)
Especial	16 kW (12 dBk)	150	65
A	1,6 kW (2 dBk)		48
B	0,16 kW (-8 dBk)		32
C	0,016 kW (-18 dBk)		20

Tabela 2.5. Estações em função de características para a faixa de UHF

Classe	Canais UHF	Máxima Potência ERP	Altura Referência Acima do Nível Médio Radial (m)	Distância Máxima ao Contorno Protegido (km)
Especial	14 a 25	70 kW (18.5 dBk)	150	57
	26 a 46	80 kW (19 dBk)		
	47 a 59	100 kW (20 dBk)		
A	14 a 59	8 kW (9 dBk)		42
B	14 a 59	0,8 kW (-1 dBk)		29
C	14 a 59	0,08 kW (-11 dBk)		18

2.6. Medidas

Sabe-se que existem muitos elementos que degradam de modo considerável a propagação do sinal de TV, tais como o ruído impulsivo, a distorção pelo multipercurso, a interferência de canais adjacentes, a topografia irregular do terreno. Devido a esses fatores é difícil saber se em uma certa área e em um determinado instante existe sinal de TV.

A fim de se determinar o estado de ocupação dos canais de TV, na figura 2.3. apresenta-se o diagrama do espectro eletromagnético na banda UHF na cidade de São Paulo no dia 27 de maio do ano 2014. O espectro foi coletado com um equipamento SDR, no qual é possível observar a potência recebida.

Figura 2.3. Espectro de RF de canais de TV na cidade de São Paulo

Atualmente, os canais com transmissão analógica estão na banda VHF, que corresponde à faixa de frequências de 54 – 88 MHz (canais 2 - 6) e 174 – 216 MHz (canais 7 - 13). Os canais com transmissão de TV digital estão na banda UHF, que corresponde à faixa de frequências de 470 – 806 MHz (canais 14 - 69). O canal 37 na banda UHF de frequência 608 - 614 MHz não é usado para radiodifusão, é reservado para pesquisas radioastrômicas.

Segundo a FCC, as faixas de VHF e UHF de frequência para TV que não estejam sendo utilizadas, poderiam ser ocupadas por Rádios Cognitivos, pois oferecem uma oportunidade para sistemas de WRAN em áreas rurais.

Por outro lado, os sistemas de TV por radiodifusão necessitam de antenas numa altura considerável, e os receptores necessitam sinais com uma relação sinal-ruído de 10dB como mínimo [5]. Esta alta relação SNR facilita o sensoriamento espectral detectando espaços livres no espectro.

Deve-se considerar que as emissoras de TV operam de forma contínua, não mudam sua localização geográfica e dificilmente mudam seus parâmetros de transmissão, facilitando assim o sensoriamento espectral e tornando as faixas de TV atrativas para sistemas de Rádio Cognitivo.

2.7. Conclusão

Neste capítulo foi feita uma revisão da faixa de frequências escolhida para a aplicação dos algoritmos de detecção e foi apresentada a caracterização dos canais da banda de TV dando ênfase ao padrão brasileiro. Em sistemas de Rádio Cognitivo, o desafio existente é saber quais canais de TV estão sendo ocupados e quais estão livres.

Capítulo 3

MÉTODOS BASEADOS NA DETECÇÃO DE ENERGIA

3.1. Introdução

No sensoriamento espectral, um sinal é recebido na antena de um Rádio Cognitivo, depois de ter se propagado no ambiente, e ter sofrido multipercurso, ruído impulsivo, interferência de canais adjacentes e interferência co-canal. Esses fatores degradam o sinal e fazem com que uma detecção seja um problema de certa complexidade, embora comum no contexto de Rádios Cognitivos.

Neste capítulo, é analisado o detector de energia e os algoritmos utilizados. Para avaliar o desempenho da detecção são analisadas a probabilidade de detecção e a probabilidade de falso alarme.

3.2. Detecção de Energia

O problema pode ser formulado como segue [1] [17] [33] [39]: seja $\mathbf{y}$ um vetor de comprimento N composto por um sinal adicionado de ruído, como representado na equação abaixo:

$$\mathbf{y}(n) = \mathbf{x}(n) + \mathbf{w}(n) \quad (3.1)$$

onde $\mathbf{x}(n)$ é o vetor sinal do usuário primário, $\mathbf{y}(n)$ é vetor sinal recebido pelo usuário secundário e $\mathbf{w}(n)$, é o vetor ruído. O ruído w é assumido como aditivo, branco, gaussiano, de média zero e variância σ_w^2 . N é o número de amostras coletadas no intervalo de observação, isto é, o período do sensoriamento, e n é o índice de cada componente dos vetores $\mathbf{y}(n)$, $\mathbf{x}(n)$ e $\mathbf{w}(n)$.

Quando o sinal é recebido para detecção se há um sinal de usuário presente, temos as seguintes hipóteses:

$$y(n) = \begin{cases} w(n), & H_0 \\ x(n) + w(n), & H_1 \end{cases} \quad (3.2)$$

onde H_0 é a hipótese de que a faixa de frequências de interesse está inativa ou livre, assim o sinal recebido corresponde somente ao ruído e H_1 é a hipótese de que a faixa esteja ativa ou ocupada.

Um sensor de espectro ideal seleciona a hipótese H_1 quando o sinal do usuário primário realmente estiver presente, e a hipótese H_0 , no caso contrário. Entretanto, na prática, um sensoriamento espectral não é ideal podendo haver erros.

A detecção por energia faz comparação entre a energia do sinal recebido com certo limiar preestabelecido em função do ruído. Sendo T a energia de sinal recebido,

$$T = \sum_N |y(n)|^2 \quad (3.3)$$

para se decidir entre as hipóteses H_0 e H_1 , o valor de T é comparado com certo limiar γ , como indicado abaixo.

Para $T < \gamma$; decide que o sinal está ausente, H_0

Para $T > \gamma$; decide que o sinal está presente, H_1

Quando o sinal está ausente (hipótese H_0), a variável T tem uma distribuição chi-quadrado central com N graus de liberdade.

Quando o sinal está presente (hipótese H_1), a variável T tem uma distribuição chi-quadrado não-central, com o mesmo número de graus de liberdade.

Inicialmente, no sensoriamento espectral por detecção de energia, não se conhece nenhuma característica do sinal. Assim, assume-se que o sinal $x(n)$ é também gaussiano com variância σ_w^2 .

Usando o teorema do Limite Central, temos T aproximado por uma distribuição gaussiana:

$$\begin{aligned} T &\sim \text{Normal}(N\sigma_w^2, 2N\sigma_w^4), \quad H_0 \\ T &\sim \text{Normal}(N(\sigma_w^2 + \sigma_x^2), 2N(\sigma_w^2 + \sigma_x^2)^2), \quad H_1 \end{aligned} \quad (3.4)$$

A avaliação do algoritmo de detecção pode ser feita usando-se as seguintes probabilidades:

Probabilidade de detecção P_D , a probabilidade de se afirmar que certa frequência está sendo usada, e na realidade está, $P_D = (H_1/H_1)$.

Probabilidade de falso alarme P_{FA} , a probabilidade de se afirmar que certa frequência está sendo usada, quando em realidade não está, $P_{FA} = (H_1/H_0)$.

As expressões de P_D e P_{FA} podem ser obtidas da equação (3.3), como:

$$P_{FA} = P(T > \gamma | H_0) \quad (3.5)$$

$$P_D = P(T > \gamma | H_1) \quad (3.6)$$

De (3.4), a probabilidade da variável aleatória ultrapassar o limiar γ , é dada pela função por:

$$P_{FA} = Q\left(\frac{\gamma - N\sigma_w^2}{\sqrt{2N\sigma_w^4}}\right) \quad (3.7)$$

$$P_D = Q\left(\frac{\gamma - N(\sigma_w^2 + \sigma_x^2)}{\sqrt{2N(\sigma_w^2 + \sigma_x^2)^2}}\right) \quad (3.8)$$

onde a função Q é dada por:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad (3.9)$$

É desejável obter-se altos valores para P_D e baixos valores para P_{FA} . Na realidade ainda existe uma compensação entre esses valores obtidos a partir da curva ROC (Receiver Operating Characteristic). Esta curva é usada para explorar a relação entre P_D e P_{FA} de um determinado algoritmo de detecção.

