

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES
CAMPUS PATOS DE MINAS

DAYANE CRISTINA JESUS MARTINS

**SENSORIAMENTO ESPECTRAL PARA RÁDIOS
COGNITIVOS APLICADO EM CENÁRIOS DE TVWS**

Patos de Minas - MG

2023

DAYANE CRISTINA JESUS MARTINS

**SENSORIAMENTO ESPECTRAL PARA RÁDIOS
COGNITIVOS APLICADO EM CENÁRIOS DE TVWS**

Projeto Final de Curso apresentado à banca examinadora como requisito de avaliação da disciplina de PFC2 da graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações, da Faculdade de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Uberlândia, Campus Patos de Minas.

Orientador: Prof. Dr. André Antônio dos Anjos

DAYANE CRISTINA JESUS MARTINS

SENSORIAMENTO ESPECTRAL PARA RÁDIOS COGNITIVOS APLICADO EM CENÁRIOS DE TVWS

Projeto Final de Curso apresentado à banca examinadora como requisito de avaliação da disciplina de PFC2 da graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações, da Faculdade de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Uberlândia, Campus Patos de Minas.

Orientador: Prof. Dr. André Antônio dos Anjos

Patos de Minas, 27 de novembro de 2023

Prof. Dr. André Antônio dos Anjos
(Orientador – FEELT – UFU)

Prof^ª. Dra. Karine Barbosa Carbonaro
(Membro interno – FEELT – UFU)

Prof. Dr. Renan Alves dos Santos
(Membro interno – FEELT – UFU)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Adélio e Maria Piedade, pelo constante apoio na minha vida acadêmica. À minha irmã Hingryd que sempre esteve disposta a me ajudar e é uma das minhas fontes de motivação para conclusão do curso.

Ao meu companheiro Matheus Duarte, por todo o carinho e sempre estar disposto a me ajudar nas dificuldades.

Aos meus colegas de faculdade, por todos os momentos e experiências compartilhados.

Ao meu orientador Prof. Dr. André Antônio dos Anjos, pela compreensão, dedicação e todo o conhecimento que me foi passado.

A todos os professores que contribuíram com a minha formação e a Universidade Federal de Uberlândia – Campus Patos de Minas, pela oportunidade de ensino e auxílios prestados com gratuidade e excelência.

RESUMO

A política de alocação espectral fixa adotada pela Agência Nacional de Telecomunicações no Brasil permite que apenas usuários licenciados transmitam em determinadas bandas. As bandas destinadas para transmissões de TV, VHF (*Very High Frequency*) e UHF (*Ultra High Frequency*), possuem ineficiência espectral já que nem sempre estão totalmente ocupadas, ficando conhecidas nesses casos como *TV White Spaces* (TVWS).

Os rádios cognitivos (RCs), por meio do sensoriamento espectral, surgem como solução para aumentar a eficiência do uso do espectro eletromagnético. No presente trabalho, o sensoriamento espectral, a partir da técnica de detecção de energia, é inicialmente simulado e avaliado em cenários de oportunidades de transmissão nas faixas de TV no Brasil. Nessas faixas de frequência, os usuários licenciados utilizam um sinal de transmissão do tipo OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), com características muito bem definidas e padronizadas. Na simulação considera-se um sinal de usuário primário do tipo ISDB-TB (*Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial Brazilian Version*) e um canal de desvanecimento Rayleigh lento, no qual não há uma visada direta entre o RC e o transmissor primário. O trabalho investiga, por meio da análise das probabilidades de detecção e de falso alarme, o desempenho do sistema de sensoriamento em diversas situações, tais como: variação do número de amostras coletadas por cada RC, variação da relação sinal-ruído média e, por último, um cenário cooperativo, no qual verifica-se a influência do número de RCs na qualidade do sensoriamento realizado.

Com base nas simulações desenvolvidas e em seus resultados, um sistema real de sensoriamento espectral não cooperativo para operação nas faixas VHF e UHF também é implementado em um rádio definido por software Ettus USRP N210, demonstrando resultados práticos de operação bem coerentes com aqueles obtidos via simulação.

Palavras Chaves: Sensoriamento Espectral; *TV White Space*; Rádio Cognitivo; ISDB-TB; Detecção de Energia.

ABSTRACT

The fixed spectral allocation policy adopted by the National Telecommunications Agency in Brazil allows only licensed users to transmit in certain bands. The bands intended for TV transmissions, VHF (Very High Frequency) and UHF (Ultra High Frequency), have spectral inefficiency as they are not always fully occupied, becoming known in these cases as TV White Spaces (TVWS).

Cognitive radios (RCs), through spectral sensing, emerge as a solution to increase the efficiency of the use of the electromagnetic spectrum. In the present work, spectral sensing, based on the energy detection technique, is initially simulated and evaluated in scenarios of transmission opportunities in TV bands in Brazil. In these frequency bands, licensed users use an OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) transmission signal, with very well-defined and standardized characteristics. In the simulation, a primary user signal of the ISDB-TB type (Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial Brazilian Version) and a slow Rayleigh fading channel are considered, in which there is no direct line of sight between the RC and the primary transmitter. The work investigates, through the analysis of detection and false alarm probabilities, the performance of the sensing system in several situations, such as variation in the number of samples collected by each RC, variation in the average signal-to-noise ratio, and lastly, a cooperative scenario, in which the influence of the number of RCs on the quality of the sensing carried out is verified.

Based on the simulations developed and their results, a real non-cooperative spectral sensing system for operation in the VHF and UHF bands is also implemented in a software-defined radio Ettus USRP N210, demonstrating practical operation results that are well coherent with those obtained through simulation.

Keywords: *Spectrum Sensing; TV White Space; Cognitive Radio; ISDB-TB; Energy Detection.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Arquitetura de rede DSA.....	24
Figura 2.2 Ciclo de um Rádio Cognitivo.....	24
Figura 2.3 Função densidade de probabilidade da variável aleatória T.	27
Figura 2.4 Representação de uma curva ROC.....	28
Figura 2.5 Algumas técnicas de detecção do espectro.	29
Figura 2.6 Detecção de energia.	30
Figura 2.7 Diagrama de blocos de um RDS.	33
Figura 2.8 Diagrama de blocos do Rádio USRP N210.	34
Figura 2.9 Placa Filha WBX.	35
Figura 2.10 Exemplo de distribuição da banda em segmentos.	36
Figura 2.11 Diagrama de blocos do padrão ISDB-TB.	37
Figura 4.1 Símbolos transmitidos nas portadoras.....	44
Figura 4.2 Módulo do sinal OFDM gerado no MATLAB.	45
Figura 4.3 Espectro do sinal OFDM gerado no MATLAB.....	45
Figura 4.4 Fluxograma de obtenção de P_D e P_{FA}	47
Figura 4.5 Histogramas.	48
Figura 4.6 Curva de desempenho comparando diferentes valores de SNR.	49
Figura 4.7 Curvas de desempenho comparando diferentes quantidades de amostras coletadas.	50
Figura 4.8 Curvas de desempenho para valores de P_{FA} fixos.....	51
Figura 4.9 Curvas de desempenho comparando quantidades diferentes de RC.....	52
Figura 4.10 Comparação de desempenho de um sistema cooperativo com um sistema não cooperativo, ambos processando o mesmo número de amostras para a tomada de decisão.	53
Figura 5.1 Sinal gerado no software GNU Radio.....	56
Figura 5.2 Interface gráfica criada no projeto do GNU RADIO.	57
Figura 5.3 Interface de sensoriamento espectral.	58
Figura 5.4 Ambiente de implementação prática do sistema de sensoriamento.	60
Figura 5.5 Foto do ambiente de medição cabeado.	61
Figura 5.6 Desempenho do sistema de sensoriamento espectral com a variação de SNR média em cenário cabeado.	62

Figura 5.7 Foto panorâmica do ambiente de medição sem fio.....	63
Figura 5.8 Desempenho do sistema de sensoriamento com e sem visada direta.....	64
Figura 5.9 Desempenho do sistema de sensoriamento com variação da SNR.....	65
Figura 5.10 Desempenho do sistema de sensoriamento com variação do número de amostras.	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 Divisão do espectro em faixas	17
Tabela 2.1 Especificações técnicas do Rádio utilizado.	34
Tabela 2.2 Número de pacotes transmitidos dentro de um quadro.	38
Tabela 2.3 Quantidade de portadoras por modo de operação.....	39
Tabela 4.1 Parâmetros utilizados na implementação do sinal OFDM de TV Digital.	43
Tabela 5.1 Parâmetros utilizados no MATLAB para o sensoriamento espectral.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	Conversor Analógico/Digital
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
BTS	<i>Broadcast Transport Stream</i>
CF	Centro de Fusão
CFAR	<i>Constant False Alarm Rate</i>
DBPSK	<i>Differential Binary Phase Shift Keying</i>
DAS	<i>Dynamic Spectrum Access</i>
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
DAC	Conversor Digital/Analógico
ED	Detecção de Energia (<i>Energy Detection</i>)
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
FDP	Função Densidade de Probabilidade
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FI	Frequência Intermediária
FPGA	<i>Field-Programmable Gate Array</i>
GPU	<i>Graphics Processing Unit</i>
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
INATEL	Instituto Nacional de Telecomunicações
ISDB-TB	<i>Integrated System Digital Broadcasting – Terrestrial Brazil</i>
LAN	Redes Locais sem Fio

LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MTM	<i>Multitaper Method</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
PFC	Projeto Final de Curso
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
RC	Rádio Cognitivo
RF	Radiofrequência
RG	<i>Random Guess</i>
ROC	<i>Receiver Operating Characteristic Curve</i>
RDS	Rádio Definido por Software
SFDR	<i>Spurious-Free Dynamic Range</i>
SNR	Razão Sinal-Ruído
TMCC	<i>Transmission and Multiplexing Configuration Control</i>
TS	<i>Transport Stream</i>
TVWS	<i>Tv White Space</i>
UFC	Universidade Federal do Ceará
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
UP	Usuário Primário
US	Usuário Secundário
VHF	<i>Very High Frequency</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

H_0	Hipótese de ausência de usuário primário na banda analisada
H_1	Hipótese de presença de usuário primário na banda analisada
$y(t)$	Sinal Sensoriado pelo Rádio Cognitivo
$x(t)$	Sinal transmitido pelo usuário primário
$n(t)$	Ruído térmico
$h(t)$	Ganho ou atenuação provocado pelo canal
γ	Limiar de decisão
T	Variável de decisão
$f_0(t)$	FDP sob hipótese de H_0
$f_1(t)$	FDP sob hipótese de H_1
P_{BE}	Probabilidade de encontrar um buraco espectral
P_{FA}	Probabilidade de falso alarme
P_D	Probabilidade de detecção
P_{FN}	Probabilidade de falso negativo
T_{ED}	Variável de decisão para a técnica detecção de energia
n	Número de amostras
$y(i)$	i -ésima amostra digitalizada e coletada pelo RC
σ_w^2	Variância do ruído
σ_s^2	Variância do sinal primário
$Q(*)$	Função Q
δ	SNR instantânea
$\bar{\delta}$	SNR média

k	Índice da portadora do sinal OFDM
n	Número do símbolo OFDM
K	Portadoras totais do modo
T_s	Tempo de duração do símbolo OFDM
T_g	Tempo de duração do intervalo de guarda
T_u	Tempo de duração da parte útil do símbolo
f_c	Frequência central do sinal de RF
K_c	Índice da portadora correspondendo ao centro da frequência de RF
$c(n, k)$	Símbolo complexo da k -ésima portadora no n -ésimo símbolo OFDM
$s(t)$	Sinal de transmissão
m	Número de Rádios Cognitivo
n	Número de amostras coletadas
p	Número de Transmissores
Ne	Número de Eventos de Monte Carlo

Sumário

CAPÍTULO 1	17
CONCEITOS INTRODUTÓRIOS	17
1.1 INTRODUÇÃO	17
1.2 PROBLEMATIZAÇÃO	19
1.3 TEMA DO PROJETO	20
1.4 OBJETIVOS	20
1.4.1 OBJETIVOS GERAIS	20
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
1.5 JUSTIFICATIVAS	21
1.6 PUBLICAÇÕES	22
1.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	22
CAPÍTULO 2	23
REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	23
2.2 RÁDIO COGNITIVO	23
2.3 SENSORIAMENTO ESPECTRAL.....	25
2.3.1 MODELO BÁSICO DE UM SISTEMA DE SENSORIAMENTO ESPECTRAL	26
2.3.2 CURVA ROC	28
2.3.3 TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO ESPECTRAL	29
2.3.3.1 DETECÇÃO DE ENERGIA	29
2.4 RÁDIO DEFINIDO POR SOFTWARE	32
2.4.1 USRP N210.....	33
2.5 SINAL DE USUÁRIO PRIMÁRIO EM CENÁRIO DE TVWS NO BRASIL (ISDB-TB).....	35
CAPÍTULO 3	41
MATERIAIS E MÉTODOS	41

3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	41
3.2	MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.3	RECURSOS NECESSÁRIOS	42
CAPÍTULO 4		43
RESULTADOS E DISCUSSÕES DAS SIMULAÇÕES		43
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	43
4.2	SIMULANDO UM SINAL DE USUÁRIO PRIMÁRIO.....	43
4.3	SIMULAÇÃO DO SENSORIAMENTO ESPECTRAL.....	46
4.4	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	48
4.4.1	INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO SINAL-RUÍDO NA DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DA VARIÁVEL DE DECISÃO T_{ED}	48
4.4.2	INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO SINAL-RUÍDO NO DESEMPENHO DO SENSORIAMENTO EM TVWS	49
4.4.3	INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE AMOSTRAS COLETADAS PELO RC NO DESEMPENHO DO SENSORIAMENTO ESPECTRAL EM TVWS	50
4.4.4	AVALIANDO A PROBABILIDADE DE DETECÇÃO EM FUNÇÃO DE UMA P_{FA} ALVO.....	50
4.4.5	INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE RCs NO DESEMPENHO DO SENSORIAMENTO ESPECTRAL EM TVWS.....	52
4.4.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	54
CAPÍTULO 5		55
RESULTADOS E DISCUSSÕES DO SISTEMA DE SENSORIAMENTO REAL		55
5.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	55
5.2	GERANDO UM SINAL DE USUÁRIO PRIMÁRIO EM RDS	55
5.3	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE SENSORIAMENTO ESPECTRAL UTILIZANDO RDS E MATLAB.....	57
5.4	DESEMPENHO PRÁTICO DO SISTEMA DE SENSORIAMENTO ESPECTRAL	61
5.4.1	DESEMPENHO EM AMBIENTE CONTROLADO.....	61

5.4.2 PERFORMANCE DO SISTEMA DE SENSORIAMENTO ESPECTRAL EM AMBIENTE SEM FIO	63
CAPÍTULO 6	68
CONCLUSÃO E PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS	68
REFERÊNCIAS	70

CAPÍTULO 1

CONCEITOS INTRODUTÓRIOS

1.1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a crescente demanda por altas taxas de dados e por conectividade tem fomentado o desenvolvimento de sistemas de telecomunicações cada vez mais avançados (1,2). No entanto, o desenvolvimento e a implantação desses novos sistemas têm esbarrado em um grande problema, que é o da escassez do espectro eletromagnético (3).

O órgão regulador do espectro no Brasil é a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), a qual possui como competência fiscalizar a implantação e o uso dos serviços de telecomunicações, logo, é a responsável pelo gerenciamento do espectro no país. A política de utilização do espectro adotada atualmente é de alocação fixa, sendo decomposta em faixas espectrais para aplicações específicas cujo uso é restrito aos usuários primários (UP), que possuem uma licença da ANATEL para operação em determinada faixa de frequência, impedindo que outros usuários ou serviços façam o uso dessa mesma faixa. A autorização para utilização do espectro eletromagnético possui prazo determinado e, em geral, é expedida de acordo com a região onde o transmissor está instalado. O espectro eletromagnético gerenciado pela ANATEL contempla de 8.3 kHz a 3000 GHz, porém não há aplicações alocadas em frequências superiores a 300 GHz. A segmentação desse espectro é apresentada na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 Divisão do espectro em faixas

Símbolo	Faixa de frequências	Algumas aplicações
VLF	3 a 30 kHz	Comunicações para submarinos.
LF	30 a 300 kHz	Auxílio à navegação aérea, serviços marítimos e radiodifusão local.
MF	300 a 3000 kHz	
HF	3 a 30 MHz	Rádios amadores, sistemas aeronáuticos.
VHF	30 a 300 MHz	Transmissão de TV, sistemas comerciais e particulares de comunicação, serviços de segurança pública.
UHF	300 a 3000 MHz	Transmissão de TV, sistemas móveis celulares 4G, sistemas comerciais e particulares de comunicação, serviços de

		segurança pública, Redes Locais sem Fio (LAN), Bluetooth, GPS.
SHF	3 a 30 GHz	Sistemas móveis celulares 5G e sistemas de comunicação via satélite.
EHF	30 a 300 GHz	Sistemas de comunicação sem fio banda larga de baixo alcance e pesquisas científicas.
-	300 a 3000 GHz	Não foram encontradas aplicações para essa faixa de frequência.