Se a quantidade de amostras utilizadas fosse ilimitada, com estas equações poder-se-ia satisfazer a qualquer probabilidade de detecção e falso alarme. Na prática, N é limitado, uma vez que o tempo não pode ser infinito. Nesse sentido, para se atingir determinadas P_D e P_{FA} , o número de amostras necessário é uma função da relação sinal-ruído (SNR), sendo dado por [46]:

$$N = 2 \left[\frac{Q^{-1}(P_{FA}) - Q^{-1}(P_D)}{SNR} - Q^{-1}(P_D) \right]^2 \quad (3.10)$$

onde, $SNR = \frac{\sigma_x^2}{\sigma_w^2}$

Este processo de detecção de energia é para qualquer tipo de sinal, pois não se necessita de nenhum conhecimento prévio do sinal a ser detectado. A potência do ruído tem que ser conhecida para se poder definir o limiar de comparação, o que é uma desvantagem na realização do sensoriamento.

3.3. Limiar de Comparação

Como visto, o desempenho da detecção de energia depende da escolha correta de um limiar de comparação. Por isso, o procedimento empregado para selecioná-lo é um importante aspecto a ser considerado nessa abordagem.

A escolha do limiar γ deve ser feita para que exista uma ótima compensação entre P_D e P_{FA} . Porém, para se fazer uma boa escolha é necessário o conhecimento das potências do sinal e do ruído. No cenário de um sensoriamento espectral, a potência do ruído pode ser estimada, enquanto a potência do sinal primário é difícil de se estimar, pois ela depende de muitas informações de que o Rádio Cognitivo não dispõe.

Na prática, a escolha do limiar é feita para satisfazer certa probabilidade de falso alarme que somente necessita da informação da potência do ruído.

Resolvendo-se a equação (3.7), tem-se o limiar de comparação em função da P_{FA} desejada, que é dado por:

$$\gamma = (Q^{-1}(P_{FA})\sqrt{2N} + N) \sigma_w^2 \quad (3.11)$$

substituindo-se γ obtido de (3.11) em (3.8) tem-se:

$$P_D = Q\left(\frac{Q^{-1}(P_{FA})\sqrt{2N} - N\left(\frac{\sigma_x^2}{\sigma_w^2}\right)}{\sqrt{2N}\left(1 + \frac{\sigma_x^2}{\sigma_w^2}\right)}\right) \quad (3.12)$$

Pode-se expressar a probabilidade de detecção em função da SNR utilizando-se (3.12). Para $SNR \ll 1$ obtém-se a seguinte aproximação para P_D :

$$P_D \cong Q\left(Q^{-1}(P_{FA}) - \sqrt{\frac{N}{2}} SNR\right) \quad (3.13)$$

3.4. Incerteza do Ruído

Um importante problema a ser considerado na detecção de energia é a incerteza do ruído. Essa incerteza faz com que o detector não seja suficientemente robusto para valores de SNR baixos, pois o limiar de comparação depende da própria SNR. Um detector de energia ideal considera que a distribuição do ruído é gaussiana, mas em um cenário real, o ruído pode não ser gaussiano.

Existem muitos fenômenos que levam a incerteza de ruído. Essa incerteza pode ser incluída na modelagem do processo de detecção como descrito a seguir. Considera-se que a variância do ruído está num intervalo $[\sigma_L^2, \sigma_H^2]$ onde σ_L^2 representa o caso em que não há transmissão no ambiente onde situa-se o Rádio Cognitivo, ou seja a incerteza é mínima. A variância σ_H^2 representa o caso em que há transmissão por todos os dispositivos vizinhos do sistema.

A incerteza em dB pode ser definida por:

$$u = 10\log\left(\frac{\sigma_H^2}{\sigma_L^2}\right) \quad (3.14)$$

Suponhamos que a potência do sinal recebido do sinal do usuário primário é P_1 . No caso em que $\sigma_H^2 \geq \sigma_L^2 + P_1$, o Rádio Cognitivo não conseguirá detectar a existência do sinal primário. Portanto existe um limite para SNR, abaixo do qual, o detector é ineficaz. Esse limite é dado por:

$$SNR_{wall} = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{u}{10}} - 1 \right) \quad (3.15)$$

Incluindo a incerteza u do ruído, pode-se afirmar que o ruído é AWGN de média zero e variância no intervalo $[\sigma_L^2, \sigma_H^2]$. Nesta situação, as hipóteses de detecção passam a ser:

$$T \sim \text{Normal}(N\sigma_H^2, 2N\sigma_H^4), \quad H_0 \quad (3.16)$$

$$T \sim \text{Normal}(N(\sigma_L^2 + \sigma_x^2), 2N(\sigma_L^2 + 2N\sigma_x^2)^2), \quad H_1$$

As probabilidades de detecção e falso alarme tornam-se:

$$P_{FA} = Q \left(\frac{\gamma - N\sigma_H^2}{\sqrt{2N\sigma_H^4}} \right) \quad (3.17)$$

$$P_D = Q \left(\frac{\gamma - N(\sigma_L^2 + \sigma_x^2)}{\sqrt{2N(\sigma_L^2 + \sigma_x^2)^2}} \right) \quad (3.18)$$

O menor número de amostras requeridas para satisfazer uma P_D e P_{FA} é então dado por:

$$N = \frac{2[Q^{-1}(P_{FA})\eta_n - Q^{-1}(P_D) - Q^{-1}(P_D) \cdot SNR]^2}{(1 + SNR - \eta_n)^2} \quad (3.19)$$

onde $\eta_n = \sigma_H^2 / \sigma_L^2 = 10^{\frac{u}{10}}$

Da equação 3.19, pode-se ver que N tende a infinito quando a SNR tende a SNR_{wall} , que depende do valor de u , para valores desejados de P_{FA} e P_D .

Assim, o desempenho do detector de energia torna-se ruim em situações em que se tem incerteza do ruído.

3.5. Detecção Bayesiana

Uma situação comum na prática é o fato da potência de ruído não poder ser estimada com precisão, o que degrada significativamente o desempenho da detecção do sinal primário. Em um detector convencional, o sensoriamento e a decisão são feitos canal a canal. Entretanto, o detector de energia baseado em estimação bayesiana (BEED – Bayesian estimation-based energy detection) utiliza medições feitas em todos os canais para depois determinar o número de canais que estão ocupados [19].

Na detecção Bayesiana, o sinal recebido y pode ser representado como a soma do sinal primário x , com o ruído w , onde o número do canal é representado por i e o número da amostra por n , como segue:

$$y_i(n) = x_i(n) + w_i(n) \quad (3.20)$$

onde as variáveis são compostas por vetores dados por:

$$\begin{aligned} y(n) &= [y_1(n), y_2(n), \dots, y_{K_T}(n)]^T \\ x(n) &= [x_1(n), x_2(n), \dots, x_{K_T}(n)]^T \\ w(n) &= [w_1(n), w_2(n), \dots, w_{K_T}(n)]^T \end{aligned} \quad (3.21)$$

Nesse método, faz-se primeiramente medidas de todos os canais; a seguir, eles são divididos em dois conjuntos: R_1 que representa o conjunto de canais que estão sendo ocupados, e R_2 que representa o conjunto de canais livres.

Para todos os canais i que compõem o conjunto R_2 , tem-se $x_i(n) = 0$.

A potência dos canais ocupados $\sigma_i^2 - \sigma^2$ ($i \in R_1$) e o número deles não são conhecidos a priori, bem como a potência do ruído σ^2 .

Seja $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_Q]^T$ o vetor das potências em cada canal, dadas por:

$$\lambda_i = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |y_i|^2 \quad (3.22)$$

Assumindo-se que existem K canais ocupados, o vetor λ é rearranjado em ordem decrescente:

$$\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_K > \lambda_{K+1} = \lambda_{K+2} = \dots = \lambda_Q = \sigma^2 \quad (3.23)$$

O problema trata da estimação do número de canais ocupados. Assim, os canais com maior potência são considerados ocupados.

O número de canais ocupados pode ser estimado a partir das medições de uma amostra: $R = [y(1), y(2), \dots, y(N)]$.

A probabilidade de K pode ser expressa como:

$$p(K|R) = \frac{p(R|K)p(K)}{p(R)} \quad (3.24)$$

Da equação (3.24), como o valor de $p(R)$ é constante, e $p(K)$ é não relevante, o valor mais provável de K é aquele que maximiza ao numerador. Isto é, maximizar $p(K|R)$ é equivalente a maximizar $p(R|K)$.

Dessa forma, o cálculo de $p(R|K)$ pode ser feito pelo modelo bayesiano, usando-se a teoria das probabilidades.

Seja:

$$\theta^K = (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_K, \sigma) \quad (3.25)$$

que denota o conjunto de parâmetros não conhecidos no modelo de canais ocupados K . A probabilidade condicional de R pode ser escrita como:

$$p(R|K) = \sum_{\theta^K} p(R|\theta^K, K) p(\theta^K|K) \quad (3.26)$$

Para infinitas possibilidades de θ^K , a equação (3.26) pode ser reescrita como:

$$p(R|K) = \int_{\theta^K} p(R|\theta^K) p(\theta^K|K) d\theta^K \quad (3.27)$$

A solução da equação anterior é possível mediante o conhecimento da probabilidade condicional das medições das amostras $p(R|\theta^K)$ e a probabilidade

prévia do conjunto de parâmetros desconhecidos $p(\theta^K|K)$, que são definidos detalhadamente em [19].

Após vários procedimentos que são apresentados de forma completa em [14], a BEED é dada por:

$$BEED_K = \log \left(\left(\prod_{i=1}^K \lambda_i \right) \left(\frac{1}{Q-K} \sum_{i=K+1}^Q \lambda_i \right)^{Q-K} \right) + C(K) \quad (3.28)$$

onde:

$$\prod_{i=1}^Q \lambda_i = 1 \quad (3.29)$$

e:

$$C(K) = \frac{1}{2N} \left(\log(Q-K) + K \log \left(\frac{2}{\pi} \right) \right) + \frac{K}{2N} \log(N) \quad (3.30)$$

O número de canais ocupados K é estimado por minimização da equação (3.28):

$$\hat{K} = \arg \min_{j=0,1,\dots,Q-1} BEED_j \quad (3.31)$$

3.6. Desvantagens em sistemas baseados em detecção de Energia

Como os algoritmos baseados na detecção de energia não precisam de um conhecimento prévio do sinal, baseando-se somente no nível de energia, eles apresentam alguns desvantagens que tornam-se desafios que devem ser superados para serem usados em Rádios Cognitivos.

Existem casos onde o detector de energia não pode ser usado, como em tecnologias baseadas no espalhamento espectral onde o nível de potência das transmissões é reduzido a tal ponto que não é possível diferenciá-lo do ruído.

Os sistemas baseados em detecção de energia somente podem detectar se o sinal está presente ou ausente, sem identificar se o sinal detectado é de um usuário

primário ou de um usuário secundário. Nesse caso, pode ser usado uma detecção de energia com compartilhamento de informações em redes cognitivas.

Existem alguns requisitos que equipamentos de Rádio Cognitivo devem atender. Por exemplo, na norma IEEE 802.22, especifica-se que um equipamento de Rádio Cognitivo deve ser capaz de detectar um sinal de TV de 6 MHz de banda a uma potência de -116 dBm, que corresponde a uma SNR de -21dB para um receptor de TV típico [47].

3.7. Conclusão

Este capítulo apresentou a formulação matemática dos algoritmos de sensoriamento baseados na detecção de energia. Foi abordado casos onde o ruído é considerado constante e quando tem-se incerteza.

Se apresentou também o algoritmo Bayesiano que utiliza medições feitas em todos os canais para depois determinar o número de canais que estão ocupados. Este algoritmo é uma opção ao detector convencional, onde o sensoriamento e a decisão são feitos canal a canal.

Neste trabalho são implementados estes algoritmos de sensoriamento baseados na detecção de energia, apresentado resultados de simulações.

Capítulo 4

ANÁLISE DO *HARDWARE* PARA RÁDIOS COGNITIVOS

Um Rádio Cognitivo é um transceptor que pode alterar automaticamente seus parâmetros de transmissão e recepção em um sistema de comunicação em função de determinados requisitos da comunicação. Ele está baseado no conceito de Rádio Definido por *Software* (Software Defined Radio - SDR). Um Rádio Cognitivo pode ser considerado como um SDR inteligente.

Um sistema de rádio definido por *software* é um sistema de comunicação em que os componentes sistêmicos são implementados por meio de *software*, com o objetivo de transmitir e receber diversos protocolos de comunicação, mudando somente o *software* controlador. Uma comparação entre um rádio convencional e um rádio definido por *software* é apresentada na figura 4.1.

Figura 4.1. Arquitetura de Rádios

Como em um sistema SDR, os parâmetros de utilização do espectro de frequência são determinados por *software*, o *hardware* deve permitir operação em um grande número de frequências distintas.

Na prática, um SDR é composto principalmente de três partes, detalhadas a seguir:

- Um dispositivo que recebe o sinal de uma fonte e o converte para uma faixa frequências e amplitudes que sejam processáveis por conversores digitais.
- Um dispositivo digitalizador que converte o sinal analógico em digital a uma determinada taxa de amostragem.
- Um software que tenha a capacidade de processar o sinal digitalizado.

A implementação de um SDR requer a combinação desses três componentes. Uma das características que um SDR precisa ter é poder digitalizar o sinal o mais próximo possível da antena, para assim reduzir o máximo possível o *hardware* utilizado, fazendo com que a maioria das tarefas seja realizada pelo *software*.

4.1. **Hardware de SDR**

Um SDR ideal é um equipamento com características de reconfigurabilidade total, para alterar a estrutura e o funcionamento completo; flexibilidade para fazer mudanças rápidas e, modularidade, isto é, as partes do sistema são módulos, para que se no futuro se quiser fazer alguma modificação específica, não seja necessário alterar todo o *hardware*.

As partes principais que compõem o *hardware* de um SDR estão listados abaixo e são mostradas na figura 4.2.

- **Antenas Inteligentes:** de acordo com a frequência do sinal em que o SDR vai operar, as antenas inteligentes têm que mudar de tamanho elétrico;
- **Front End RF:** módulo de rádio frequência que capta o sinal analógico e converte para uma frequência intermediária e vice-versa;
- **Conversores ADC e DAC:** convertem um sinal analógico em digital e vice-versa;
- **Processador Digital:** faz o tratamento do sinal na sua forma digital.

Figura 4.2. Arquitetura de SDR.

Para o desenvolvimento de protótipos de SDR e Rádios Cognitivos, existem atualmente no mercado diversas plataformas disponíveis que permitem a implementação de projetos baseados nessa tecnologia. No anexo, são apresentadas três opções de equipamentos SDR comerciais: soluções oferecidas pela empresa ADI (Analog Devices), pela empresa Lyrtech (atualmente chamada Nutaq) e pela empresa Ettus Research. Neste estudo, faz-se uma descrição do modo de funcionamento das unidades da Ettus; a arquitetura e o funcionamento dos outros equipamentos é similar ao mostrado aqui.

4.2. Arquitetura USRP

A USRP (Universal Software Radio Peripheral) da Ettus, composta de um transceptor de RF e um FPGA, conectados a um computador mediante cabo Gigabit Ethernet ou USB, permite realizar aplicações de SDR.

O projeto do equipamento USRP está feito para que o processamento de sinais (modulação, demodulação, filtrado, etc.) seja realizado no “Host”. As tarefas de propósitos gerais como a decimação, a interpolação e as conversões de frequência (digital UP conversor e digital Down conversor), são feitas no FPGA da USRP. Na figura 4.3. vê-se um diagrama de blocos de operação da USRP.

Figura 4.3. Arquitetura de operação de USRP.

A placa de RF recebe os sinais em tempo real e os converte para a frequência intermediária IF.

Após a conversão para IF, o sinal é transferido para o ADC. O ADC faz o amostragem e passa os dados para o FPGA. A tarefa do FPGA é a conversão do sinal resultante para baixa frequência a uma taxa de dados tal que possa ser enviado ao “host”, onde são realizadas as tarefas de processamento de sinais.

No caso da transmissão, o procedimento é similar mais de maneira inversa. Em primeiro lugar, o computador host passa os parâmetros de entrada para a USRP. O DAC envia o sinal de IF convertido para o transceptor de RF, onde é convertido para a frequência de RF e transmitido.