Fonte: Autora.

Análises de diferentes autores ao redor do mundo têm demonstrado que o atual cenário de escassez espectral advém não de uma limitação física do espectro eletromagnético, mas sim de sua subutilização (4,5), muito devido à atual política de alocação fixa, o que se torna mais evidente nas faixas de VHF (*Very High Frequency*) e UHF (*Ultra High Frequency*), as quais são destinadas à alocação dos canais de TV. O autor de (6) apresentou que comparando os dados de canais outorgados pela ANATEL no espectro com os dados resultantes das medições efetuadas na região da cidade de Niterói-RJ, existem canais licenciados para a transmissão, contudo não são utilizados, deixando grandes faixas de espectro ociosas mesmo em regiões com densidade populacional densa.

Os espaços não utilizados do espectro de TV ficaram conhecidos no mundo como *TV White Space* (TVWS), e vem surgindo, juntamente com uma nova política de alocação dinâmica do espectro denominada de *Dynamic Spectrum Access* (DSA) (7), como uma solução para contornar esse problema de “escassez” e deixar o uso do espectro mais eficiente, visto que é um recurso limitado. No Brasil, recentemente, o Conselho Diretor da ANATEL aprovou uma proposta de regulamentação de utilização dinâmica, em caráter secundário, do espectro ocioso de TVWS (8). A proposta aprovada de resolução atribui e destina faixas de VHF e UHF para esse tipo de aplicação, considerando inicialmente as faixas de 54-72 MHz; 174-216 MHz; 470-608 MHz; e de 614-698 MHz. O regulamento sobre condições de uso permanece em elaboração e a expectativa é que preveja a utilização das bandas ociosas de TV para serviços de telefonia móvel celular e banda larga. Provedores regionais já têm manifestado interesse na utilização em caráter secundário do TVWS usando LTE e 5G, embora reconheçam que ainda não há escala de equipamentos apropriados para a utilização oportunista do espectro ocioso (8).

Neste contexto, torna-se necessário o estudo e o desenvolvimento de rádios cada vez mais inteligentes, equipados com novas tecnologias, que consigam aproveitar esse recurso disponível de forma eficiente. No Brasil, por exemplo, um projeto idealizado e coordenado pelo

Núcleo de Informação e Coordenação do Ponto BR (NIC.br), a partir de acordo de cooperação com a Embaixada do Reino Unido no Brasil, analisa a viabilidade técnica e operacional do uso dos TVWS com o intuito de ampliar a inclusão digital no país (9). Desenvolvido em conjunto com o Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL) e a Universidade Federal do Ceará (UFC), com o apoio da ANATEL, o projeto busca explorar a possibilidade e desenvolver tecnologias para as operadoras e provedores de acesso à internet empregarem a tecnologia em TVWS para levar a conectividade a áreas remotas e rurais, considerando-se além dos aspectos técnicos e operacionais das regiões, também o seu quesito econômico, desde que em concordância com as condições para a sua aplicação conforme a regulamentação da ANATEL.

Vale ressaltar que já existem alguns padrões de comunicação sem fio padronizados prevendo a utilização oportunista dos TVWS, merecendo destaque o IEEE 802.22, que conta com técnicas para minimizar a interferência aos UPs (10) e o 5G (11). Entretanto, novos estudos e novas tecnologias serão necessárias para viabilizar o desenvolvimento comercial destes rádios tão versáteis e inteligentes denominados de Rádios Cognitivos (RC).

Os Rádios Cognitivos, em síntese, são dispositivos de telecomunicações inteligentes, capazes de tomar decisões dinâmicas baseando-se em informações coletadas no ambiente em que estão inseridos (12). Eles são equipados com uma tecnologia ágil que utiliza o espectro de forma oportunista, identificando os canais ociosos e viabilizando a sua utilização por um Usuário Secundário (US), não licenciado. Um de seus principais desafios é o de não prejudicar a transmissão de um UP (13). O ciclo cognitivo do rádio consiste em: detectar os buracos espectrais, selecionar as melhores bandas, coordenar o acesso espectral com outros usuários e evacuar a banda caso apareça um usuário primário (13,14). A principal funcionalidade de um RC que promete solucionar o problema da escassez do espectro eletromagnético é o sensoriamento espectral e será o foco deste trabalho.

1.2 PROBLEMATIZAÇÃO

Com a evolução tecnológica surgem cada vez mais novos padrões de comunicação sem fio. Esses padrões dependem do espectro eletromagnético para a transmissão e recepção de dados, porém o espectro é um recurso limitado e “escasso”, o que se deve majoritariamente à atual política de alocação fixa. As faixas destinadas para canais de TV muitas vezes possuem espaços no espectro que não estão sendo utilizados, denominados TVWS. Com a flexibilização das políticas de alocação espectral, o sensoriamento do espectro com rádios cognitivos em TVWS, tema do trabalho, vem sendo apontado por muitos pesquisadores como uma das principais soluções para resolver o problema de escassez espectral encontrada pelos sistemas

de telecomunicações emergentes, podendo oferecer novas oportunidades de transmissão a usuários secundários sem prejudicar a transmissão dos usuários licenciados na banda.

Existem diversos estudos na área de sensoriamento espectral abordando diferentes cenários e utilizando diferentes técnicas de implementação. Por exemplo, os autores em (13) apresentam uma pesquisa contendo uma visão geral sobre as arquiteturas de rádio cognitivo e sobre as técnicas de sensoriamento espectral de filtro casado, detecção de energia e detecção por ciclo estacionário. Em (5) é apresentado um explanado sobre a técnica de sensoriamento denominada *Multitaper Method* (MTM). A autora em (12) apresenta um trabalho sobre sensoriamento espectral com múltiplas antenas com a detecção por verossimilhança e por cancelamento por divisão de densidade espectral de potência. Já os autores de (15) apresentam uma pesquisa de detecção de espectro baseado em rede neural composta, visando melhorar o nível de inteligência do RC e assim melhorando o desempenho das técnicas. Entretanto, apesar dos diversos trabalhos científicos, há um déficit de trabalhos que abordam uma implementação prática de técnicas de sensoriamento espectral. Neste contexto, o presente trabalho visa aprofundar o estudo do sensoriamento espectral no panorama de TVWS no Brasil, propondo uma implementação prática em Rádio Definido por Software (RDS).

1.3 TEMA DO PROJETO

Este projeto final de curso tem como tema o sensoriamento espectral para rádios cognitivos voltado para os espaços ociosos em TVWS no Brasil, visando solucionar o problema da subutilização do espectro eletromagnético e permitindo que novos serviços e aplicações possam desfrutar de um espectro ocioso de forma oportunista.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo desta pesquisa é realizar estudos e simulações para viabilizar uma implementação prática, em rádio definido por software, de um sistema de sensoriamento espectral real, aplicado em rádios cognitivos, visando o uso oportunista do espectro em cenários de *TV White Space* no Brasil.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Almejando alcançar o objetivo geral descrito acima, propõem-se a divisão das atividades para a parte I e a parte II desse Projeto Final de Curso (PFC), conforme descrita abaixo.

Na parte I do PFC serão realizadas as seguintes atividades:

- a) Compreender conceitos básicos sobre Rádios Cognitivos;
- b) Estudar diferentes técnicas de sensoriamento espectral;
- c) Selecionar uma das técnicas de sensoriamento estudadas e simular seu desempenho no software MATLAB;
- d) Simular no software MATLAB um sinal de transmissão em conformidade com o do padrão de TV digital brasileiro;
- e) Incorporar à simulação de sensoriamento espectral o sinal de usuário primário do padrão de TV digital brasileiro, avaliando o desempenho do sensoriamento neste cenário mais realista de TVWS.

Na parte II do PFC serão realizadas as seguintes atividades:

- a) Estudar de forma geral o conceito de rádio definido por software (RDS);
- b) Estudar a plataforma de RDS USRP N210 da Ettus, que será a plataforma utilizada na implementação prática do transmissor de TV Digital no padrão brasileiro e do rádio que fará o sensoriamento do espectro;
- c) Geração de um sinal de TV digital no padrão brasileiro (ISDB-TB) em rádio definido por software para transmissão em um canal UHF configurável, por meio da plataforma GNU-radio;
- d) Desenvolvimento de uma aplicação em MATLAB para comunicação com o RDS e para varredura do espectro na faixa de UHF;
- e) Implementação da técnica de sensoriamento espectral, na mesma aplicação do item “d”, visando identificar quais canais UHF estão livres e quais estão ocupados.
- f) Levantamento das curvas de desempenho do sistema desenvolvido e comparação com as curvas teóricas obtidas na parte 1 do trabalho.

1.5 JUSTIFICATIVAS

Com o surgimento de novos sistemas e novas tecnologias, como por exemplo, o 5G (16,17) e o WI-FI 7 (18) existe a necessidade de alocar uma parte do espectro para que eles possam operar, porém a transmissão nas frequências acima de 6 GHz pode ser inconveniente para algumas aplicações, dentre os quais se pode citar a maior atenuação no sinal de transmissão e a maior dificuldade de desenvolvimento do hardware para operação nessas faixas mais elevadas. Por outro lado, a operação em frequências abaixo de 1 GHz, apesar de ser mais simples, em termos de viabilização, esbarra no problema da “escassez espectral”, uma vez que

a política de alocação fixa do espectro faz com que praticamente não haja porções espectrais que possam ser utilizadas de forma regularizada. Entretanto, como já mencionado, muitos pesquisadores já constataram uma subutilização do espectro, principalmente na faixa destinada aos canais de TV.

No Brasil, existem vários canais livres que são destinados pela ANATEL a transmissões de TV, porém muitas vezes não possuem nenhuma transmissão. Em áreas rurais, em que há menos transmissões desse tipo de serviço, existem ainda mais espaços espectrais livres que poderiam ser utilizados, por exemplo, com foco na viabilização de internet banda larga para essas áreas remotas.

A combinação de um sistema de rádio cognitivo com sensoriamento espectral e seu uso em TVWS surge como uma possibilidade de viabilizar novas aplicações e novos serviços sem causar prejuízos às transmissões de UPs. Portanto, quaisquer avanços no estudo, no desenvolvimento e na implementação prática desses sistemas de sensoriamento são de extrema importância e ajudarão a viabilizar comercialmente a utilização desses espaços espectrais ociosos, sendo desta forma o assunto principal do presente trabalho.

1.6 PUBLICAÇÕES

As seguintes publicações foram geradas com base nos conteúdos gerados e discutidos neste projeto final de curso:

- A. A. Anjos, D. C. J. Martins, R. A. A. Souza, “*Realistic Assessment of Spectrum Sensing for TV White Space Scenarios in Brazil: Insights for System Optimization*” XLI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT 2023), Outubro 2023.

- A. A. Anjos, D. C. J. Martins, “Análise do sensoriamento espectral em um cenário realista de TVWS no Brasil”, revista *ForScience*, aceito para publicação.

1.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram abordados os assuntos relacionados à contextualização deste trabalho, que tem como foco principal o desenvolvimento de um sistema de sensoriamento espectral real visando a exploração dos TVWS, na faixa de UHF no Brasil, por meio de uma implementação prática em RDS.

CAPÍTULO 2

REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este projeto final de curso tem como foco o desenvolvimento de um sistema de sensoriamento espectral real utilizando um rádio definido por software para aplicação em cenários de TVWS no Brasil. Para que isso seja possível, é necessário levantar um referencial teórico, apresentado neste capítulo, que fornece o embasamento necessário para a execução das atividades propostas neste trabalho.

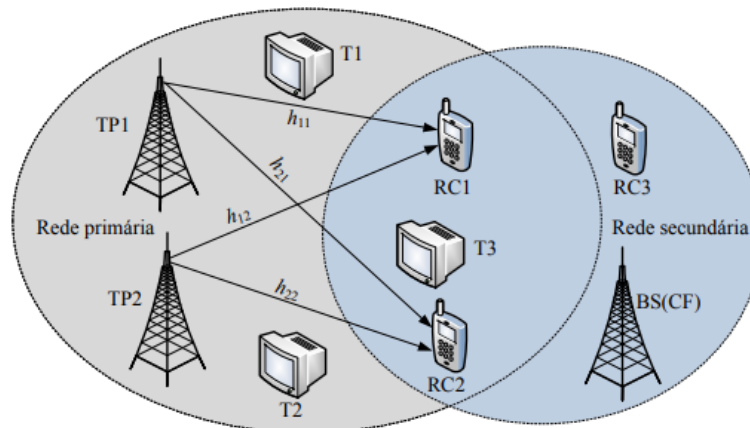
2.2 RÁDIO COGNITIVO

O Rádio Cognitivo é o dispositivo que irá viabilizar aos futuros sistemas de telecomunicações a utilização dos limitados recursos de rede de forma eficiente e flexível. Diferentemente dos rádios convencionais, um RC pode alterar seus parâmetros de operação, tais como: potência de operação, modulação, frequência de operação, dentre outros, dependendo das condições e variações do ambiente no seu entorno (19).

Dentre as características básicas de um RC estão a sua capacidade cognitiva e a sua configurabilidade (19,20). A capacidade cognitiva se refere à obtenção de informações por meio do sensoriamento do ambiente em que o RC está inserido. A partir das informações obtidas, o RC pode reconfigurar dinamicamente os seus parâmetros de transmissão, visando atingir um desempenho otimizado, característica essa conhecida como reconfigurabilidade.

Na arquitetura da rede de um RC, também denominadas de redes DSA, é importante notar a coexistência de uma rede primária e de uma rede secundária, conforme ilustrado na Figura 2.1 (21). A rede primária é composta pelos usuários primários, que detém a licença para realizar transmissões em determinado canal no espectro. A rede secundária é aquela de acesso dos rádios cognitivos, no mesmo sentido que providencia ativamente a conexão dos USs no espectro durante o período de inoperância dos UPs. A rede secundária é inteiramente equipada por equipamentos com funções cognitivas.

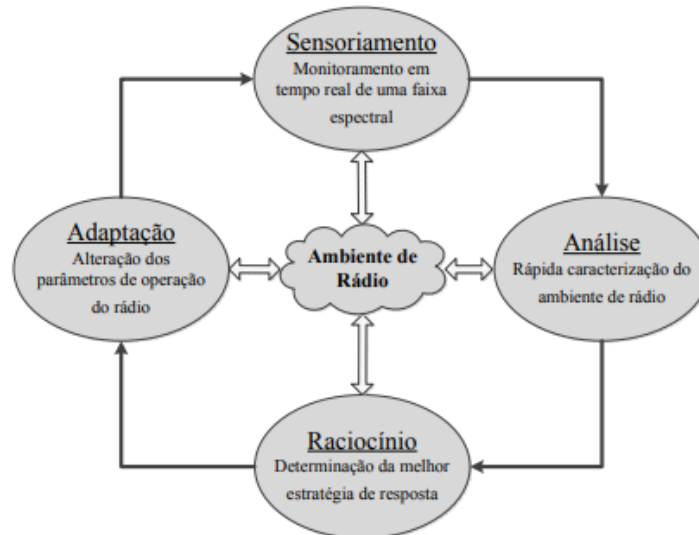
Figura 2.1 Arquitetura de rede DSA.



Fonte: (21)

O ciclo de operação típico de um RC, apresentado na Figura 2.2, consiste em realizar o monitoramento de uma determinada banda a partir de um sensoriamento do ambiente, e com as informações obtidas nessa etapa, ele deverá caracterizar o ambiente afim de determinar qual será a melhor estratégia de resposta. A partir disso poderá realizar adaptações para permitir um funcionamento mais adequado para o ambiente em que está inserido. Esse ciclo é realizado constantemente e em tempo real, já que o ambiente é dinâmico e está sujeito a ter novas transmissões ou encerrar as já existentes a qualquer momento.

Figura 2.2 Ciclo de um Rádio Cognitivo.



Fonte: (21)

2.3 SENSORIAMENTO ESPECTRAL

O sensoriamento espectral desempenha um papel muito importante para um RC, pois com ele são identificadas as oportunidades de transmissão, ou seja, quando o canal está livre (14). Sua principal aplicação é a detecção dos espaços não utilizados no espectro, que eventualmente podem ser utilizados por usuários secundários. Entretanto, é necessário que o sensoriamento seja preciso e rápido o suficiente para que um UP não sofra interferências de um US.

A fim de identificar a presença do sinal primário no espectro, têm-se duas principais categorias de detecção espectral, a não cooperativa e a cooperativa. Na detecção não cooperativa, o RC trabalha individualmente e disputa a transmissão com outros rádios que podem ter tomado a mesma decisão. A implementação de técnicas de sensoriamento não cooperativa é mais simples, no entanto sofre com a incerteza do ruído no receptor, somreamento e efeitos de desvanecimento por múltiplos percursos (22). Em situações de SNR baixa, a detecção não cooperativa pode não produzir uma detecção tão confiável e, eventualmente, pode causar interferência na transmissão do UP (23).