Em resumo, trata-se da obtenção do sinal analógico no domínio do tempo em alta frequência, levando-o para a frequência intermediária, a conversão desse sinal analógico para um sinal digital de frequência intermediária; e a conversão para a banda base para processá-lo digitalmente.

4.3. GNU Radio

GNU Radio é uma plataforma para o desenvolvimento de SDR cuja função é resolver problemas de hardware mediante software. Esta plataforma consiste em um conjunto de ferramentas representadas por blocos que são conectados entre si para fazer processamento de sinais.

O GNU Radio é de código aberto e é compatível com as unidades USRP. Usando-se ambos pode-se desenvolver diversas aplicações de sistemas de comunicações.

As aplicações no GNU Radio são escritas em sua maioria na linguagem de programação Python. Esta proporciona uma interface gráfica de fácil manejo para que um usuário possa criar processos de forma rápida.

Python é uma linguagem de programação de alto nível, que pode vincular rotinas escritas em linguagem C++ e executá-las através de Python.

Para facilitar o projeto, e fazê-lo de forma ordenada, o GNU Radio contém muitos blocos para o processamento de sinais que foram escritos em linguagem de programação C/C++; cada bloco é responsável por uma tarefa.

Python usa o SWIG (**Simplified Wrapper and Interface Generator**) para poder interconectar-se às rotinas escritas em C++ com aplicações criadas no entorno gráfico, como mostrado na figura 4.4.

As aplicações desenvolvidas em GNU Radio são feitas mediante blocos de processamento e linhas e conexão entre eles, que como visto na figura 4.5. Os blocos de processamento são rotinas de código escritas em C++.

Cada bloco executa uma operação de processamento de sinal, por exemplo, codificação e decodificação, acesso ao hardware, etc

Figura 4.4. Arquitetura GNU Radio

Cada gráfico de fluxo no GNU Rádio precisa de uma fonte de dados para processar. No caso do sensoriamento espectral, a própria USRP atua como fonte.

Na figura 4.5 apresenta-se o ambiente GNU Radio, a forma em que os blocos são conectados e, no lado direito, a lista de blocos que estão prontos para ser incluídos no projeto.

Figura 4.5. Ambiente GNURadio

4.4. Sensoriamento Espectral

Para se encontrar um espaço livre no espectro de frequências usando-se o detector convencional e o detector de energia Bayesiano, diversos passos devem ser seguidos. Os processos para realizar essa tarefa estão representados nos diagramas de blocos das Figuras 4.6 e 4.7, respectivamente.

Figura 4.6. Diagrama de blocos do detector convencional.

Figura 4.7. Diagrama de blocos do detector Bayesiano.

4.5. Considerações na Operação

Algumas das considerações a serem levadas em conta são referentes ao processo de amostragem. Duas questões frequentes em sensoriamento são a rapidez com que deve ser feita a amostragem, e o tempo em que deve ser feito.

Dessa forma, devemos amostrar o sinal por tempo suficiente para se obter informações em frequências baixas; deve-se amostrar pelo menos um ciclo da frequência mais baixa, pois caso contrário, pode resultar em erros.

Outra consideração a ser levada em conta é a taxa de amostragem, que deve ser suficientemente alta para evitar *aliasing*.

Essas operações deverão ser feitas em uma faixa de tempo significativa, para se ter certeza se a faixa de frequências está ocupada ou não; pode ocorrer o caso em que justamente no momento em que se faz o sensoriamento do usuário primário, este não esteja transmitindo, embora esteja ativo. Por isso, é necessário fazer o sensoriamento por um tempo suficiente longo para minimizar erros.

Quanto maior for o número de amostras, maior será o tempo necessário para o processamento. Isso seria muito prejudicial num sistema de Rádio Cognitivo, pois este tem que ser o mais rápido possível. Assim, devem ser feitas simulações e testes que permitam estabelecer um compromisso entre o número de amostras, o tempo e o desempenho de detecção da detecção de energia.

4.6. Conclusão

Este capítulo abordou o *hardware* para Rádios Cognitivos, foi apresentado a arquitetura de equipamentos de SDR. Abordando também o processo de sensoriamento espectral com uma visão de hardware, mostrando o processo desde que o sinal é recebido na antena do Rádio Cognitivo até ser processado para se determinar se essa frequência está sendo ocupada ou não.

Capítulo 5

SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentadas as simulações realizadas com os algoritmos de detecção analisados e seus resultados, mostrando os desempenhos em função de probabilidades de detecção, falso alarme, relação sinal-ruído e número de amostras.

Segundo o modelo de simulação para o sensoriamento espectral descrito em [48], para se avaliar o desempenho dos métodos de sensoriamento espectral, as simulações devem ser feitas para relações sinal-ruído SNR no intervalo de -25 dB a 5 dB.

Os sistemas de sensoriamento devem ter como limites uma probabilidade de falso alarme de no máximo 0,1 e uma probabilidade de detecção de no mínimo 0,9. Estes limites foram propostos para proteger o usuário primário de interferências dos usuários secundários.

Foram realizadas simulações em quatro cenários:

- No primeiro cenário, apresenta-se o desempenho do detector de energia em condições ideais, para um limiar preestabelecido, considerando um sinal captado pela antena receptora, composto pelo sinal do usuário primário e o ruído. Em condições ideais, o ruído teria uma densidade de potência invariante com o tempo. Esse detector funciona de forma separada para cada canal, isto é, recebe informações do primeiro canal, processa o sinal e, determina se ele está ocupado ou não.

- Num segundo cenário, novamente, o detector de energia com limiar de comparação é testado, mas, com ruído de intensidade situada numa faixa de valores. Esse processamento também é feito canal a canal.
- No terceiro cenário é simulado o detector bayesiano, que foi proposto como uma solução à incerteza do ruído; este detector recebe informação do nível de potência de todos os canais que se quer analisar, processá-os de forma conjunta e determina o número de canais ocupados; na realidade, o número de canais de maior potência.
- Num quarto cenário foram aplicados esses algoritmos para situações na banda de TV, simulando as condições com largura de banda de 6 MHz.

5.1. Primeiro Cenário

Neste cenário apresenta-se simulações de um detector de energia ideal, quando o ruído tem um valor não variante. Foram feitos gráficos para se determinar o número de amostras necessárias para a detecção com uma determinada relação sinal-ruído, quando se tem uma determinada probabilidade de falso alarme definida P_{FA} .

Na figura 5.1, mostra-se a relação que existe entre o número de amostras e a SNR, para valores predeterminados de P_D e P_{FA} . Neste caso, $P_{FA} = 0,1$; $P_{FA} = 0,05$ e $P_{FA} = 0,01$. Observa-se que, à medida que a relação SNR decresce, faz-se necessário um número maior de amostras. Além disso, quanto maior probabilidade de detecção, maior é o número de amostras necessário para atingir o objetivo.

Outra observação que se pode fazer neste cenário, onde o ruído não tem incerteza, é que o detector de energia pode atingir uma probabilidade de detecção alta para qualquer valor da SNR, simplesmente aumentando-se o número de amostras indefinidamente. Isto, em um cenário real onde existe incerteza do ruído, não ocorre.

Figura 5.1. Número de amostras x SNR – Cenário 1

Nas figuras 5.2 e 5.3, mostram-se curvas de probabilidade de detecção em função do número de amostras, para probabilidades de falso alarme $P_{FA} = 0,01$ e $P_{FA} = 0,1$ que são valores recomendados para avaliar o desempenho de técnicas de sensoriamento espectral. Observa-se que à medida que o número de amostras aumenta, P_D tende para valores maiores que 0,9.

Figura 5.2. Probabilidade de Detecção x Número de Amostras ($P_{fa} = 0,01$) – Cenário 1

Figura 5.3. Probabilidade de Detecção x Número de Amostras ($P_{fa} = 0,1$) – Cenário 1

Nas figuras 5.4, 5.5 e 5.6, mostra-se o desempenho do detector de energia para determinadas $P_{FA} = 0,1; 0,05; 0,01$; verifica-se que, para uma probabilidade de falso alarme maior $P_{FA} = 0,1$ se obtém maior desempenho, ou seja, a curva alcança mais rapidamente probabilidades de detecção maiores. Por outro lado, para valores menores de probabilidade de falso alarme $P_{FA} = 0,05; 0,01$ as curvas atingem mais lentamente probabilidades de detecção altas, o que piora o desempenho do detector de energia.

Nos três gráficos, para diferentes amostragens, pode-se observar que para valores de SNR maiores que $0dB$, é necessário uma quantidade mínima de amostras para se obter uma probabilidade de detecção $P_D \geq 0,9$. O problema está quando se trata de valores de SNR negativos, as três curvas de probabilidade de detecção alcançam valores maiores de 0,9 à medida que o número de amostras é acrescentado.

Figura 5.4. Probabilidade de Detecção x SNR (N=100) – Cenário 1

Na figura 5.4, para um número de amostras $N=100$, pode-se observar que somente a partir de -5dB de SNR e para qualquer probabilidade de falso alarme a probabilidade de detecção é maior que 0,9.

Na figura 5.5, para $N=10000$, o desempenho do detector melhora a sua probabilidade de detecção, atingindo $P_d = 0,9$ para sinais com SNR maiores que -15dB

Figura 5.5. Probabilidade de Detecção x SNR (N=10000) – Cenário 1

Na figura 5.6. observa-se que um número de amostras $N=1000000$ o detector pode alcançar boas probabilidades de detecção para relações SNR abaixo de $-20dB$. Se observa que a medida que o número de amostras incrementa, o detector de energia pode atingir relações SNR menores.

Figura 5.6. Probabilidade de Detecção x SNR ($N=1000000$) – Cenário 1

Nas figuras 5.7, 5.8, e 5.9, mostram-se curvas de probabilidade de detecção em função de probabilidade de falso alarme. Um caso ideal para esses gráficos seria, para qualquer relação SNR, a probabilidade de detecção ser $P_D = 1$ e a probabilidade de falso alarme $P_{FA} = 0$.

Nas simulações, observa-se que para valores SNR maiores que $0dB$, as probabilidades mencionadas atingem os valores ideais de $P_D = 1$ e $P_{FA} = 0$, sendo as SNR menores as que dependem do número de amostras para alcançar os valores de P_D e P_{FA} desejados.

Uma observação a se fazer é com relação aos casos extremos das curvas. Neles nota-se, que para $P_{FA} = 0$ os valores P_D para todas as SNR são $P_D = 0$. No outro extremo das curvas, para valores de $P_{FA} = 1$, o resultado para a probabilidade de detecção é sempre $P_D = 1$ independente da SNR.

Figura 5.7. Probabilidade de Detecção x Falso alarme (N=100) – Cenário 1

Figura 5.8. Probabilidade de Detecção x Falso alarme (N=10000) – Cenário 1

Na figura 5.9, observa-se que para todas as relações SNR, a exceção de $SNR = -25dB$, atendem os limites para um bom funcionamento do sensoriamento espectral sem interferência com os sinais dos usuários primários.

Figura 5.9. Probabilidade de Detecção x Falso alarme (N=1000000) – Cenário 1

5.2. Segundo Cenário

Um detector de energia ideal considera que a distribuição do ruído é gaussiana, mas, num cenário real o ruído, não sempre é gaussiano. Nesse cenário, é avaliado o desempenho do detector de energia em condições onde a intensidade do ruído é incerto, mas compreendida numa faixa de valores. Como detalhado no capítulo 3, um grande problema para os detectores de energia é a incerteza do ruído. Esta faz com que o detector não seja robusto para valores de SNR baixos, pois o limiar de comparação depende da própria relação SNR.

Foi visto nas simulações do primeiro cenário que para qualquer SNR pode-se alcançar uma boa probabilidade de detecção sempre que se aumente o número de amostras consideradas.

Nas figuras 5.10, 5.11 e 5.12 mostra-se curvas de probabilidade de detecção em função da relação sinal-ruído com incerteza do ruído, para números de amostras $N=100$, $N=2000$ e $N=10000$.

Nas simulações, observa-se que quando se adiciona incerteza no ruído, por mais que se aumente o número de amostras, existe um limite na relação SNR para se obter boas probabilidades de detecção. Por exemplo, note-se nas figuras 5.10, 5.11 e 5.12 que para uma incerteza de $u = 1\text{dB}$ seja qual for o número de amostras (100, 2000 ou 10000), a máxima SNR para a qual se pode obter boa probabilidade

de detecção é $\cong -5\text{dB}$. Similarmente, ocorre com incertezas $u = 0,1\text{dB}$ e $u = 0,05\text{dB}$ cujos valores máximos de SNR são $\cong -16\text{dB}$ e $\cong -19\text{dB}$, como visto na figura 5.12.

Figura 5.10. Probabilidade de Detecção x SNR ($N=100$, $P_{fa}=0,1$) – Cenário 2

Figura 5.11. Probabilidade de Detecção x SNR ($N=2000$, $P_{fa}=0,1$) – Cenário 2

Figura 5.12. Probabilidade de Detecção $\times$ SNR ($N=10000$, $P_{fa}=0,1$) – Cenário 2

Na figura 5.13 mostra-se o processo para uma incerteza de $u = 0,1dB$ e $P_{fa} = 0,1$. Quando se aumenta o número de amostras, a curva de probabilidade de detecção vai alcançando o limite na relação SNR, que para esses dados seria $SNR = 16,4dB$

Figura 5.13. Probabilidade de Detecção $\times$ SNR ($u = 0,1dB$, $P_{fa}=0,1$) – Cenário 2

Na figura 5.14 mostra-se o limite das relações SNR e o número de amostras para diversas incertezas com que pode-se alcançar probabilidades de $P_{fa}=0,1$ e $P_d=0,9$. Quando existe menor incerteza do ruído, valores menores de relação SNR podem resultar às probabilidades desejadas. Ao contrário, quando existe maior incerteza, somente as relações SNR mais altas podem levar a essas probabilidades.

Figura 5.14. Número de amostras x SNR ($P_d=0,9$, $P_{fa}=0,1$) – Cenário 2

5.3. Terceiro Cenário

Uma solução para o problema da incerteza do ruído é o detector bayesiano, que recebe informação do nível de potência de todos os canais, processá-os de forma conjunta e determina o número de canais ocupados, estes são os que têm maior potência.

Foram simulados 56 canais com diferentes níveis de potência e aplicado o algoritmo Bayesiano, como mostrado na figura 5.15.

No algoritmo Bayesiano é calculado o BEED para cada possibilidade de ocupação dos canais, através da equação (3.28). Na figura 5.16, apresenta-se os 56 números BEED calculados para todas as possibilidades de ocupação.

Figura 5.15. Potencias para 56 canais – Cenário 3

Figura 5.16. Números BEED para 56 possibilidades de ocupação – Cenário 3

O BEED de menor valor representa o número de canais ocupados. No exemplo anterior apresentado o BEED de menor valor é o 46, o que significa que existem 46 canais ocupados e os restantes estão livres.

5.4. Quarto Cenário

Neste cenário o algoritmo de detecção foi aplicado ao problema específico de canais de TV. O objetivo do sensoriamento espectral é determinar quais canais de TV estão sendo ocupados por transmissões de TV digital numa determinada área e quais estão livres. Considera-se a densidade espectral de potência do ruído, a largura de banda de 6MHz dos canais de TV e as probabilidades requeridas.

Na figura 5.17 mostra-se a curva da potência recebida em função da distância de um sinal de TV [48], para uma estação que está transmitindo com uma potência de 1MW (90dBm) e opera na frequência 615MHz na banda UHF. As simulações apresentadas mais adiante são feitas para o intervalo de potências recebidas obtido da figura 5.17.

Figura 5.17. Potência Recebida de TV x Distância [48]

No capítulo 3 viu-se o limiar de comparação é função da densidade de probabilidade para a hipótese H_0 , e está relacionado com a probabilidade de falso alarme. Valores típicos de P_{fa} para se avaliar o desempenho do sensoriamento espectral são 0,01 e 0,1. As figuras 5.18 e 5.19 apresentam os limiares para essas probabilidades.

Foram considerados largura de banda de 6MHz, número de amostras no intervalo 10 – 100000 e figura de ruído de 11dB, incluindo o ruído no *front-end*, perdas nos cabos e nos acoplamentos, como em [48].