A detecção cooperativa é uma solução proposta para minimizar os problemas do sensoriamento espectral não cooperativo citados previamente. É uma maneira de diminuir consideravelmente as probabilidades de falha na detecção. A precisão na decisão sobre estado de ocupação do canal é melhorada quando vários USs combinam as informações obtidas no sensoriamento individual e chegam a uma decisão conjunta e confiável devido à diversidade espacial experimentada pelos RCs, que estão localizados em diferentes posições geográficas (24). O sensoriamento cooperativo pode ser dividido em centralizado, distribuído e assistido por retransmissão, conforme explicado a seguir.

- Centralizado: Possui um Centro de Fusão (CF) que recebe as amostras coletadas pelos USs, e faz um sensoriamento de espectro cooperativo de fusão de decisões centralizada, ou seja, o CF toma uma decisão global em relação a ocupação do canal através do processamento de uma estatística de teste obtida pelo processamento das amostras coletadas por todos os USs (24).

- Distribuído: Os USs trocam entre si os resultados obtidos através do sensoriamento entre si e os próprios RCs operantes tomam uma decisão em relação a ocupação do canal sensoriado (14).

- Assistido por retransmissão: essa técnica permite que a informação sensorizada pelo RC seja repassada para um RC vizinho, que a retransmitirá para o CF ou a outros RCs. Sua

utilidade está ligada ao princípio de que os rádios podem ter condições de comunicação melhores com o terminal de interesse que os outros, logo, os que possuem condições ruins podem transmitir a informação a outro RC que a enviaria para o ponto de interesse (25).

Neste trabalho, por fins de simplicidade e por limitação de recursos de hardware, o sensoriamento espectral considerado na implementação prática em RDS será o não cooperativo.

2.3.1 MODELO BÁSICO DE UM SISTEMA DE SENSORIAMENTO ESPECTRAL

O modelo consiste no levantamento de duas hipóteses que serão utilizadas para a tomada de decisão. A hipótese H_0 , que considera a ausência de sinal primário na banda sensoriada; e a H_1 , que se refere a presença do sinal de um usuário primário nessa mesma banda. As duas hipóteses podem ser descritas matematicamente através da Equação

$$y(t) = \begin{cases} n(t) & : H_0, \\ h(t)x(t) + n(t) & : H_1, \end{cases} \quad (2.1)$$

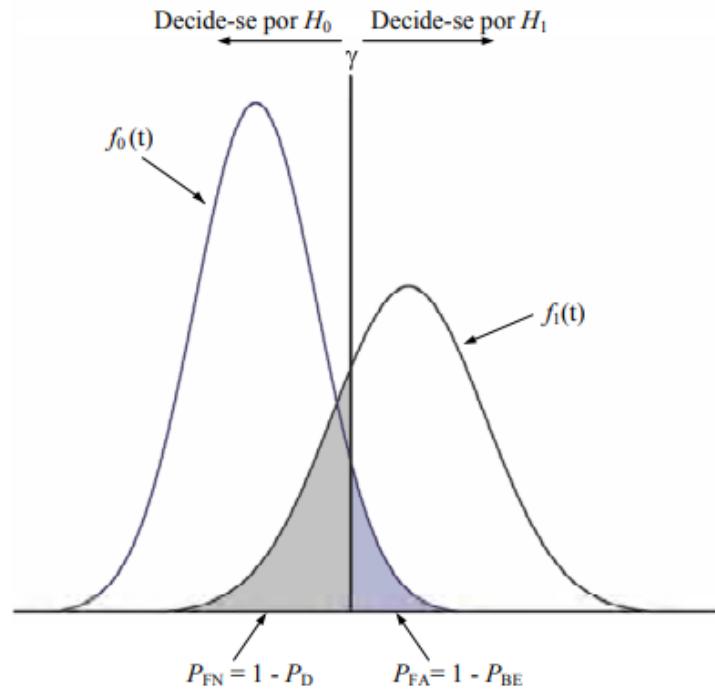
em que $y(t)$ é o sinal capturado e analisado pelo RC; $n(t)$ corresponde ao ruído térmico no receptor; $h(t)$ representa o ganho ou atenuação provocado no sinal transmitido pelo canal de comunicação e $x(t)$ é o sinal transmitido pelo UP. Ou seja, quando não houver usuário primário na banda, $y(t)$ ficará composto apenas pelo ruído, caso contrário, ficará composto pelo sinal transmitido ponderado pelo ganho do canal adicionado do ruído.

Para que o RC consiga realizar o processo de decisão sobre a ocupação espectral, é necessário a definição de um limiar de decisão, γ , e uma variável de decisão, T , gerada pelo processamento de $y(t)$ e que irá depender da técnica utilizada para o sensoriamento. Assim, se $T > \gamma$, decide-se pela ocupação espectral, caso contrário o espectro é considerado livre. Devido à natureza aleatória das amostras processadas, a variável de decisão, T , será uma variável aleatória e, sendo assim, a tomada de decisão sobre a ocupação espectral será um processo probabilístico, que pode ser caracterizado por funções densidade de probabilidade (FDPs), conforme ilustrado na Figura 2.3, em que $f_0(t)$ e $f_1(t)$ representam, respectivamente, a FDP de T sob hipótese H_0 e H_1 . A partir das duas hipóteses, e com o conhecimento das FDPs condicionadas à presença ou ausência do usuário primário na banda, define-se quatro probabilidades:

- Probabilidade de encontrar um buraco espectral, P_{BE} , sendo a probabilidade de encontrar um espaço espectral sem transmissão dado que realmente não existe um UP transmitindo na banda sensoriada.

- Probabilidade de falso alarme, P_{FA} , que é a probabilidade de ocorrer a detecção de um UP transmitindo e não haver transmissão no canal analisado.
- Probabilidade de detecção, P_D , que se refere a probabilidade de detectar a transmissão de um UP e realmente ter um UP transmitindo na banda.
- Probabilidade de falso negativo, P_{FN} , que é a probabilidade de detectar um espaço livre e haver um UP transmitindo no canal

Figura 2.3 Função densidade de probabilidade da variável aleatória T.



Fonte: (21)

Dentre as quatro probabilidades descritas acima, a P_{FA} e a P_D são as principais métricas de desempenho utilizadas no contexto de sensoriamento espectral e, desta forma, são utilizadas nos projetos de sensoriamento espectral em RCs (21). Elas podem ser calculadas matematicamente de acordo com

$$P_{FA} = \Pr(H_1|H_0) = \Pr(T > \gamma|H_0) = \int_{\gamma}^{\infty} f_0(t)dt \quad (2.2)$$

e

$$P_D = \Pr(H_1|H_1) = \Pr(T > \gamma|H_1) = \int_{\gamma}^{\infty} f_1(t)dt. \quad (2.3)$$

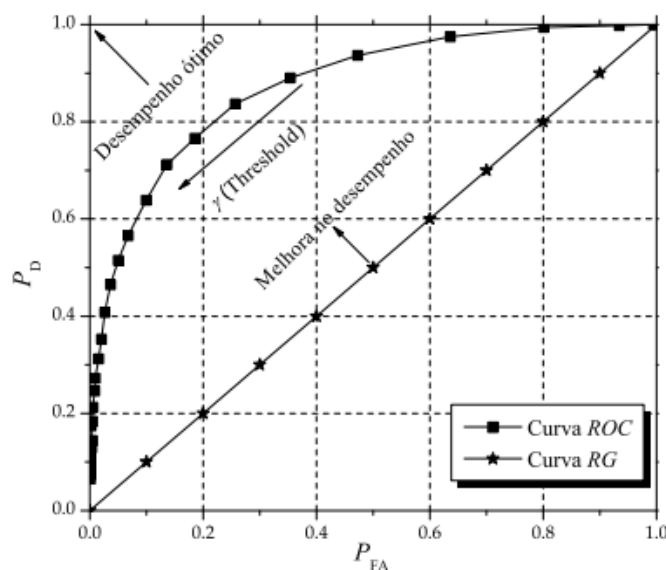
A partir dos eventos comentados anteriormente, verifica-se que um limiar de decisão ótimo, é aquele que maximize P_D e P_{BE} , e que minimize P_{FA} e P_{FN} , no entanto não é possível obter um γ que consiga isso simultaneamente. Sendo assim, na prática, o limiar de decisão é

escolhido visando atender a um determinado requisito de probabilidade de falso alarme, técnica conhecida como *Constant False Alarm Rate* (CFAR) (26).

2.3.2 CURVA ROC

A curva *Receiver Operator Characteristic Curve* (ROC), apresentada na Figura 2.4, é um gráfico comumente utilizado para ilustrar o desempenho de um sistema binário de hipóteses quando um determinado limiar é variado (21). No caso do seu uso em sensoriamento espectral, o limiar variado é o limiar de decisão γ (*Threshold*). O gráfico ROC é formado por P_D no eixo das ordenadas e P_{FA} no eixo das abscissas, com valores de probabilidade que variam de 0 a 1.

Figura 2.4 Representação de uma curva ROC.



Fonte: (21)

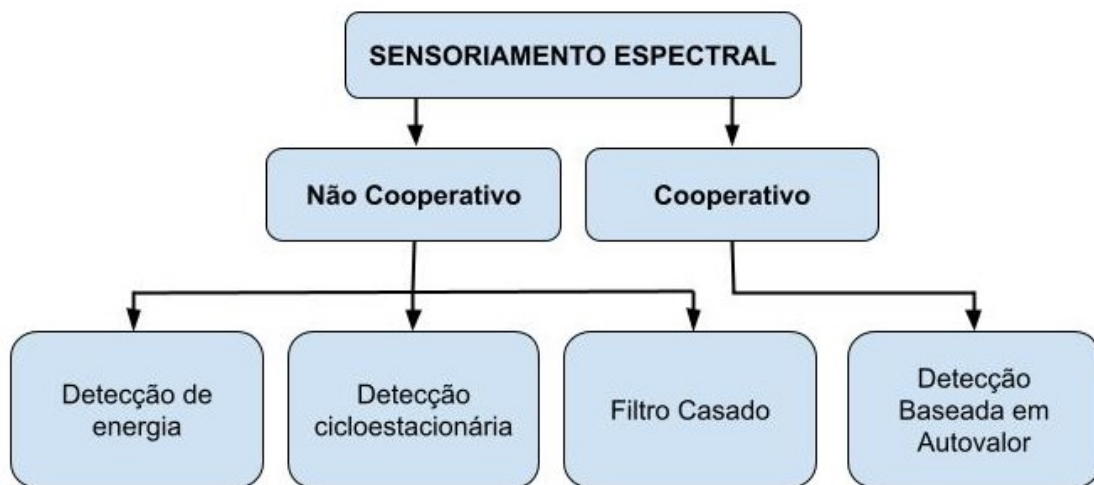
Na implementação do sensoriamento espectral em RC é desejável que se tenha uma P_D com o maior valor possível e uma P_{FA} com o menor possível. Desta forma, seria maximizada a probabilidade de se detectar um UP, quando ele realmente estivesse transmitindo e, além disso, minimizaria a probabilidade de se detectar o espectro ocupado quando não houvesse um UP na banda sensoriada.

O limiar de decisão impacta diretamente nas probabilidades P_D e P_{FA} , e quanto maior o seu valor, menor serão os valores das duas probabilidades consideradas, o que pode ser concluído pela análise da Figura 2.4. A curva *Random Guess* (RG), também presente na Figura 2.4, é uma curva de referência que considera $P_D = P_{FA}$. Sistemas com curvas localizadas acima da curva RG possuem um melhor desempenho de sensoriamento e quanto mais próximas as curvas estiverem do ponto de desempenho ótimo (0;1), melhor é o desempenho do sistema avaliado.

2.3.3 TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO ESPECTRAL

Existem diversas técnicas de sensoriamento espectral disponíveis na literatura (27), dentre elas está a técnica de detecção de energia, que será explorada em detalhes nesse referencial teórico. Outras técnicas consolidadas no contexto do sensoriamento espectral não cooperativo e cooperativo, que se encontram destacadas na Figura 2.5, são: a técnica de detecção por filtro casado (28), que consegue maximizar a SNR no momento da detecção, elevando a capacidade de detecção, porém necessita do conhecimento de todas as características do sinal sensoriado; a detecção cicloestacionária (29), que possui como sua principal vantagem a sua capacidade de distinguir os tipos de sinais detectados, podendo então diferenciar UPs e USs, no entanto sua implementação é complexa; e por último, a detecção cooperativa por autovalores (30), que pode ser utilizada sem a necessidade de ter conhecimento prévio do sinal primário transmitido, mas possui uma grande complexidade de implementação prática, visto que por se tratar de uma técnica cooperativa, exige a utilização de vários RCs além de um CF para gerenciar toda a operação.

Figura 2.5 Algumas técnicas de detecção do espectro.



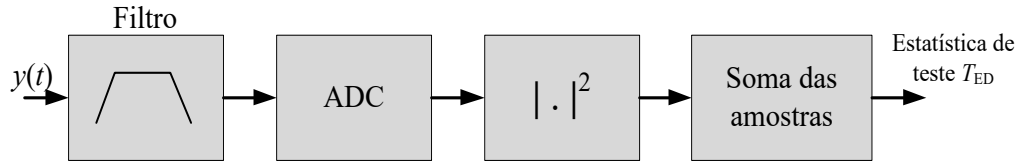
Fonte: Autora.

2.3.3.1 DETECÇÃO DE ENERGIA

A detecção de energia é a técnica de sensoriamento espectral mais difundida atualmente (31, 32, 33, 34). Isso se deve à sua baixa complexidade de implementação. Ela é considerada uma técnica ótima quando não se tem nenhum conhecimento prévio do sinal de transmissão (35). Com ela, a detecção da presença ou ausência do sinal é realizada com base no monitoramento da energia medida no canal, comparada com um limiar de decisão. Apesar de ser uma técnica de sensoriamento consolidada, hoje em dia ainda atrai muita atenção de pesquisadores ao redor do mundo (36, 37).

O modelo de detecção de energia normalmente é implementado partindo do modelo de hipóteses apresentado na seção 2.3.1. O método pode ser implementado com processamento de amostras no domínio do tempo ou da frequência (21). Na Figura 2.6 é apresentado o diagrama para implementação da técnica detecção de energia no domínio do tempo.

Figura 2.6 Detecção de energia.



Fonte: (21)

Seguindo o diagrama da Figura 2.6, inicialmente, é utilizado um filtro passa faixa centralizado na frequência do canal que será analisado. Na sequência, o sinal filtrado é convertido para baixas frequências e é digitalizado por um conversor analógico para digital (ADC) gerando amostras que passam por um dispositivo de elevação quadrática, para então ser calculada a variável estatística de decisão T_{ED} de acordo com

$$T_{ED} = \sum_{i=1}^n |y(i)|^2 \quad (2.4)$$

onde n é o número total de amostras coletadas e $y(i)$ representa a i -ésima amostra digitalizada e coletada pelo RC.

Após o cálculo de T_{ED} , é realizada uma comparação do seu valor com γ para a tomada de decisão sobre qual das duas hipóteses, H_0 ou H_1 , será considerada. Em outras palavras, é neste ponto em que se constata a presença ou a ausência de um UP transmitindo no canal sensoriado. Alguns autores argumentam que a técnica pode não operar tão bem em cenários de baixa SNR (21), entretanto, essa situação pode ser contornada aumentando-se o número de amostras coletadas para geração da estatística de decisão da Equação 2.4.

Na presença ou ausência do sinal primário, a variável de decisão possui uma distribuição qui-quadrado com n graus de liberdade (38). Considerando um número de amostras (n) suficientemente grande, e utilizando o Teorema do Limite Central, a variável em questão pode ser aproximada para uma variável aleatória Gaussiana de média e variância conforme descritas nas Equações 2.5 e 2.6, em que σ_w^2 é a variância do ruído e σ_s^2 é a variância do sinal primário.

$$T_{ED} = N(n\sigma_w^2, n\sigma_w^4) \quad \text{sob hipótese de } H_0 \quad (2.5)$$

$$T_{ED} = N(n(\sigma_s^2 + \sigma_w^2), n(\sigma_s^2 + \sigma_w^2)^2) \quad \text{sob hipótese de } H_1 \quad (2.6)$$

As probabilidades P_D e P_{FA} , ficam definidas estatisticamente de acordo com

$$\begin{aligned} P_{FA} &= \Pr(T_{ED} > \gamma | H_0), \\ P_D &= \Pr(T_{ED} > \gamma | H_1). \end{aligned} \quad (2.7)$$

Usando a aproximação de T_{ED} para uma distribuição gaussiana, apresentada nas Equações 2.5 e 2.6, as probabilidades de falso alarme e de detecção podem ser resolvidas numericamente ficando dadas respectivamente por

$$P_{FA} = Q\left(\frac{\gamma - n\sigma_w^2}{\sqrt{n\sigma_w^4}}\right) \quad (2.8)$$

e

$$P_D = Q\left(\frac{\gamma - n(\sigma_s^2 + \sigma_w^2)}{\sqrt{n(\sigma_s^2 + \sigma_w^2)^2}}\right). \quad (2.9)$$

Nas quais $Q(*)$ é a função Q, comumente utilizada para resolução de problemas envolvendo integral numérica de área em distribuições gaussianas. Analisando criteriosamente as expressões 2.8 e 2.9 pode-se concluir que, reduzindo o limiar de decisão, γ , tanto a probabilidade de detecção quanto a probabilidade de falso alarme aumentam.