Sabendo-se que a densidade espectral de potência do ruído térmico ambiente é -174dBm/Hz, a potência de ruído térmico no canal é igual a: $-174 + 11 + 10\log(6 \times 10^6) = -95,2\text{dBm}$, que foi o ruído considerado nas simulações.

Na figura 5.18, mostra-se a curva do limiar de comparação em função do número de amostras necessárias para atender uma probabilidade de falso alarme de 0,01 para um ruído de -95,2dBm. Pode-se ver que o limiar de comparação vai se aproximando da potência do ruído a medida que aumenta o número de amostras.

Figura 5.18. Limiar de comparação × Número de amostras (Pfa = 0,01) - canal de TV

Na figura 5.19, mostra-se a curva do limiar de comparação em função do número de amostras para uma probabilidade de falso alarme de 0,1. Nota-se também que a curva do limiar aproxima-se do ruído a medida que aumenta o número de amostras.

A diferença entre as curvas das figuras 5.19 e 5.20 é que o limiar para probabilidades mais altas de falso alarme aproxima-se mais rapidamente do valor do ruído. No entanto, para probabilidades de falso alarme mais baixas, necessita-se de mais amostras para que o limiar aproxime-se do nível do ruído.

Figura 5.19. Limiar de comparação x Número de amostras ($P_{fa} = 0,1$) - canal de TV

Resultados de probabilidade de detecção em função da potência do sinal são mostrados nas figuras 5.20 e 5.21, para probabilidades de falso alarme de 0,1 e 0,01.

Na figura 5.20, foi necessário considerar 10000 amostras para se obter probabilidades de detecção maiores que 0,9 para sinais com SNR maiores que -110dB . Nota-se também que probabilidades de detecção maiores são obtidas quando se tem maiores potências de sinal recebido.

Figura 5.20. Probabilidade de detecção x Potência do sinal ($P_{fa} = 0,1$) - canal de TV

Nota-se que para uma probabilidade de falso alarme menor, necessita-se de mais amostras para se alcançar probabilidades de detecção maiores.

Figura 5.21. Probabilidade de detecção x Potência do sinal ($P_{fa} = 0,01$) - canal de TV

5.5. Conclusão

Neste capítulo foram apresentadas simulações dos algoritmos revisados no capítulo 3. Foram considerados quatro cenários, mostrando os desempenhos em função de probabilidades de detecção, falso alarme, relação sinal-ruído e número de amostras.

Foi também apresentado, no cenário 4, o desempenho do sensoriamento espectral baseado em detecção de energia, aplicado para a banda de TV.

Capítulo 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Foi analisado em detalhe o sensoriamento espectral por detecção de energia, e foram desenvolvidos algoritmos para sua aplicação tanto quando se tem conhecimento do nível da potência do ruído, como quando se considera a incerteza do ruído. Esses algoritmos permitem determinar o número de canais ocupados numa dada banda de frequências e o número de amostras necessárias na detecção para se atingir determinadas probabilidades de detecção e falso alarme.

Verificou-se através de simulações que a incerteza do ruído degrada o desempenho do sistema quando a relação sinal-ruído é baixa. Os algoritmos desenvolvidos permitem também determinar o limite inferior para a relação sinal-ruído, quando há incerteza do ruído.

Esses resultados são muito importantes na determinação da ocupação do espectro visando sua melhor utilização, em geral. Particularmente a banda de TV é de grande interesse nesse sentido, em função de sua importância social no cenário das telecomunicações, atualmente.

Sugere-se para um trabalho futuro, o estudo do sensoriamento com múltiplos detectores, ou seja, sensoriamento cooperativo, em cenários reais. A detecção distribuída, pode melhorar o desempenho do algoritmo no caso em que há incerteza do ruído. Além disso, como o algoritmo de detecção de energia não diferencia os usuários primários dos usuários secundários, esse problema também seria resolvido

mediante o compartilhamento de informações entre os rádios, usando-se uma base de dados da ocupação espectral dos mesmos. Assim, o sensoriamento espectral utilizando múltiplos sensores mostra-se como uma excelente oportunidade de pesquisa.

Sugere-se ainda para trabalhos futuros, a realização de estudos para solucionar o problema do terminal oculto, por exemplo através da rádio-localização dos usuários primários.

Adicionalmente, sugere-se a realização de estudos para avaliar o impacto do ruído do *hardware* no desempenho final do processo de sensoriamento.

Por fim, particularmente no caso da TV digital, sugere-se a realização de estudos de desempenho do sensoriamento quando aplicado somente a alguns segmentos do canal de TV, visando a minimização do tempo de processamento.

Referências

- [1] CABRIC, D.; TKACHENKO, A.; BRODERSEN, R.W., **Experimental study of spectrum sensing based on energy detection and network cooperation.** *in Workshop on Technology and Policy for Accessing Spectrum*, pp. 322–327, Aug. 2006
- [2] E. G. LARSSON AND M. SKOGLUND, **Cognitive radio in a frequency-planned environment: some basic limits.** *IEEE Trans.Wireless Commun.*, vol. 7, pp. 4800–4806, Dec. 2008
- [3] MITOLA, J., III, **Software radios-survey, critical evaluation and future directions.** *Telesystems Conference, 1992. NTC-92., National*, pp.13/15 – 13/23 May 1992.
- [4] MITOLA, J.; MAGUIRE, G.Q., JR., **Cognitive radio: making software radios more personal.** *Personal Communications, IEEE* , vol.6, no.4, pp.13-18, Aug 1999.
- [5] PORTELINHA F. M., KRETLY L. C.: **Rádios Cognitivos: Implementação de uma Plataforma Multiagentes**, UNICAMP, Jan. 2007.
- [6] CABRIC, D.; MISHRA, S.M.; BRODERSEN, R.W., **Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios.** *Signals, Systems and Computers, 2004. Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on* , vol.1, pp.772-776, 7-10 Nov. 2004
- [7] SHANKAR, N.S.; CORDEIRO, CARLOS; CHALLAPALI, K., **Spectrum agile radios: utilization and sensing architectures.** *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on* , pp.160-169, 8-11 Nov. 2005
- [8] TANDRA, R.; MISHRA, S.M.; SAHAI, A., **What is a Spectrum Hole and What Does it Take to Recognize One?.** *Proceedings of the IEEE* , vol.97, no.5, pp.824-848, May 2009.
- [9] M. LÓPEZ-BENÍTEZ, A. UMBERT, F. CASADEVALL: **Evaluation of Spectrum Occupancy in Spain for Cognitive Radio Applications.** *IEEE 69th Vehicular Technology Conference (VTC 2009 Spring)*, Barcelona, 26-29 April 2009.
- [10] A. PETRIN, P.G. STEFFES, **Measurement and Analysis of Urban Spectrum Usage.** *Proc. Of the 2004 International Symposium on Advanced Radio Technologies NTIA Special Publication SP-04-409*, 2004, pp. 45-48. Presented at the 2004 International Symposium on Advanced Radio Technologies, Boulder, CO, March 3, 2004.
- [11] TAHER, T.M.; BACCHUS, R.B.; ZDUNEK, K.J.; ROBERSON, D.A., **Long-term spectral occupancy findings in Chicago.** *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN), 2011 IEEE Symposium on* , vol., no., pp.100-107, 3-6 May 2011

-
- [12] FCC, **Spectrum Policy Task Force Report**. ET Docket No. 02-155. Nov. 2002.
 - [13] FCC, **Notice of Proposed Rulemaking (NPRM 03 322): Facilitating Opportunities for Flexible, Efficient and Reliable Spectrum agile Radio Technologies**. ET Docket No. 03 108, Dec. 2003.
 - [14] SEUNG JONG KIM; EUN CHEOL KIM; PARK, JAE SUNG; YOUNG CHEOL OH; JONG-SIK LEE; JIN YOUNG KIM, **Performance of primary user detection based on FFT for DTV signals**. Advanced Communication Technology (ICACT), 2010 The 12th International Conference on , vol.2, no., pp.1073,1075, 7-10 Feb. 2010
 - [15] DANEV, D., **On signal detection techniques for the DVB-T standard**. Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP), 2010 4th International Symposium on , vol., no., pp.1,5, 3-5 March 2010
 - [16] DANEV, D.; AXELL, E.; LARSSON, E.G., **Spectrum sensing methods for detection of DVB-T signals in AWGN and fading channels**. Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2010 IEEE 21st International Symposium on , vol., no., pp.2721,2726, 26-30 Sept. 2010
 - [17] LÓPEZ-BENITEZ, M.; CASADEVALL, F.; MARTELLA, C., **Performance of spectrum sensing for cognitive radio based on field measurements of various radio technologies**. Wireless Conference (EW), 2010 European , vol., no., pp.969,977, 12-15 April 2010
 - [18] CHUNYI SONG; HARADA, H., **A spectrum sensing prototype for Japanese digital television signals**. Global Communications Conference (GLOBECOM), 2012 IEEE , vol., no., pp.1271,1276, 3-7 Dec. 2012
 - [19] SHEN, J.; LIU, S.; WANG, Y.; XIE, G.; RASHVAND, H.F.; LIU, Y., **Robust energy detection in cognitive radio**. *Communications, IET* , vol.3, no.6, pp.1016-1023, June 2009
 - [20] ZHI YAN; ZHANGCHAO MA; HANWEN CAO; GANG LI; WENBO WANG, **Spectrum Sensing, Access and Coexistence Testbed for Cognitive Radio using USRP**. *Circuits and Systems for Communications, 2008. ICCSC 2008. 4th IEEE International Conference on*, pp.270-274, 26-28 May 2008
 - [21] SARIJARI, M.A.; MARWANTO, A.; FISAL, N.; YUSOF, S. K S; RASHID, R.A.; SATRIA, M.H., **Energy detection sensing based on GNU radio and USRP: An analysis study**. *Communications (MICC), 2009 IEEE 9th Malaysia International Conference on*, pp.338-342, 15-17 Dec. 2009
 - [22] ZHE HUANG; WEIDONG WANG; YINGHAI ZHANG, **Design and implementation of cognitive radio hardware platform based on USRP**. *Communication Technology and Application (ICCTA 2011), IET International Conference on* , pp.160-164, 14-16 Oct. 2011

-
- [23] WEBER, C.; HILDEBRANDT, G., **Evaluation of blind sensing algorithms in the 2.4 GHz ISM-band on GNU radio and USRP2**. *Wireless Communication Systems (ISWCS)*, 2012 International Symposium on , vol., no., pp.551,555, 28-31 Aug. 2012
 - [24] HAIYUAN LIU; YONGJIAO LIU; YUE HUO, **Cyclic stepping spectrum sensing based on energy detection**. *Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer (MEC)*, 2011 International Conference on, pp.486-489, 19-22 Aug. 2011
 - [25] MANCO-VASQUEZ, J.; TERAN, J.G.; PEREZ-ARRIAGA, J.; IBANEZ, J.; SANTAMARIA, I., **Experimental evaluation of multiantenna spectrum sensing detectors using a cognitive radio testbed**. *Signals, Systems, and Electronics (ISSSE)*, 2012 International Symposium on, pp.1-5, 3-5 Oct. 2012
 - [26] VAN TAM NGUYEN; VILLAIN, F.; LE GUILLOU, Y., **Cognitive radio systems: Overview and challenges**. *Awareness Science and Technology (iCAST)*, 2011 3rd International Conference on, vol., no., pp.497,502, 27-30 Sept. 2011
 - [27] ITU-R Report SM.2152, **Definitions of Software Defined Radio (SDR) and Cognitive Radio System (CRS)**.
 - [28] AKYILDIZ, I.F.; WON-YEOL LEE; VURAN, MEHMET C.; MOHANTY, S., **A survey on spectrum management in cognitive radio networks**. *Communications Magazine, IEEE* , vol.46, no.4, pp.40-48, April 2008
 - [29] FCC 10-174, **In the Matter of Unlicensed Operation in the TV Broadcast Bands: Second Memorandum Opinion and Order**. Federal Communications Commission, Sept 2010,
 - [30] ECC Report 159, **Technical and operational requirements for the possible operation of cognitive radio systems in the white spaces of the frequency band 470-790 MHz**. Sept 2010.
 - [31] IEEE 802.22 Working Group, **WRAN Reference Model**. Doc. Num. 22-04-0002-12-0000.
 - [32] C. CORDEIRO, K. CHALLAPALI, D. BIRRU, S. SHANKAR, **IEEE 802.22: the First Worldwide Wireless Standard Based on Cognitive Radios**. *Proc. IEEE DySPAN* 2005, pp. 328-337, Nov. 2005.
 - [33] H. URKOWITZ, **Energy detection of unknown deterministic signals**., *Proc. IEEE*, vol 55, pp. 523-531, Apr. 1967.
 - [34] F. DIGHAM, M. ALOUINI, M. SIMON, **On the Energy Detection of Unknown Signals over Fading Channels**, *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 55, NO. 1, Jan. 2007.
 - [35] EICHINGER, G.; CHOWDHURY, K.; LEESER, M., **"CRUSH: Cognitive Radio Universal Software Hardware**. *Field Programmable Logic and Applications (FPL)*, 2012 22nd International Conference on, pp.26-32, 29-31 Aug. 2012.

-
- [36] CABRIC, D.; TKACHENKO, A.; BRODERSEN, R.W., **Spectrum Sensing Measurements of Pilot, Energy, and Collaborative Detection**. *Military Communications Conference, 2006. MILCOM 2006. IEEE*, pp.1-7, 23-25 Oct. 2006
 - [37] J. PROAKIS, **Digital Communications**. 3rd edition, Mc Graw Hill.
 - [38] D. CABRIC, S. M. MISHRA, R. W. BRODERSEN, **Implementation Issues in Spectrum Sensing for Cognitive Radios**. Proc. 38th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Nov. 2004, pp. 772-776.
 - [39] E. AXELL, G. LEUS, AND E. LARSSON, **Overview of spectrum sensing for cognitive radio**. *Workshop Cognitive Information Processing*, pp. 322–327, 2010.
 - [40] A. GHASEMI, E.S. SOUSA, **Collaborative Spectrum Sensing for Opportunistic Access in Fading Environment**, Proc. IEEE DySPAN 2005, pp. 131-136, Nov. 2005.
 - [41] S. SHANKAR, C. CORDEIRO, K. CHALLAPALI, **Spectrum Agile Radios: Utilization and Sensing Architectures**, Proc. IEEE DySPAN 2005, pp. 160-169, Nov. 2005.
 - [42] STEPHEN J. SHELLHAMMER. **Spectrum Sensing In IEEE 802.22**. Qualcomm Inc.
 - [43] GUNDAR B., J. **Sintonizador-Demodulador para o Sistema Brasileiro de TV Digital**. São Paulo, 2008.
 - [44] ABNT NBR 15601. **Televisão Digital Terrestre – Sistema de Transmissão**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2007.
 - [45] Anatel, **Resolução N 398**, Brasil 2005.
 - [46] LIN, W.; ZHANG, Q. **A design of energy detector in cognitive radio under noise uncertainty**. In: 11th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems, 2008. ICCS 2008. p. 213–217.
 - [47] SHELLHAMMER, S., CHOUINARD, G.: **Spectrum sensing requirements summary**. IEEE 802.22-06/0089r5, July 2006.
 - [48] SHELLHAMMER, S., TAWIL V., CHOUINARD G., MUTERSPAUGH M., GHOSH M. **Spectrum Sensing Simulation Model**, IEEE 802.22. 2006.
 - [49] Analog Devices. Disponível em: <http://www.analog.com/en/evaluation/eval-fmcomms/eb.html>
 - [50] Lyrtech, Disponível em: <http://nutaq.com/>
 - [51] USRP, Disponível em: <http://www.ettus.com/>

1.2. Equipamentos da Lyrtech

A Lyrtech também oferece soluções para SDR e Rádio Cognitivo, os seus módulos estão baseados nos blocos representativos de SDR, isto é Antenas, Front-End e processadores de sinal. A seguir são apresentadas as soluções da Lyrtech.

1.2.1. RADIO 420X (Multimode SDR RF FMC Transceiver)

O Rádio 420X FMC, pode ser considerado como o Front-End do sistema. É um módulo transceptor que pode trabalhar na faixa de frequências de 300MHz – 3GHz. Dentre as aplicações que pode se desenvolver com o Radio 420X, estão: Sistemas MIMO, rádios cognitivos, LTE, Wimax, Wifi, GSM, WCDMA e sinal inteligente (SIGINT). Está baseado no chip LMS6002D.