Caso o canal considerado seja do tipo Rayleigh com desvanecimento lento, como é o caso abordado na parte de simulação deste trabalho, a relação sinal-ruído irá variar de forma aleatória a cada período de sensoriamento, ficando com um comportamento estatístico descrito por uma função densidade de probabilidade exponencial conforme Equação 2.10, em que δ e $\bar{\delta}$ se referem à SNR instantânea e média, respectivamente (39). Neste caso, a probabilidade de detecção média fica dada em sua forma integral pela Equação 2.11.

$$f_\delta(\delta) = \frac{1}{\bar{\delta}} e^{-\frac{\delta}{\bar{\delta}}}, \quad (2.10)$$

$$\bar{P}_D = \int_0^\infty \frac{1}{\bar{\delta}} e^{-\frac{\delta}{\bar{\delta}}} Q\left(\frac{\gamma - n(\bar{\delta} + 1)}{\sqrt{n(\bar{\delta} + 1)^2}}\right) d\delta. \quad (2.11)$$

Para a definição do limiar a ser utilizado é proposto um valor constante de falso alarme, que pode ser calculado isolando-se γ na Equação 2.8, ficando dado por

$$\gamma = \sigma_w^2 (Q^{-1}(P_{FA})\sqrt{n} + n). \quad (2.12)$$

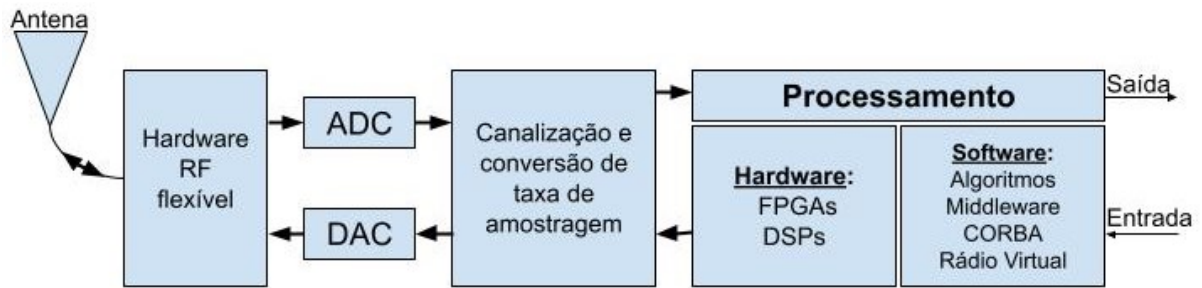
A técnica de detecção de energia no domínio do tempo será o enfoque principal do trabalho, já que ela possui uma menor complexidade de implementação, e apesar de não ter os melhores desempenhos de P_D e P_{FA} em cenários de baixa relação sinal-ruído, é uma técnica que não precisa de informações à priori do sinal sensoriado. Sendo assim, ela já é suficiente para a realização de um projeto de sensoriamento prático em TVWS, que por si só já envolve inúmeros desafios. Com o sistema de sensoriamento real em operação, obviamente que, em pesquisas futuras, outras técnicas poderão ser testadas.

2.4 RÁDIO DEFINIDO POR SOFTWARE

O Rádio Definido por Software (RDS) é um dispositivo de comunicação que utiliza software no processamento dos dados realizados pela camada física, diferentemente de outros rádios convencionais que utilizam hardware (40). Dito isto, o RDS é um equipamento altamente programável e flexível podendo suportar uma ampla variedade de aplicações sem necessitar de um hardware específico. Os sistemas de RDS são complexos já que é um dispositivo que executa várias tarefas simultaneamente, sendo assim, ao planejar um sistema é necessário observar as limitações computacionais do dispositivo, pois se ele não conseguir suportar as operações computacionais realizadas a implementação não funcionará corretamente, gerando erros na transmissão e um baixo desempenho na comunicação.

Na implementação das arquiteturas de processamento, são utilizados diferentes tipos de sistemas, incluindo os microprocessadores de uso geral, *Digital Signal Processor* (DSP), *Field-Programmable Gate Array* (FPGA) e *Graphics Processing Unit* (GPU). O diagrama de blocos da Figura 2.7 apresenta a arquitetura básica de um RDS, que possui uma parte de radiofrequência (RF) que utiliza amplificador de baixo ruído para elevar o nível do sinal recebido, que é transladado para uma Frequência Intermediária (FI) com o auxílio de misturadores (*mixer*) e de osciladores configuráveis. O sinal em FI analógico é então digitalizado por um ADC (conversor Analógico/Digital), quando trabalha-se no modo de recepção, ou passa por um DAC (conversor Digital/Analógico) quando a operação é de transmissão. Todo processamento digital de sinais em banda base dos sistemas de comunicação digital implementados com RDS é realizado por software em um processador.

Figura 2.7 Diagrama de blocos de um RDS.



Fonte: Autora.

Em comparação com um rádio convencional, as principais vantagens do RDS residem em sua flexibilidade, visto que suas funcionalidades são implementadas em software, permitindo a fácil alteração e atualização dos algoritmos. Além disso, possui a capacidade de otimizar o uso do espectro de rádio disponível por meio de técnicas de transmissão de largura de banda e modulação adaptáveis, bem como de aproveitar o processamento digital de sinais para mitigar problemas como interferência e desvanecimento. Adicionalmente, apresenta uma boa relação custo-benefício, já que um RDS pode suportar diversos modos e padrões de comunicação utilizando uma única plataforma de hardware, contribuindo, assim, inclusive, para a redução do lixo eletrônico.

Por outro lado, como desvantagem, é importante ressaltar a maior complexidade em suas configurações para garantir a operação correta. Devido à sua natureza flexível, diversos parâmetros precisam ser configurados, como a frequência do oscilador local, frequência de amostragem, fatores de decimação ou interpolação dos filtros, nível de potência, dentre outros.

2.4.1 USRP N210

O rádio utilizado na implementação prática do trabalho é o USRP N210 da fabricante Ettus, o qual possui suporte para *Linux*, *Mac OSX* e *Windows*. O rádio é altamente flexível e programável, possui o maior desempenho em termos de potência de hardware da classe USRP permitindo aos engenheiros implementar sistemas de rádios poderosos e flexíveis, ou seja, é ideal para aplicações que exigem um alto desempenho de RF e largura de banda como prototipagem da camada física, *Dynamic Spectrum Access* e rádio cognitivo (41). A Tabela 2.1 apresenta as principais especificações do rádio utilizado.

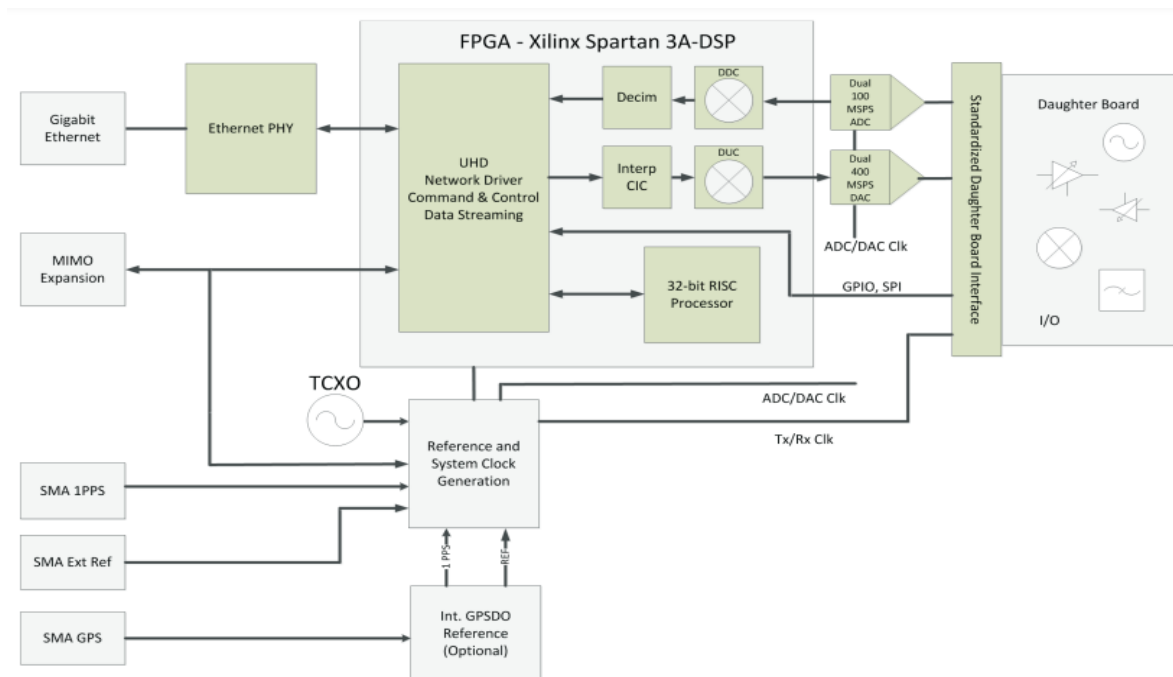
Tabela 2.1 Especificações técnicas do Rádio utilizado.

ALIMENTAÇÃO	
Tensão de Entrada	6V
Consumo de corrente	1.3A
Consumo da Placa-Filha WBX	2.3A
CLOCKS E PERFORMANCE DE CONVERSÃO	
Taxa de amostragem do ADC	100 MS/s
Resolução do ADC	14 bits
ADC SFDR	88 dBc
Taxa de amostragem do DAC	400 MS/s
Resolução do DAC	16 bits
DAC SFDR	80 dBc
Host Sample Rate (8b/16b)	50/25 MS/s
Precisão de frequência	25 ppm
Com referência de GPSDO	0.01 ppm

Fonte: (41)

O diagrama de blocos apresentado na Figura 2.8, mostra a arquitetura do rádio USRP N210 com suas entradas, saídas e blocos funcionais. A comunicação com o dispositivo se dá por meio de uma interface Gigabit Ethernet e é por essa interface, também, que são transmitidas e recebidas as amostras digitalizadas do sinal de RF processadas em software.

Figura 2.8 Diagrama de blocos do Rádio USRP N210.

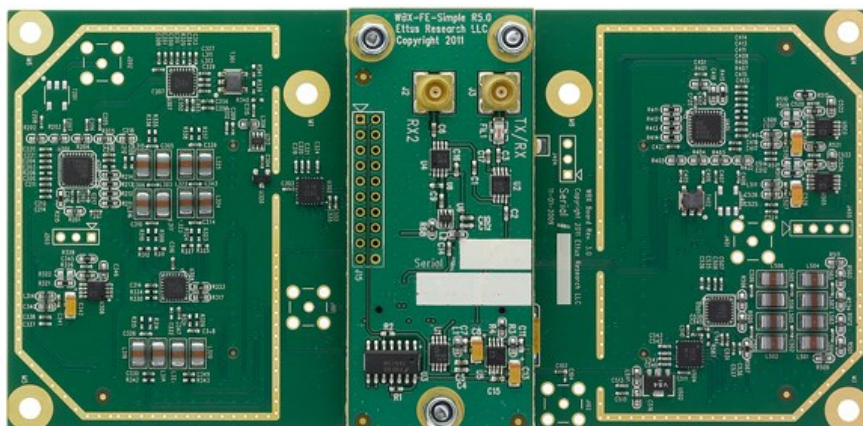


Fonte: (41)

O sistema é dotado de um FPGA – Xilinx Spartan 3A, onde é implementada toda parte de controle do rádio, além das etapas de interpolação e decimação por meio de filtros digitais. O rádio USRP N210 trabalha em conjunto com uma placa filha, que é conectada ao dispositivo e contém toda parte analógica de RF do sistema.

A placa filha utilizada neste trabalho é a WBX, mostrada na Figura 2.9, que basicamente é um transceptor que fornece até 100mW de potência de saída e possui figura de ruído de 5dB. A placa em questão foi projetada para oferecer um bom desempenho em termos de sensibilidade de recepção (-130 dBm), além de oferecer uma largura de banda de até 40 MHz na faixa de 50 MHz a 2.2 GHz, tornando-a adequada para várias aplicações que requerem captura e transmissão de sinais. Alguns exemplos de áreas de aplicação incluem comunicações móveis, marítimas e aéreas, rádios multibandas PCS e GSM, radares, 4G, TV Digital e sensoriamento espectral em *White Spaces*.

Figura 2.9 Placa Filha WBX.



Fonte: (41)

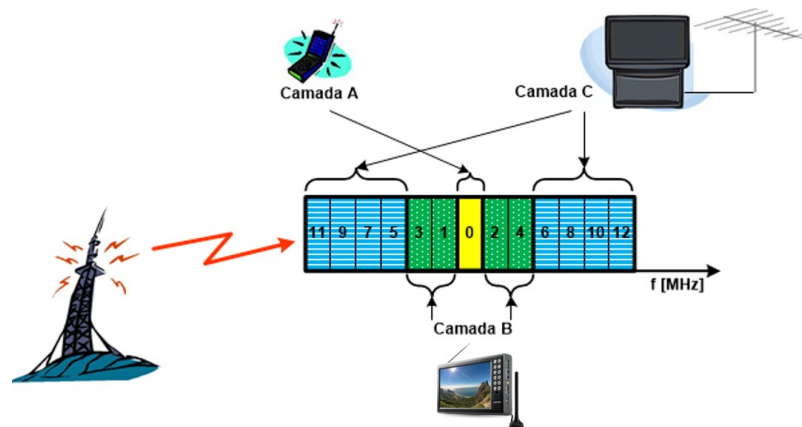
2.5 SINAL DE USUÁRIO PRIMÁRIO EM CENÁRIO DE TVWS NO BRASIL (ISDB-TB)

Com o objetivo de entender as características dos sinais dos UPs nas bandas de TVWS no Brasil, visando a sua futura implementação no sensoriamento espectral, torna-se indispensável o entendimento do sistema de transmissão de TV digital brasileiro.

O padrão de TV digital adotado no Brasil é denominado de *Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial Brazilian* (ISDB-TB). Ele é um padrão de transmissão digital muito flexível, em termos de possíveis configurações, se comparado a outros padrões de TV digital adotados ao redor do mundo (42,43). Desta forma, pode-se atender aos requisitos dos mais distintos tipos de serviço, tanto em cenários de recepção móvel quanto em cenários de recepção fixa. Ele permite a transmissão em 3 modos de operação distintos (1, 2 e 3), que se diferem pela

quantidade de portadoras utilizadas na formação do símbolo de transmissão OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) (2048, 4096 e 8192). O sistema em questão trabalha com processamento hierárquico, no qual a banda de transmissão de 6 MHz é subdividida em 14 segmentos, sendo que 1 é utilizado para banda de guarda entre canais adjacentes e os outros 13 segmentos (úteis) podem ser distribuídos para até 3 camadas hierárquicas distintas (A, B e C). Cada camada hierárquica pode ser configurada com parâmetros de transmissão distintos, tais como a taxa do código corretor de erro, modulação e a profundidade de entrelaçamento da etapa da codificação de canal. A Figura 2.10, ilustra uma das possíveis configurações de divisão dos 13 segmentos espectrais para 3 camadas hierárquicas no padrão ISDB-TB (44). Neste caso, cada camada pode ser configurada para atender os requisitos do serviço que está sendo transmitido.

Figura 2.10 Exemplo de distribuição da banda em segmentos.



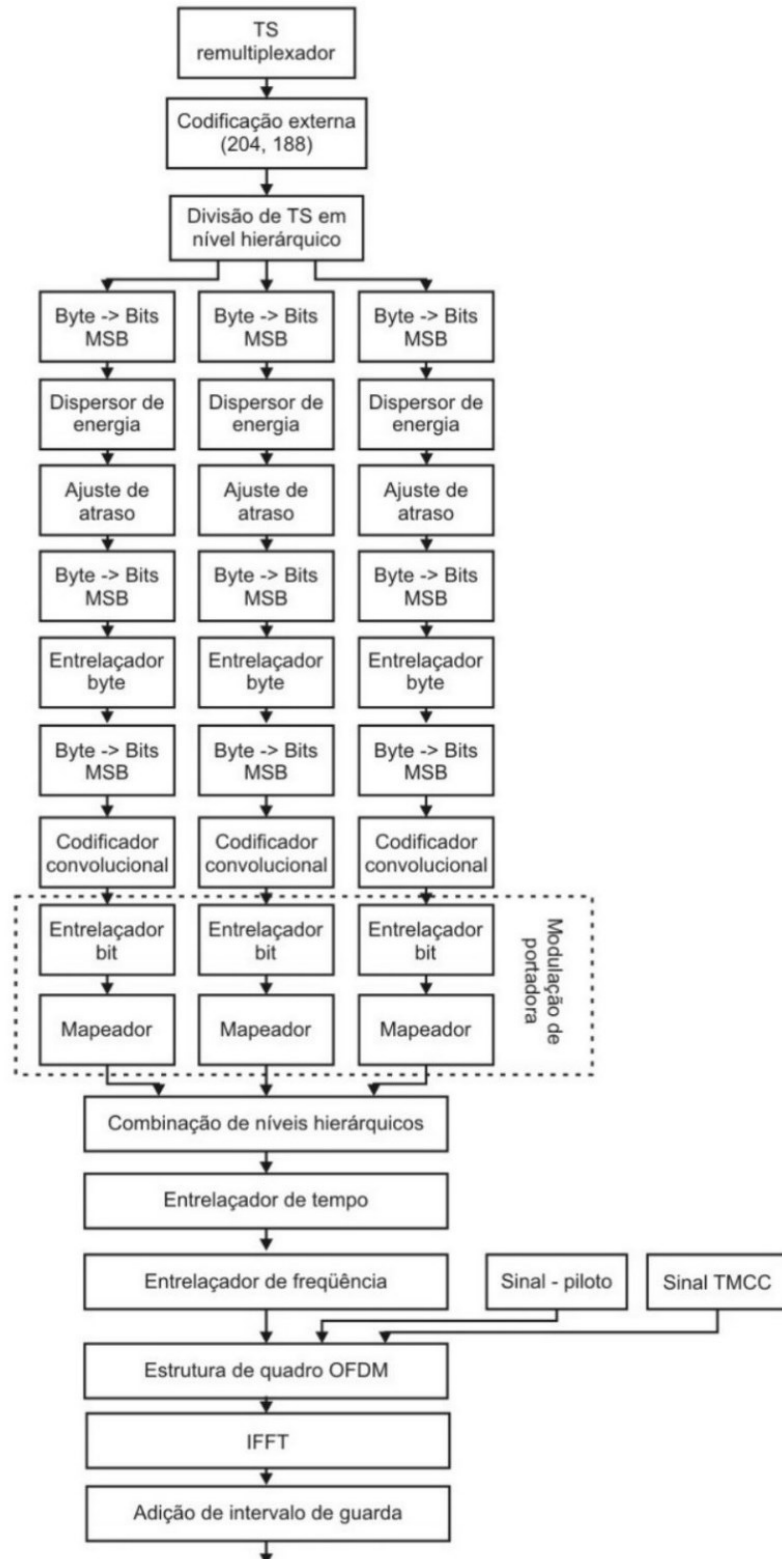
Fonte: (44)

Em uma visão geral, o padrão ISDB-TB é formado principalmente por codificador, multiplexador, modulador e amplificador, conforme a norma ABNT NBR 15601 (45), que especifica o sistema de TV brasileiro. Na etapa de codificação é recebido os sinais de vídeo, áudio e dados para realizar uma compressão, do tipo MPEG-4 no padrão brasileiro, pois é inconveniente, em termos de taxa, transmitir diretamente os sinais de uma determinada programação que, originalmente, podem ter taxas de centenas de Mbps até Gbps. Ainda na codificação, as informações são organizadas em um fluxo de pacotes de tamanho fixo, 188 bytes, chamado de *Transport Stream*, TS, que pode transportar vídeo, áudio, e informações adicionais sobre o fluxo.

O diagrama de blocos da Figura 2.11, apresenta a estrutura simplificada do sistema de transmissão de TV digital brasileiro. Primeiramente, o TS é convertido em um fluxo denominado de BTS (*Broadcast Transport Stream*) que possui a inserção de 8 bytes de informação, os quais indicam em qual camada o pacote será transmitido e 8 bytes de paridade

para proteger o pacote, totalizando novos 16 bytes, ficando a partir deste momento com 204 bytes.

Figura 2.11 Diagrama de blocos do padrão ISDB-TB.



Fonte: (45)

O BTS possui uma taxa fixa de 32,5 Mbps, necessária para garantir que o quadro de multiplexação e o quadro OFDM possuam a mesma duração. O quadro de multiplexação define o número de pacotes que serão transmitidos em um quadro OFDM, o que irá variar de acordo com o modo e com o intervalo de guarda utilizado na transmissão, conforme apresentado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 Número de pacotes transmitidos dentro de um quadro.

Número de TSP transmitido dentro de um quadro multiplex				
Modo	Taxa do intervalo de guarda 1/8	Taxa do intervalo de guarda 1/8	Taxa do intervalo de guarda 1/8	Taxa do intervalo de guarda 1/8
Modo 1	1 280	1 152	1 088	1 056
Modo 2	2 560	2 304	2 176	2 112
Modo3	5 120	4 608	4 352	4 224

Fonte: (44)

Seguindo o diagrama da Figura 2.11, encontra-se a codificação externa e o divisor de TS, em que o pacote recebido é codificado por um codificador do tipo *Reed Solomon* (204,188) e já é encaminhado para camada hierárquica correta, onde passará por um processamento independente e paralelo daquele realizado pelas demais. Na sequência, o pacote recebido passará por um dispersor de energia, que tem a função de embaralhar a informação a ser transmitida. Posteriormente, um ajuste de atraso é executado, de forma que o atraso final em todas as camadas hierárquicas seja o mesmo. Mais adiante, os bytes passarão por um entrelaçador de bytes, com objetivo de potencializar o desempenho do código corretor de erro *Reed Solomon*, evitando que erros em rajada ultrapassem a sua capacidade de correção, que é de 8 bytes por pacote.

Após o entrelaçamento de byte, é realizada a codificação convolucional, que nada mais é que um código corretor de erro que opera à nível de bit, inserindo redundâncias para dar mais robustez ao fluxo que está sendo transmitido. Esse codificador tem uma taxa de código configurável, podendo assumir as taxas 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 e 7/8. Quanto maior a taxa de codificação convolucional, menos robusto ficará o sistema contra eventuais erros de bit, entretanto, o aumento dessa taxa impactará em uma maior capacidade de transmissão.

Seguindo o diagrama da Figura 2.11, os bits codificados passarão por um entrelaçador de bits e serão agrupados conforme o número de bits/símbolo da modulação utilizada e, posteriormente, são direcionados ao mapeador, que realizará o mapeamento dos bits em símbolos, de acordo com a modulação configurada na camada em questão. O sistema de TV

digital brasileiro permite os tipos de modulação DQPSK e QPSK com 2 bits/símbolo, 16-QAM com 4 bits/símbolo e 64-QAM com 6 bits/símbolo. Quanto maior a ordem da modulação, maior é a taxa útil de transmissão, entretanto, maior também será a taxa de erro de bit na recepção para uma mesma potência de transmissão (46).

Os símbolos mapeados de cada camada são organizados no combinador hierárquico em seus respectivos segmentos e quanto mais segmentos forem destinados para uma determinada camada, maior será o número de portadoras utilizadas e, conseqüentemente, maior será a taxa útil da camada em questão. A quantidade de portadoras por segmento e por símbolo OFDM de acordo com o modo de transmissão configurado é apresentada na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 Quantidade de portadoras por modo de operação.

Modo de operação	Portadoras de dados/Seg OFDM	Portadoras de dados/Símbolo OFDM	Portadoras ativas/Símbolo OFDM	Portadoras totais/Símbolo OFDM
1	96	1 248	1 405	2 048
2	192	2 496	2 809	4 096
3	384	4 992	5 617	8 192

Fonte: (44)

O entrelaçador no domínio do tempo embaralha os símbolos das portadoras, inserindo símbolos de atraso conforme tabelas disponibilizadas na norma ABNT 15601 (45), o objetivo dessa etapa é aumentar a robustez contra desvanecimentos no tempo. Já o entrelaçamento das portadoras na frequência proporcionará robustez contra seletividade em frequência, que é muito comum em cenários de propagação com múltiplos percursos (47).

Na sequência, os símbolos de dados, piloto e TMCC (*Transmission and Multiplexing Configuration Control*), são organizados em uma estrutura de quadro OFDM. As portadoras piloto transportam informações importantes para a recuperação do sinal, que serão utilizadas na aquisição de sincronismo e na estimação do canal na recepção. As portadoras TMCC carregam os parâmetros de configuração do sistema de transmissão, como modo de operação, intervalo de guarda, número de segmentos por camada, modulação, taxa do código interno e profundidade do entrelaçador temporal, possuindo no modo 1, uma portadora por segmento; no modo 2, duas por segmento e no 3 quatro por segmento. A modulação para transmissão dessas informações de controle é obrigatoriamente DBPSK, devido à maior robustez dessa modulação.

Aproximando-se das etapas finais de processamento, os símbolos (dados, pilotos e TMCCs), organizados na estrutura de segmentos e de quadro OFDM, são paralelizados para multiplexação por divisão de frequências ortogonais, implementada pelo bloco IFFT. A cada

bloco de símbolos em paralelo de entrada da IFFT gera-se um símbolo OFDM útil no domínio do tempo (em banda-base) contendo N_c amostras (2048, 4096, 8192 – dependendo do modo de operação) com frequência de amostragem de 8,127 MHz. O símbolo OFDM em questão contém todos os símbolos (dados, pilotos e TMCCs) multiplexados em frequência em uma banda de aproximadamente 6 MHz.

Finalmente, o último bloco do transmissor de TV digital ISDB-TB irá adicionar o intervalo de guarda, que corresponde a uma cópia de uma fração do final do próprio símbolo OFDM em seu início. No ISDB-TB, o intervalo de guarda pode ser configurado como 1/2, 1/8, 1/16 e 1/32, essa fração implica diretamente na taxa de transmissão útil e na proteção do sinal contra múltiplos percursos (44), em que quanto menor o intervalo de guarda, maior será a sua taxa útil e menor será sua proteção. O sinal de transmissão gerado em banda base tem uma banda útil de exatamente 5,57 MHz.

Após todo o processamento, o sinal OFDM de transmissão $s(t)$ é convertido para a frequência do canal da emissora, podendo ser representado matematicamente de acordo com

$$s(t) = \text{Re}\{e^{j2\pi f_c t} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{K-1} c(n, k) \Psi(n, k, t)\}, \quad 2.13$$

$$\Psi(n, k, t) = \begin{cases} e^{j2\pi \frac{k-K_c}{T_u}(t-T_g-nT_s)} & nT_s \leq t < (n+1)T_s \\ 0 & t < nT_s, (n+1)T_s \leq t \end{cases}, \quad 2.14$$

em que, k é o índice da portadora, que é sucessivo para toda a banda, com o número 0 atribuído a portadora 0 do segmento 11; n é o número do símbolo; K representa as portadoras totais do modo; 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; f_c é o centro da frequência do sinal de RF; K_c é o número da portadora correspondente ao centro da frequência de RF e $c(n, k)$ é o símbolo serial complexo correspondente ao símbolo OFDM de índice n e portadora índice k ;

Com o conhecimento teórico do sinal de transmissão do padrão ISDB-TB será possível implementar em simulação o sinal do UP em conformidade com aquele que será encontrado em um ambiente real de sensoriamento espectral nas bandas de TVWS.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de uma implementação prática, em RDS, de um sistema de sensoriamento espectral para rádios cognitivos, visando o uso oportunista do espectro em cenários de *TV White Space* no Brasil. Para isso, uma metodologia baseada em estudos teóricos, seguido de implementação em simulação e, posteriormente, implementação prática foi utilizada.

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento de um sistema de sensoriamento espectral para atuar nas bandas de *TV White Space*, inicialmente, realizou-se um estudo teórico em artigos, livros, dissertações, normas e teses sobre os assuntos mais relevantes para viabilizar a implementação. Começando com o estudo de conceitos básicos sobre Rádio cognitivos e passando pelo Sensoriamento Espectral, com foco na técnica de detecção de energia, utilizada na implementação final e nas simulações. Por fim, foi realizado um estudo sobre as principais características dos sinais de TV do padrão ISDB-TB, já que o projeto utiliza as bandas de TVWS no Brasil.

Após o estudo teórico, as simulações de sensoriamento espectral aplicadas em TVWS foram desenvolvidas no software MATLAB. Para tal, inicialmente foi gerado em simulação um sinal OFDM em conformidade com o padrão ISDB-TB, que é encontrado nas transmissões das emissoras de TV no Brasil, possuindo nesse caso as mesmas especificações, como duração, banda de transmissão, taxa de bits, intervalos de guarda, taxa de codificação, dentre outros. Na sequência, as simulações referentes ao sensoriamento espectral foram construídas tendo como sinal de usuário primário aquele sinal OFDM gerado previamente. Por meio das simulações foi possível verificar os impactos de vários parâmetros do sistema de sensoriamento espectral nas métricas de medição de desempenho típicas para esse tipo de aplicação, tais como probabilidade de detecção, de falso alarme e curvas ROC. As simulações de sensoriamento foram baseadas em modelos de referência, disponibilizados na literatura por outros autores, de forma a facilitar o entendimento e implementação.

Nas etapas finais do trabalho, foi realizada a implementação prática do sensoriamento espectral em Rádio Definido por Software, onde foi necessária a utilização de dois hardwares RDS, um para atuar como transmissor de um sinal de TV real e outro para atuar como RC, realizando o sensoriamento e detectando a ocupação da banda sensoriada. A fim de cumprir os objetivos, a princípio foi realizado um estudo teórico sobre o RDS utilizado no projeto, o USRP N210 da Ettus, focando nas formas de sua utilização como UP e RC. Ao final da implementação, foi obtido um sistema de sensoriamento espectral operando em tempo real e detectando os canais livres nas bandas de TV em UHV. Além disso, comparou-se o desempenho do sistema real com aqueles teóricos e/ou simulados.

3.3 RECURSOS NECESSÁRIOS

Para cumprir os objetivos propostos no trabalho foram necessários alguns recursos, sendo eles:

- Softwares MATLAB e GNU Radio utilizados para realizar as simulações e a implementação prática de sensoriamento espectral;
- Dois computadores, para simulações e para comunicação com os RDSs;
- Dois Rádios Definidos por Software do tipo USRP N210 da fabricante Ettus, para implementação prática do sensoriamento espectral em TVWS;
- Um analisador de espectro para medições finais do trabalho.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES DAS SIMULAÇÕES

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são apresentadas as simulações realizadas para viabilizar a implementação em MATLAB de um sistema de sensoriamento espectral em cenário de TVWS utilizando os Rádios Definidos por Software, bem como os resultados obtidos com a sua utilização.

4.2 SIMULANDO UM SINAL DE USUÁRIO PRIMÁRIO

Antes de iniciar o desenvolvimento das simulações de sensoriamento espectral com foco no uso de TVWS, foi implementado em MATLAB um sinal OFDM em conformidade com as características de um típico sinal do padrão ISDB-TB, de acordo com a teoria apresentada na seção 2.5. A Tabela 4.1 apresenta os parâmetros utilizados nessa implementação do sinal OFDM, que posteriormente será incorporado nas simulações de sensoriamento espectral.

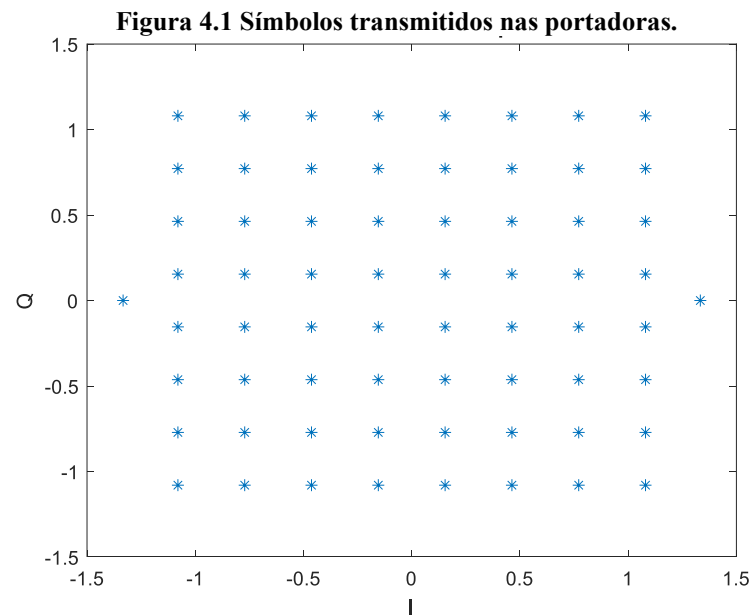
Tabela 4.1 Parâmetros utilizados na implementação do sinal OFDM de TV Digital.

Modo de operação	3 (8192 portadoras totais)
Intervalo de Guarda	$1/32$
Número de Segmentos da Camada A	13
Ordem da Modulação da Camada A	64-QAM
Taxa de Codificação da Camada A	$7/8$
Modulação dos Símbolos de Controle (Pilotos e TMCC)	BPSK / DBPSK
Banda Útil	5,57 MHz

Fonte: Autora.