O Rádio420X atende o padrão VITA 57.1 FMC, que é usado em processamento digital de sinais, de esta forma, ele pode se integrar com as plataformas de FPGAs.

1.2.2. uSDR420

É um equipamento de SDR personalizável, que incorpora uma FPGA e um módulo transceptor de RF. Suporta Acesso por Windows e Linux através de conexão GigE (Gigabit Ethernet). Ele tem capacidade de funcionamento autônomo e permite integração com projetos em Matlab/Simulink.

A placa Perseus 601X, que é a seção de FPGA do equipamento uSDR420 é projetada em função da alta capacidade do FPGA Virtex-6 da Xilinx.

A seção de rádio opera na faixa de frequências de 300MHz a 3GHz. Ela está baseado no chip de RF programável LMS6002D, que é ideal para um amplo número de aplicações, dentre elas o SDR, e possui conversores ADC e DAC de 12 bit.

Figura A2. Solução oferecida pela Lyrtech [50]

Figura A3. Secção de Rádio da Solução oferecida pela Lyrtech [50]

1.3. USRP da ETTUS

A Universal Software Radio Peripheral (USRP) é uma unidade projetada para trabalharem conjunto com um processador externo (PC, estação de trabalho, etc.) através de uma FPGA, que permite a realização de rádios controlados por software.

Os equipamentos de SDR da Ettus são componentes de módulos: um módulo principal onde está implementado o processamento digital, e “placas-filhas” onde estão implementados os Front-end de RF do sistema.

Em função das características da aplicação que vai se desenvolver, pode se usar um determinado módulo principal em conjunto com uma “placa filha” (front-end) escolhido segundo a faixa de frequências. Assim, a faixa de frequência de operação é definida pelas “placas-filhas” de Radio Frequência (RF).

As aplicações para as USRP podem ser inicialmente feitas no software chamado GNURadio. Posteriormente, se forem necessárias maiores capacidades, pode ser usada a linguagem Python, e para os algoritmos críticos de baixo nível, os módulos de processamento de sinal são feitos usando a linguagem de programação C/C++

Figura A4. Soluções oferecidas pela Ettus [51]

A Ettus oferece três famílias de produtos de USRP: Networked Series (USRP N200 e USRP N210), Embedded Series (USRP E100 e USRP E110), e Bus Series (USRP B100 e USRP1).

No USRP Networked Series tem-se o USRP N200 e o USRP N210. Eles são basicamente os mesmos equipamentos, com a única diferença que o N210 utiliza uma FPGA (Spartan 3A-DSP 3400 FPGA) maior que o N200 (Spartan 3A-DSP 1800 FPGA).

As características comuns do N200 e do N210 são:

- ADC de 100 MS/s e DAC de 400 MS/s
- Tensão de alimentação de DC 6V e consumo de corrente 1,3 A
- Temperatura de operação de 0 a 55 C.
- Interface com o computador “host” do tipo Gigabit Ethernet.
- Software GNU Radio, LabVIEW e Simulink.

Na serie **USRP Embedded**, têm-se dois equipamentos o USRP E100 e o USRP E110. Esta família de USRP caracteriza-se por permitir implementar sistemas de SDR que possam funcionar de forma independente. Os equipamentos vêm com uma instalação de Linux (Angstrom) que inclui uma versão de GNURádio.

O E100 e E110 são basicamente o mesmo equipamento. A diferença é que o E100 utiliza uma FPGA (Spartan 3A-DSP 1800 FPGA) que é de menor capacidade que do E110 (Spartan 3A-DSP 3400 FPGA).

As características comuns do E100 e do E110 são:

- ADC de 64 MS/s e DAC de 128 MS/s
- Tensão de alimentação de DC 6V e consumo de corrente 1,3 A
- Temperatura de operação de 0 a 55 C.
- Software GNU Radio.

Na série **USRP Bus**, têm-se dois equipamentos o USRP B100 e o USRP1. Esta família de USRP caracteriza-se por ter conectividade com o computador host mediante cabo USB 2.0.

No USRP B100, se encontra:

- Uma placa principal com um FPGA Xilinx Spartan 3A – 1400
- ADC de 64 MS/s e DAC de 128 MS/s
- Tensão de alimentação de DC 6V e consumo de corrente 1,3 A
- Temperatura de operação de 0 a 55 C.
- Interface com o computador “host” do tipo USB2.0
- Software GNU Radio.

No USRP1, se encontra:

- Um FPGA Altera Cyclone.
- ADC de 64 MS/s e DAC de 128 MS/s
- Tensão de alimentação de DC 6V e consumo de corrente 1,3 A
- Temperatura de operação de 0 a 55 C.
- Interface com o computador “host” do tipo USB2.0
- Software GNU Radio.

1.3.1. Front-end da Ettus

Dependendo da frequência da aplicação, a Ettus proporciona diversas placas-filhas para se usar como front-end, descritas a seguir:

Figura A5. Front-end da Ettus [51]

- **BasicTX Daughterboard 1 - 250 MHz Tx**, é uma placa filha de baixo custo, com capacidade de frequência de transmissão de 1 – 250MHz.
- **BasicRX Daughterboard 1- 250 MHz Rx**, frequência de recepção de 1- 250MHz.
- **TVRX2 50 - 860 MHz**, somente receptor que opera nas frequências de 50 – 860 MHz.
- **DBSRX2 800 - 2300 MHz Rx**, receptor de 0,8 – 2,3GHz.
- **WBX 50 - 2200 MHz Rx/Tx**, transceptor que tem uma faixa de frequência de 50MHz até 2,2GHz, e pode transmitir com uma potência de 30 até 100 mW.
- **SBX 400 - 4400 MHz Rx/Tx**, transceptor de potência de saída de 100mW.
- **RFX900 750 - 1050 MHz Rx/Tx**, Transceptor desenvolvido especialmente para operação em 900MHz, com uma potência de saída de 200mW.
- **RFX1800 1,5 - 2,1 GHz Rx/Tx**, transceptor desenvolvido para operar em 1900 MHz, com potencia de saída de 100mW.
- **RFX2400 2,3 – 2,9 GHz Rx/Tx**, transceptor desenvolvido especificamente para operar em 2.4GHz, com potência de saída de 50mW.
- **XCVR2450 2,4 – 2,5 GHz, 4.9-5.9 GHz Tx/Rx for USRP1**, transceptor desenvolvido para operar em 2,4GHz e 5,9GHz, e potência de saída de 100mW.

1.3.2. Antenas

LP0410 tipo Log Periódica (400 MHz to 1 GHz): Antena direcional de PCB, funciona na faixa 400 MHz - 1 GHz, de 5 – 6 dBi de Ganho. Funciona com qualquer front-end que opera na faixa de frequências de 400 MHz - 1 GHz.

LP0965 Log Periódica (850 MHz to 6.5 GHz): Antena direcional de PCB, funciona na faixa 850 MHz - 6,5 GHz, de 5 – 6 dBi de ganho. Funciona com qualquer front-end que opera na faixa de frequência de 850 MHz a 6,5 GHz

Figura A6. Antenas Log Periódica LP0410 e LP0965 [51]

1.4. Principais Limitações de Equipamentos SDR

As principais limitações em equipamentos de SDR são devidas aos processadores de sinal como os FPGAs e conversores ADC e DAC, que amostram o sinal a uma taxa bem alta.

Comparação entre os conversores.

- B100 ADC de 64 MS/s DAC de 128 MS/s
- N200 ADC de 100 MS/s DAC de 400 MS/s
- N210 ADC de 100 MS/s DAC de 400 MS/s
- E100 ADC de 64 MS/s DAC de 128 MS/s
- E110 ADC de 64 MS/s DAC de 128 MS/s
- USRP1 ADC de 64MS/s DAC de 128MS/s
- ADI ADC de 250 MS/s DAC de 1GS/s

Comparação de FPGAs dos sistemas da Ettus, ADI e da Lyrtech são:

- USRP1 Altera Cyclone.
- USRP2 Spartan 3A-DSP 1800
- USRP2 Spartan 3A-DSP 3400
- ADI Virtex-6
- Lyrtech Virtex-6