Para geração do sinal OFDM no modo em questão, inicialmente, gera-se aleatoriamente um vetor contendo 5617 símbolos complexos organizados em uma estrutura de quadro OFDM, contendo em posições pré-definidas pela norma do padrão ISDB-TB os símbolos de dados (64

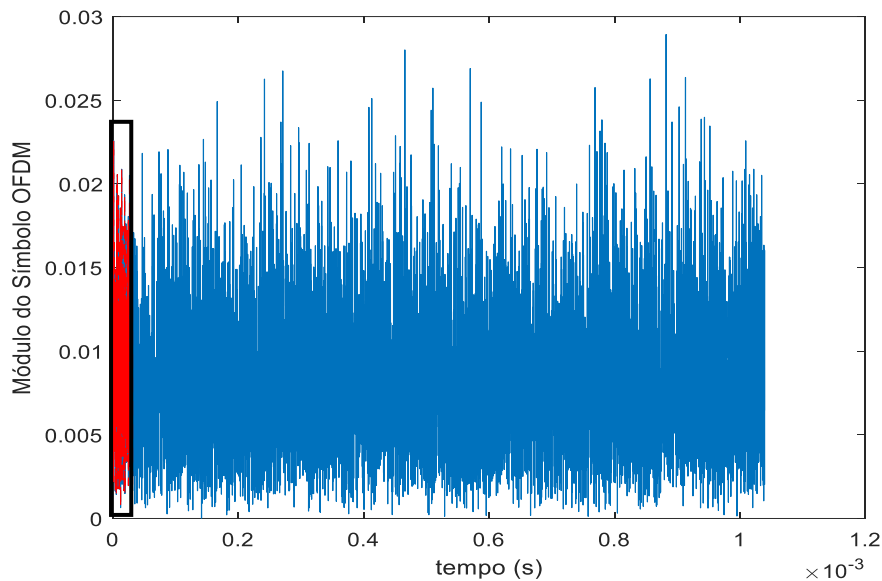
QAM), símbolos Pilotos (BPSK) e os símbolos TMCC (DBPSK), que posteriormente irão modular cada portadora ativa do sistema. A Figura 4.1 ilustra a constelação de transmissão dos símbolos das portadoras ativas do sistema, na qual Q representa a parte imaginária e I a parte real de cada símbolo. Em seguida, o vetor de símbolos na estrutura de quadro é paralelizado para multiplexação por divisão de frequências ortogonais, o que é feito por meio da operação matemática IFFT, gerando um sinal complexo no domínio do tempo contendo 8192 amostras (modo 3) na frequência da IFFT, representando o símbolo OFDM útil.



Fonte: Autora.

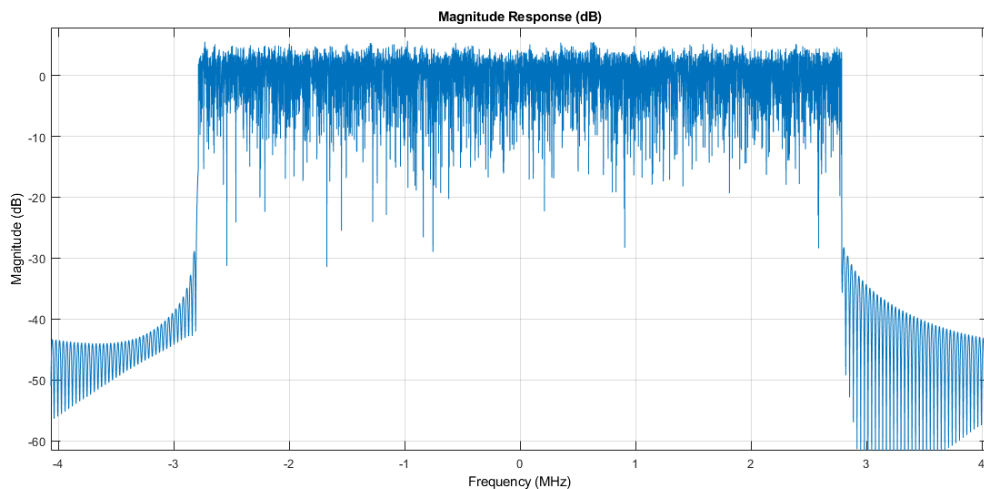
Por fim, o intervalo de guarda de $1/32$ é adicionado ao início do símbolo OFDM. A Figura 4.2 apresenta o módulo do sinal OFDM que foi produzido no tempo, com destaque ao intervalo de guarda. É importante enfatizar que o símbolo OFDM em questão possui 5617 símbolos complexos multiplexados em frequência. Conforme previsto, e segundo a teoria apresentada na seção 2.5, o sinal gerado possui uma banda útil de 5,57 MHz, conforme pode ser verificado na Figura 4.3, em que é apresentada a resposta em frequência do sinal OFDM gerado. Nota-se que todo o sinal gerado está confinado dentro da banda de -3 MHz a 3 MHz, com uma pequena banda de guarda nas extremidades.

Figura 4.2 Módulo do sinal OFDM gerado no MATLAB.



Fonte: Autora.

Figura 4.3 Espectro do sinal OFDM gerado no MATLAB.



Fonte: Autora.

Vale ressaltar que a configuração escolhida para geração do sinal OFDM é aquela que permite a máxima taxa de transmissão do sistema ISDB-TB, que é de 23,2 Mbps e permite a transmissão de vídeos com qualidade FULL HD. A conversão do sinal OFDM para a frequência de canal não foi contemplada na simulação, pois em uma implementação prática de sensoriamento espectral, a primeira etapa de processamento é exatamente a conversão desses sinais da frequência de canal para banda base.

O sinal OFDM produzido em banda base será utilizado nas simulações de sensoriamento espectral para emular o sinal de possíveis usuários primários que possam utilizar as bandas destinadas para TVWS.

4.3 SIMULAÇÃO DO SENSORIAMENTO ESPECTRAL

Com o objetivo de avaliar o desempenho do sensoriamento espectral em um cenário realista de TVWS uma simulação no software MATLAB foi desenvolvida e construída baseando-se na teoria apresentada na seção 2.3 e os seus códigos fonte estão disponíveis para download em (48). Na simulação em questão o sinal de transmissão do UP, $x(t)$, considerado é aquele apresentado na seção 4.2; o ganho do canal, $h(t)$, é gerado por amostras aleatórias com distribuição Rayleigh de variância unitária (simula ausência de visada direta entre o transmissor primário e o RC) e o ruído considerado é o AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) com média zero e variância unitária. A técnica de sensoriamento utilizada nas simulações foi a detecção de energia, vista em detalhes na seção 2.3.3.1. Sendo assim, a variável de decisão T , utilizada para definir a ocupação espectral, é calculada conforme apresentado na Equação 2.4.

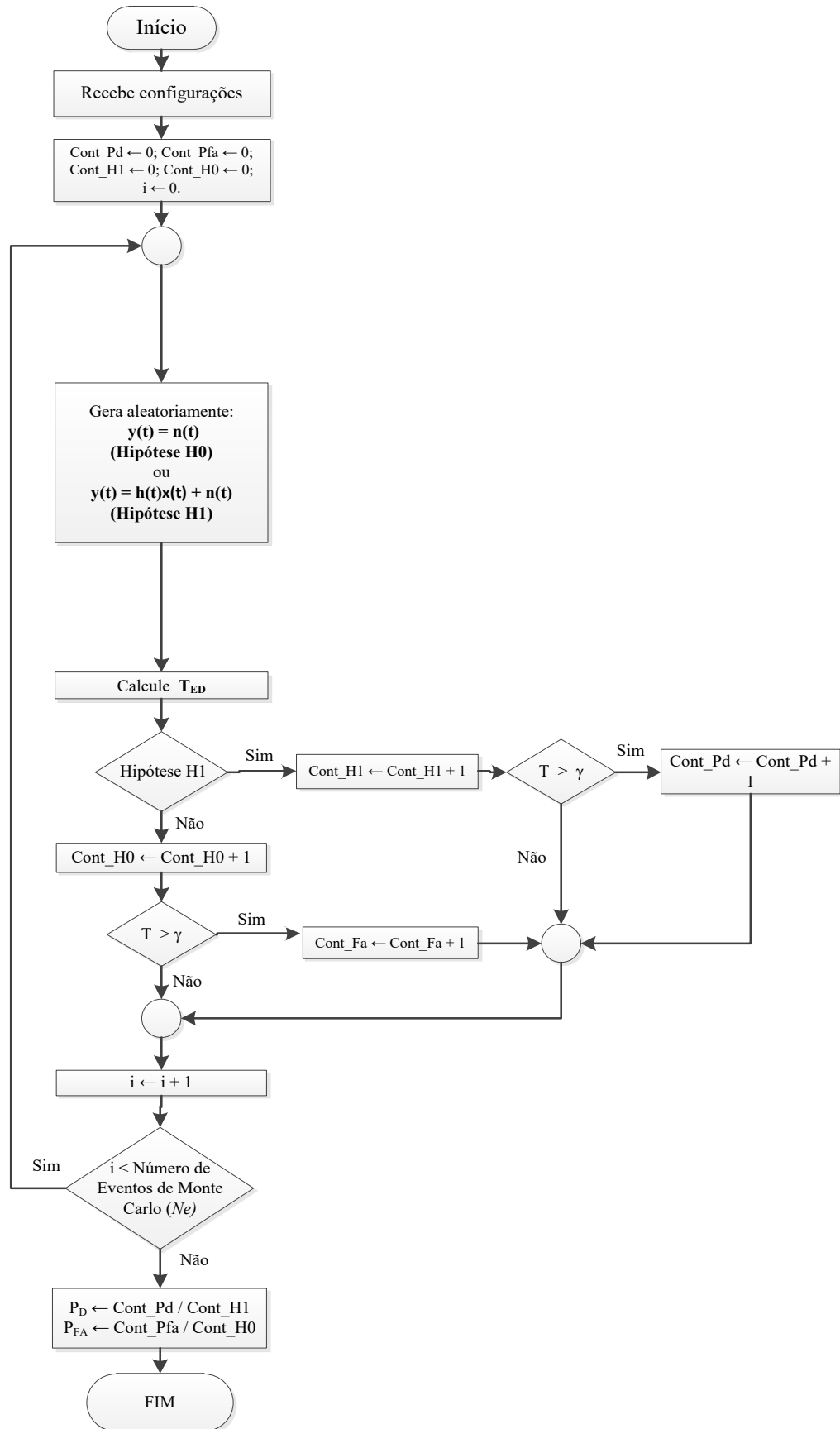
Conforme verificado na teoria apresentada na seção 2.3, as principais métricas de avaliação do desempenho do sensoriamento espectral giram em torno das probabilidades de detecção e falso alarme. Sendo assim, a estimação desses importantes parâmetros, será realizada utilizando o método de Monte Carlo (49), em que massivos experimentos aleatórios sob hipótese H_0 e H_1 serão realizados para determinação das probabilidades em questão.

A simulação desenvolvida possui como principais parâmetros de entrada o número de RCs (m), número de amostras coletadas por cada RC (n), número de transmissores primários (p), relação sinal-ruído, o limiar de decisão e o número de eventos de Monte Carlo (N_e) da simulação. O fluxograma apresentado na Figura 4.4 apresenta como as probabilidades de detecção e de falso alarme podem ser obtidas via simulação para cada ponto de análise.

Para levantamento do desempenho do sensoriamento espectral a simulação será executada de duas formas distintas: (i) com SNR fixa e limiar de decisão variável, viabilizando a geração da curva ROC, da curva de P_D e P_{FA} em função do limiar e de histogramas com possíveis valores da variável de decisão T sob hipótese H_0 e H_1 ; e (ii) com limiar fixo e uma SNR variável, gerando curvas de desempenho de P_D e P_{FA} em função da SNR.

O desempenho do sensoriamento espectral em cenário de TVWS será avaliado em diversas situações, variando parâmetros como a relação sinal-ruído, o número de amostras coletadas por um rádio cognitivo e o limiar de decisão, visando o entendimento de como esses parâmetros afetam o sensoriamento espectral.

Figura 4.4 Fluxograma de obtenção de P_D e P_{FA} .



Fonte: Autora.

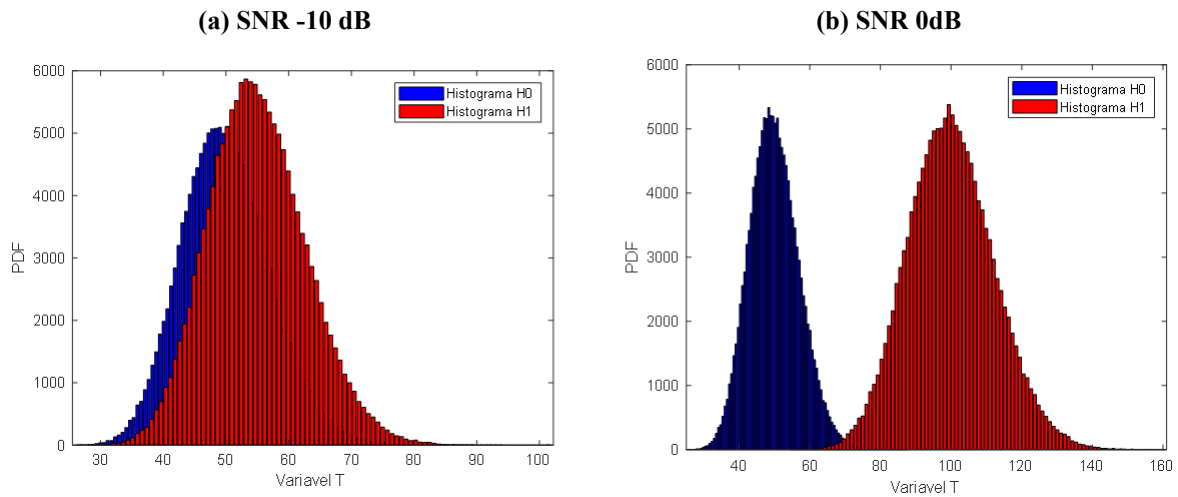
4.4 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Nessa seção são apresentados os resultados de desempenho do sensoriamento espectral para vários cenários de análise. Todas as curvas de desempenho apresentadas nessa seção foram obtidas pela simulação desenvolvida no software MATLAB considerando 15000 eventos de Monte Carlo.

4.4.1 INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO SINAL-RUÍDO NA DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DA VARIÁVEL DE DECISÃO T_{ED}

Visando avaliar a influência na distribuição da variável de decisão, uma simulação foi executada com as seguintes configurações: $p = 1$, $m = 1$, $n = 50$, SNR = -10 dB (a) e SNR = 0 dB (b). Os histogramas da variável de decisão obtidos via simulação estão apresentados na Figura 4.5.

Figura 4.5 Histogramas.



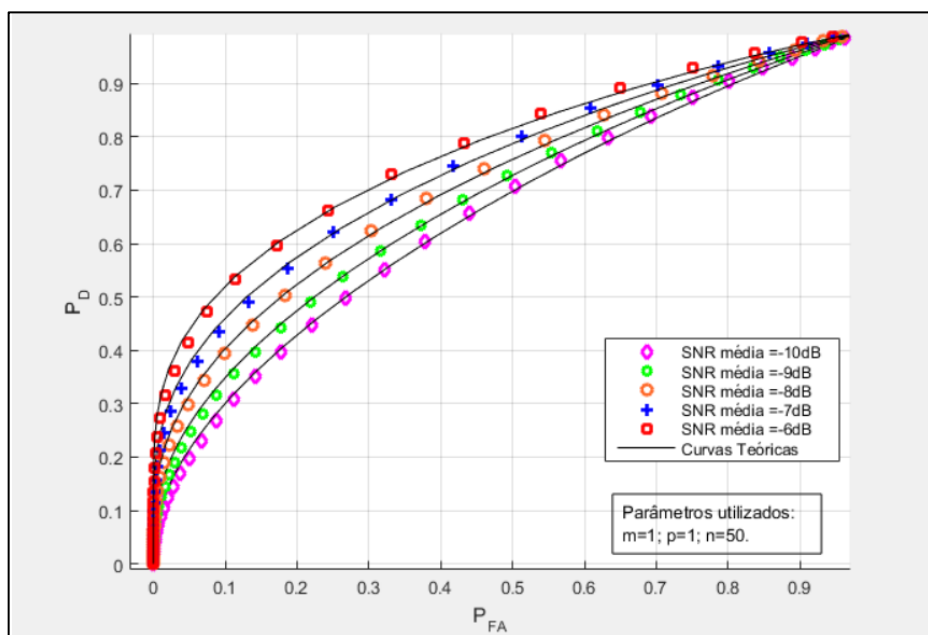
Fonte: Autora.

Analisando o resultado apresentado na Figura 4.5, para ambos os casos de SNR, verifica-se que de fato a distribuição da variável de decisão T_{ED} é gaussiana, tanto sob hipótese H_0 quanto sob hipótese H_1 , com médias e variâncias de acordo com a Equação 2.5 e 2.6, respectivamente, confirmando que a simulação está em conformidade com a teoria. Como conclusão, verifica-se que quando temos ruído AWGN à medida que a SNR é aumentada, a média da variável de decisão T_{ED} sob hipótese H_1 também aumenta, aumentando a probabilidade de detecção para um limiar γ fixo.

4.4.2 INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO SINAL-RUÍDO NO DESEMPENHO DO SENSORIAMENTO EM TVWS

Com o objetivo de verificar como diferentes valores de SNR afetam o desempenho do sistema de sensoriamento, a simulação foi executada com os seguintes parâmetros: $p = 1$, $m = 1$, $n = 50$ e SNR média = -10, -9, -8, -7 e -6 dB. O desempenho obtido, em termos de curvas ROC (50) para cada valor de SNR considerado, está apresentado na Figura 4.6, na qual também são apresentadas as curvas teóricas de desempenho obtidas por meio das Equações (2.8) e (2.11) deste trabalho.

Figura 4.6 Curva de desempenho comparando diferentes valores de SNR.



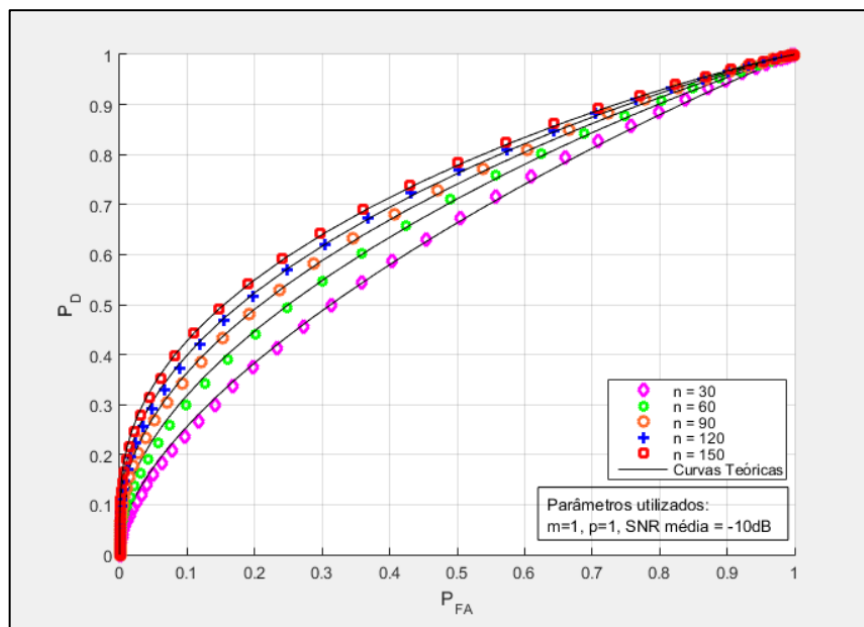
Fonte: Autora.

Analisando as curvas na Figura 4.6, é possível verificar que o pior desempenho é obtido quando se considera SNR = -10 dB. Realizando uma comparação curva a curva, nota-se uma melhora significativa no desempenho quando a SNR é de -6 dB e, como esperado, conclui-se que o aumento de SNR faz com que as curvas tendam para ponto ótimo, provando que a SNR é um dos fatores importantes no desempenho do sistema. Valores maiores de SNR fazem com que a detecção efetiva do sinal de UP seja melhorada ou, em outras palavras, tem-se um aumento de P_D , conforme apresentado teoricamente na Equação 2.11. Outro ponto de destaque na figura é que o desempenho do sistema simulado (marcas coloridas) tem uma grande aderência com o desempenho obtido via expressões teóricas (curvas contínuas na cor preta), corroborando a coerência das simulações desenvolvidas.

4.4.3 INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE AMOSTRAS COLETADAS PELO RC NO DESEMPENHO DO SENSORIAMENTO ESPECTRAL EM TVWS

A fim de avaliar o impacto no sistema de sensoriamento espectral causado pelo número de amostras, n , coletadas pelo RC, uma nova simulação foi executada considerando a seguinte parametrização: $p=1$, $m=1$, SNR média = -10 e $n=30, 60, 90, 120$ e 150 . O resultado simulado e teórico está apresentado na Figura 4.7, onde observa-se que o número de amostras coletadas por um RC é um outro fator importante para viabilizar a melhora no desempenho do sensoriamento, mostrando que um número maior de amostras resulta em uma curva ROC mais próxima do ponto ótimo. Isso ocorre, pois, tem-se mais informações sobre a banda sensoriada, logo, é possível decidir com mais confiabilidade se existe um UP transmitindo naquele momento. Por essa análise fica claro que, em um cenário real de sensoriamento, o número de amostras coletadas por um RC deve ser suficientemente grande para que as probabilidades de detecção e de falso alarme fiquem dentro das margens toleradas pelo sistema de sensoriamento desenvolvido. Aqui, mais uma vez, é importante destacar o fato de as curvas de desempenho teóricas e simuladas possuírem grande concordância.

Figura 4.7 Curvas de desempenho comparando diferentes quantidades de amostras coletadas.



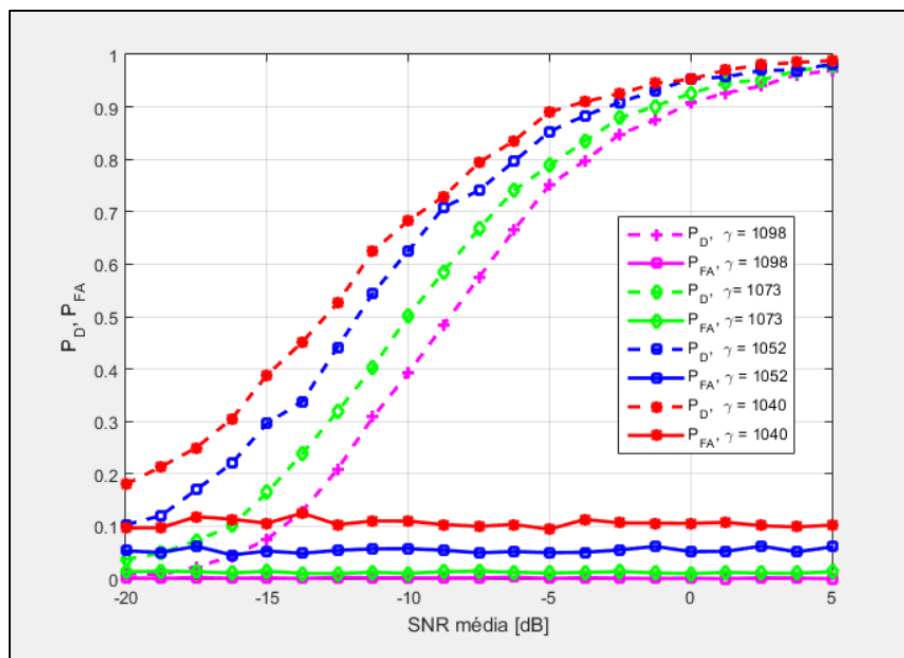
Fonte: Autora.

4.4.4 AVALIANDO A PROBABILIDADE DE DETECÇÃO EM FUNÇÃO DE UMA P_{FA} ALVO

Em um projeto de sensoriamento espectral com detecção de energia prático, o limiar de decisão, utilizado para comparação com a variável de decisão, é calculado de acordo com a

Equação 2.12, considerando uma probabilidade de falso alarme a ser tolerada pelo sistema. Para avaliar o comportamento da P_D considerando uma P_{FA} fixa e vários valores de SNR, uma nova simulação de sensoriamento foi realizada utilizando a seguinte configuração: $p = 1$, $m = 1$, $n = 1000$, SNR média variando de -20 até 0 dB; $\gamma = 1098$ ($P_{FA} = 0.1\%$) $\gamma = 1073$ ($P_{FA} = 1\%$), $\gamma = 1052$ ($P_{FA} = 5\%$) e $\gamma = 1040$ ($P_{FA} = 10\%$). Os limiares utilizados na simulação foram calculados com base na Equação 2.12. O resultado obtido é apresentado na Figura 4.8, onde é possível observar que a probabilidade de falso alarme obtida foi muito próxima da que se esperava para cada caso de limiar, mostrando mais uma vez que a simulação está condizente com a parte teórica do estudo.

Figura 4.8 Curvas de desempenho para valores de P_{FA} fixos.



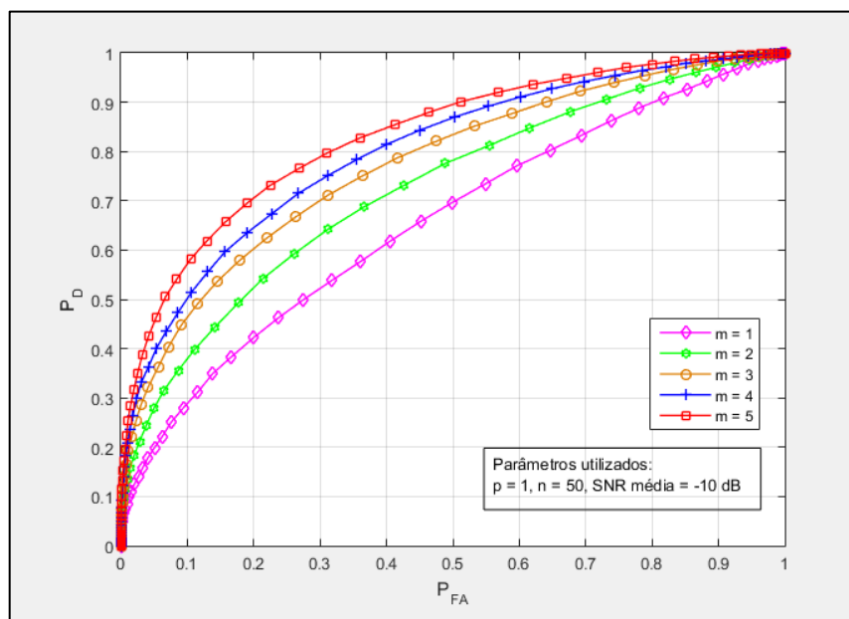
Fonte: Autora.

Na Figura 4.8, é possível perceber, também, que à medida em que se tolera a utilização do sistema com uma probabilidade de falso alarme maior, aumenta-se a chance de se detectar um usuário primário na banda sensoriada. Outra observação relevante sobre a Figura 4.8 é que, mesmo utilizando um número elevado de amostras, $n = 1000$, para valores de SNR média menor que 0 dB, nenhuma das curvas avaliadas se aproxima de uma probabilidade de detecção de 100%, o que só acontece para valores próximos de 5 dB. Isso indica que em um ambiente mais realista de sensoriamento, no qual o RC pode se encontrar em regiões de sombra ou condições severas de desvanecimento, o número de amostras coletadas deveria ser ainda maior que aquele utilizado nessa análise. Caso esse aumento de amostras não seja viável, técnicas mais robustas ou de sensoriamento cooperativo devem ser levadas em consideração.

4.4.5 INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE RCs NO DESEMPENHO DO SENSORIAMENTO ESPECTRAL EM TVWS

A última análise de desempenho realizada neste trabalho considera um cenário cooperativo de sensoriamento, no qual cada rádio RC da rede cooperativa coleta n amostras e as envia para um centro de fusão (CF), onde a estatística de teste é calculada considerando as amostras coletadas por todos os rádios. Para tal, a simulação realizada considerou os seguintes parâmetros: $p = 1$, $n = 50$, SNR média = -10 dB e $m = 1, 2, 3, 4$ e 5 . O resultado da simulação é apresentado na Figura 4.9. Vale destacar que para essa simulação cooperativa, o gerenciamento de um canal de controle para comunicação entre o CF e os RCs da rede cognitiva não foi contemplado. Além disso, considerou-se que todas as amostras capturadas e transmitidas, por cada RC, para o centro de fusão chegam ao destino sem sofrer qualquer degradação, ou seja, nenhum erro nessa transferência de amostras foi considerado.

Figura 4.9 Curvas de desempenho comparando quantidades diferentes de RC.

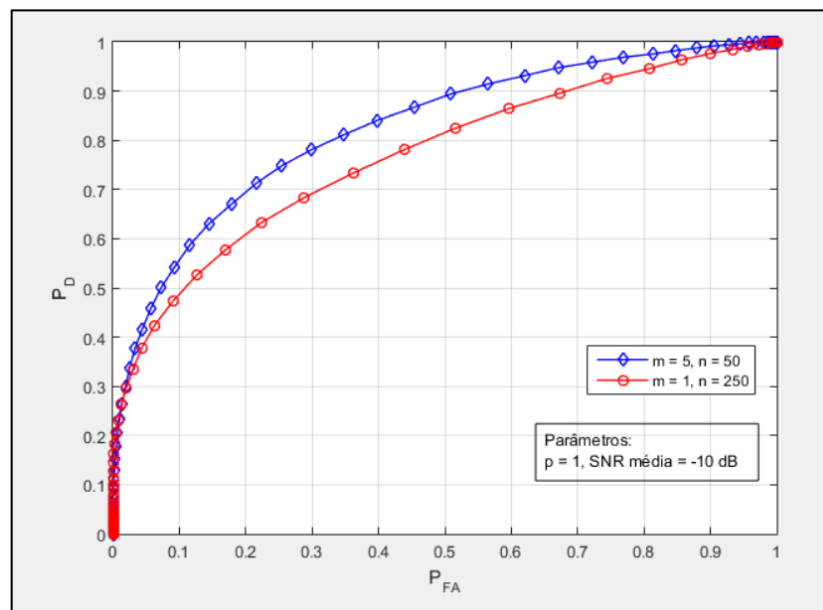


Fonte: Autora.

Analisando as curvas da Figura 4.9 é possível concluir que quanto mais rádios coletam amostras, melhor é o sensoriamento espectral realizado. O impacto positivo no desempenho é causado pelo aumento do número de amostras coletadas total, visto que haveria uma quantidade de amostras processadas proporcional à quantidade de rádios enviando dados para um CF e, além disso, as amostras coletadas por cada RC estariam descorrelacionadas espacialmente, reduzindo a incerteza das informações a respeito do canal analisado. Neste ponto, é necessário esclarecer que, apesar da SNR média da simulação ter sido considerada de -10 dB, a SNR de cada RC, para um determinado sensoriamento realizado, será uma variável aleatória com

distribuição exponencial, conforme descrito na seção 2.3, uma vez que se considera um canal do tipo Rayleigh, no qual não há uma visada direta entre o transmissor primário e os RCs. Caso a SNR de todos os RCs da rede cooperativa fossem idênticas, um sistema cooperativo com m RCs coletando n amostras cada (totalizando $m \times n$ amostras processadas) teria o mesmo desempenho de um sistema não cooperativo, que utilizasse um único RC coletando $m \times n$ amostras. O que não acontece na prática, pois como os RCs estão em posições geográficas distintas, haverá um ganho de desempenho por diversidade espacial, visto que cada um deles estaria submetido a um desvanecimento aleatório diferente, mesmo que estivessem a distâncias similares do transmissor primário. Para comprovar o que foi dito anteriormente, na Figura 4.10 é apresentado o gráfico de desempenho de um sistema cooperativo (parâmetros: $p = 1$, $m = 5$, $n = 50$, SNR média = -10 dB) e de um sistema não cooperativo ($p = 1$, $m = 1$, $n = 250$, SNR média = -10 dB), ambos processando um total de 250 amostras. Verificando assim que o desempenho do sistema cooperativo supera o do não cooperativo para um mesmo número de amostras processadas, evidenciando o ganho provocado pela diversidade espacial dos RCs. Obviamente que a implementação prática desse tipo sensoriamento cooperativo é bem mais complexa que a do tipo não cooperativo, visto que necessitaria de vários RCs e de um centro de fusão, que teria que se comunicar com todos os RCs da rede, além de gerenciar a alocação espectral dos espaços livres encontrados.

Figura 4.10 Comparação de desempenho de um sistema cooperativo com um sistema não cooperativo, ambos processando o mesmo número de amostras para a tomada de decisão.



Fonte: Autora.

4.4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As simulações e resultados apresentados neste capítulo são utilizados como referência para implementação prática do sensoriamento espectral em RDS apresentada no capítulo 5.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES DO SISTEMA DE SENSORIAMENTO REAL

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

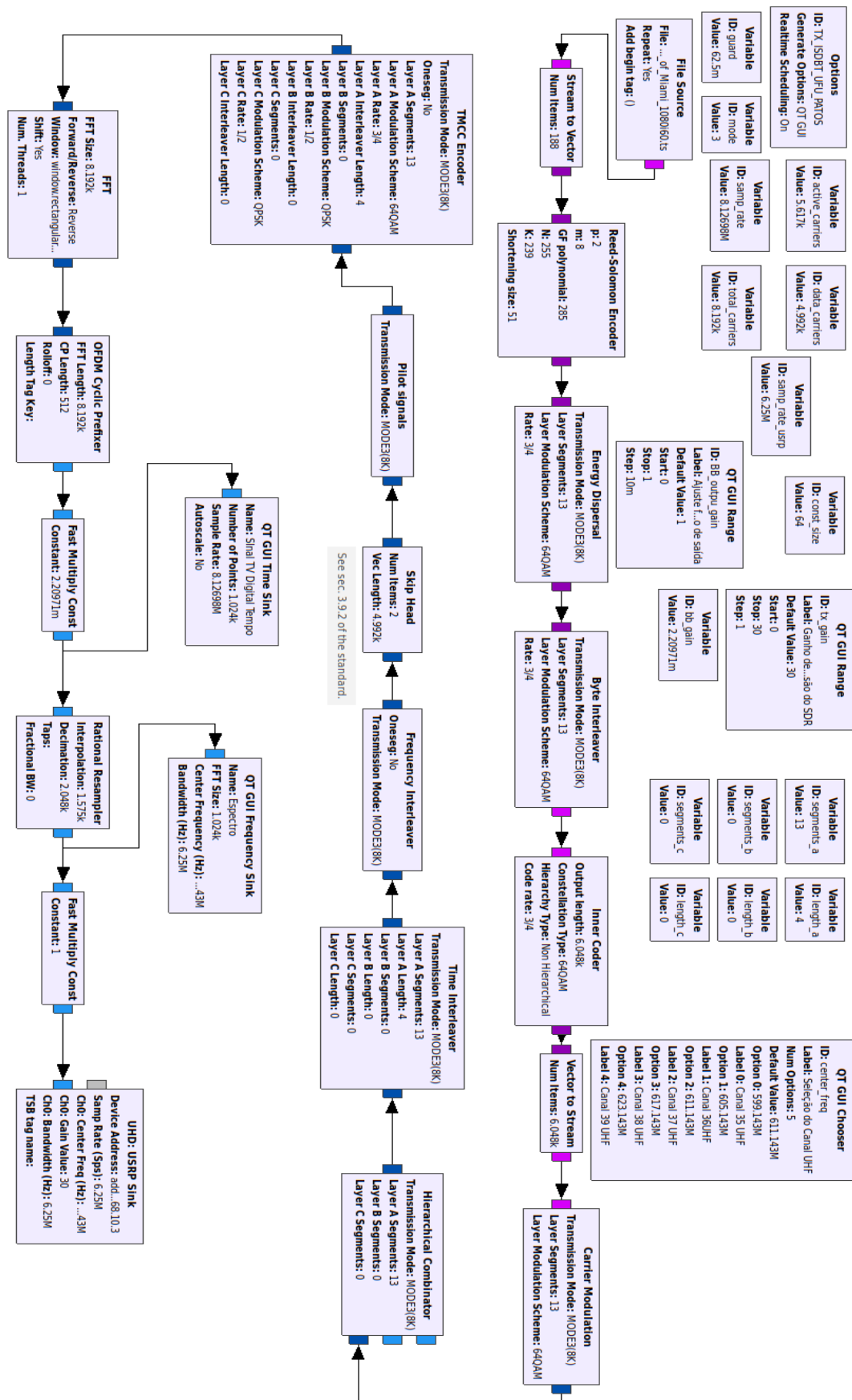
Neste capítulo são apresentadas as implementações práticas necessárias para a construção de um sistema de sensoriamento espectral de tempo real em TVWS utilizando rádios definidos por software.

5.2 GERANDO UM SINAL DE USUÁRIO PRIMÁRIO EM RDS

Uma etapa necessária para a avaliação do sistema de sensoriamento espectral em ambiente laboratorial é a geração do sinal de usuário primário. No trabalho é explorado o uso de TVWS, logo o sinal implementado é um sinal OFDM de acordo com a teoria apresentada na seção 2.5, que está em conformidade com a norma ABNT 15601 do padrão ISDB-TB. O sinal em questão foi implementado no software GNU Radio 3.7, utilizando como base um projeto disponibilizado no repositório GitHub, no link (<https://github.com/git-artes/gr-isdbt>) (51). O software é gratuito e fornece em forma de fluxograma as ferramentas necessárias para a criação de sistemas de comunicação digital para operação em rádios definidos por software.

O diagrama da Figura 5.1 apresenta o projeto do GNU Radio utilizado para a geração do sinal de transmissão do padrão ISDB-TB, adaptado para operação no RDS USRP N210. O projeto recebe em sua entrada um TS, que é processado por diversos blocos até a geração de um sinal OFDM com as mesmas características utilizadas em simulação e apresentadas na Tabela 4.1. Analisando o diagrama é possível constatar que o fluxo de processamento é bem similar àquele teórico apresentado na Figura 2.11.

Figura 5.1 Sinal gerado no software GNU Radio.



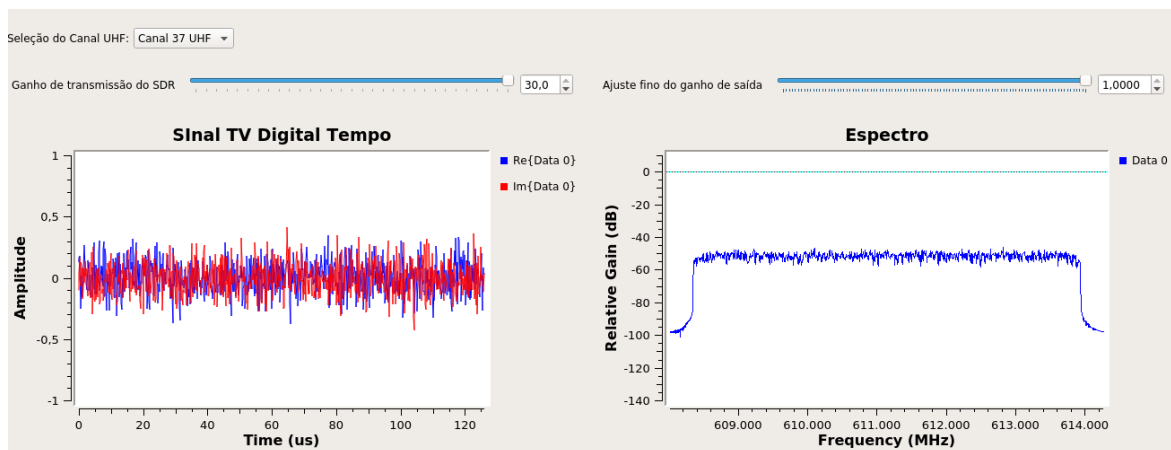
Fonte: (51)

Para viabilizar a operação do sistema no RDS USRP N210, foi necessário realizar algumas modificações no projeto original. Uma delas incluiu a implementação de interpolação fracionária para alterar a frequência de amostragem do sinal OFDM de saída. Inicialmente, o sinal operava em 8,12 MHz e foi adaptado para uma frequência de 6,25 MHz, adequada para a operação no hardware USRP utilizado. Essa adaptação foi necessária devido à uma restrição do SDR, que só é capaz de gerar frequências de amostragem múltiplas do *clock* da placa, cujo valor é de 100 MHz. Além disso, outra modificação significativa no projeto foi a sua adequação para a transmissão do sinal de TV digital nos canais UHF (35 ao 39) de forma configurável.

A interface gráfica, apresentada na Figura 5.2, foi desenvolvida para configurar o sistema de transmissão e monitorar o comportamento do sinal OFDM. Através dela, é possível ajustar o canal UHF para a transmissão e controlar os ganhos no sinal de saída. Além disso, a interface exibe gráficos em tempo real do sinal OFDM tanto no domínio do tempo quanto na frequência.

O sinal gerado pelo GNU Radio, em conformidade com a norma do padrão ISDB-TB, transmitido em tempo real por um rádio USRP N210 será utilizado na avaliação do sistema de sensoriamento espectral implementado.

Figura 5.2 Interface gráfica criada no projeto do GNU RADIO.



Fonte: Autora.

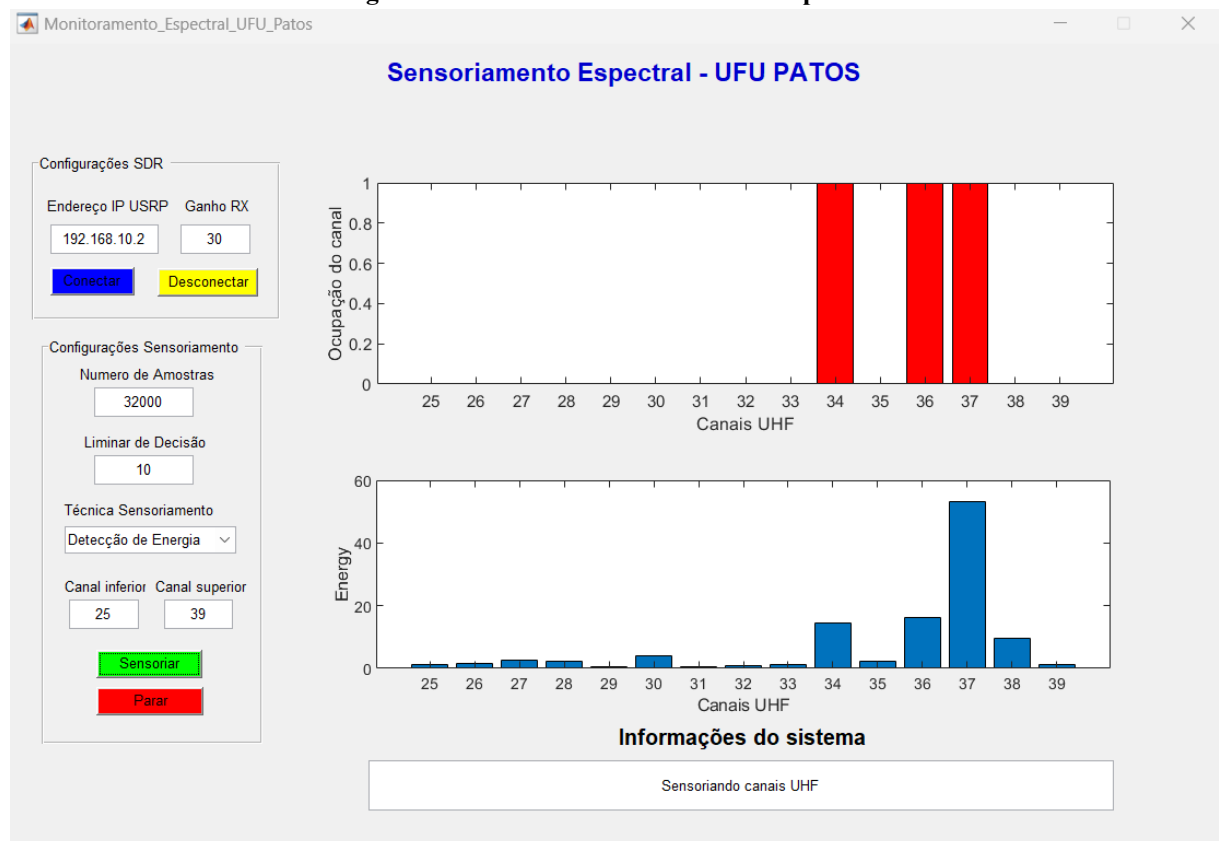
5.3 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE SENSORIAMENTO ESPECTRAL UTILIZANDO RDS E MATLAB

Com o objetivo de implementar o sistema de sensoriamento espectral em tempo real, foi utilizado um notebook, com o software MATLAB, conectado via interface Gigabit Ethernet com o RDS USRP N210. A plataforma de sensoriamento espectral desenvolvida está disponível

para download em (52), com o código fonte principal denominado “Monitoramento_Espectral_UFU_Patos.m”. Para que o software se comunique com o rádio é necessário a instalação do *ToolBox Communications Toolbox Support Package for USRP Radio*, que pode ser obtida através do site (<https://www.mathworks.com/help/supportpkg/usrpradio/>).

A Figura 5.3 apresenta a interface gráfica do sistema de sensoriamento, que inclui vários parâmetros de configuração. Para operação do sistema em tempo real, inicialmente, deve-se configurar, no campo de configurações do RDS, o endereço IP do rádio USRP a ser utilizado como o RC. Em seguida, é inserido o ganho do *front-end* de recepção, que possui um valor *default* de 30 dB para permitir uma maior sensibilidade no momento de detectar o sinal dos canais sensoriados. Após estas configurações, deve-se pressionar o botão azul “Conectar” para abrir comunicação com o RDS. Se a conexão tiver sido realizada com sucesso, a mensagem “Rádio conectado” aparecerá no campo de informações do sistema. Para desconectar basta pressionar o botão amarelo “Desconectar”.

Figura 5.3 Interface de sensoriamento espectral.



Fonte: Autora.

Na sequência, devem ser configurados na aba “Configurações do Sensoriamento” o número de amostras coletadas para o cálculo da variável de decisão T_{ED} (*default* 32000); o limiar de decisão (*default* 10); a técnica de sensoriamento, que será a detecção de energia; e a faixa de canais a ser sensoriada (canal inferior e canal superior), podendo ser configurada com

valores de canais do 14 ao 51 UHF. O limiar decisão *default* igual a 10 foi calculado, conforme a expressão 2.12, para viabilizar uma probabilidade de falso alarme bem próximo de 0% considerando a utilização de 32000 amostras coletadas. Outros parâmetros relacionados com o hardware USRP N210 também são configurados internamente pela plataforma e estão apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5. 1 Parâmetros utilizados no MATLAB para o sensoriamento espectral

Parâmetros	
Frequência Central (variável com o canal sensoriado)	$473,142857 \times 10^6 + (Canal - 14) * 6 \times 10^6$
<i>Clock</i> da Placa	100 MHz
Fator de decimação	16
Número de amostras coletadas pelo hardware	2^{15}
Modo Rajada	Habilitado
Tipo de amostra coletada	Int8

Fonte: Autora.

Com a plataforma devidamente configurada, basta pressionar o botão verde "Sensoriar" para iniciar o processo de sensoriamento espectral. Neste momento, todas as configurações são enviadas para o dispositivo USRP N210, que começa a varrer os canais especificados pelo usuário, coletando amostras, calculando a energia e tomando decisões sobre a ocupação espectral. O sistema é altamente eficiente, capaz de realizar a varredura de todos os canais da faixa UHF (14 ao 51) em menos de 350 ms.

Como pode ser visualizado na Figura 5.3, a interface da plataforma exibe dois gráficos como resultado do sensoriamento. No primeiro, é apresentada a ocupação espectral, no qual caso o canal seja considerado ocupado, uma barra vertical vermelha irá aparecer em sua posição. Já o segundo, mostra em azul o nível de energia dentro de cada canal sensoriado.

O exemplo de resultado de sensoriamento mostrado na Figura 5.3 foi obtido em um ambiente *indoor*, dentro do laboratório de comunicações analógicas e digitais da UFU – campus Patos de Minas, no qual foram realizadas todas as medições empíricas deste trabalho. O ambiente é composto por bancadas, computadores e vários equipamentos de medição, conforme ilustra a Figura 5.4, ambiente propício para a geração de multipercurso. Durante o experimento, havia no ambiente de sensoriamento um transmissor ISDB-TB (implementado em RDS, conforme explicado na seção 5.2) operando no canal 37 UHF, com potência média de saída de -20 dBm. O transmissor utilizava uma antena omnidirecional VERT900 da Ettus (53). Do outro

lado, a uma distância de 3 metros, foi colocado o sistema de sensoriamento espectral equipado com uma antena Log periódica LP0410 (54).

Figura 5.4 Ambiente de implementação prática do sistema de sensoriamento.



Fonte: Autora.

Analisando os resultados de ocupação espectral e detecção de energia na Figura 5.3, para o cenário descrito, é possível perceber que 3 canais foram detectados como estando presente na faixa sensoriada (canal 25 ao 39). O canal 37, que teve a maior energia detectada, uma vez que estava no mesmo ambiente do RC e também os canais 34 (TV Pai Eterno) e 36 (Rede Minas), que mesmo sendo sinais externos ao ambiente, também foram detectados. Vários testes de monitoramento em tempo real foram realizados, com e sem visada, com e sem movimentação da antena de recepção e em praticamente 100% dos testes, quando o transmissor ISDB-TB era ligado no canal 37, o sistema de sensoriamento conseguia detectar a sua presença. Para estes testes, o sistema de recepção desfrutava de uma SNR positiva, devido à proximidade entre o transmissor e do RC. Em situações reais, pode acontecer do RC operar em condições mais adversas que as descritas anteriormente, sendo importante também conhecer o seu desempenho nessas situações.

5.4 DESEMPENHO PRÁTICO DO SISTEMA DE SENSORIAMENTO ESPECTRAL

A seguir são apresentados resultados de desempenhos práticos obtidos em cenários cabeados e, também, em cenários sem fio. Todas as curvas de desempenho práticas foram obtidas considerando 3000 eventos de Monte Carlo, dos quais 50% foram realizados com o transmissor ligado e 50% com ele desligado.

As medições foram realizadas no canal 37 UHF. Para ajustar a SNR desejada, primeiro a potência de ruído, com ausência de transmissão primária, era medida e, em seguida, ajustava-se a potência do equipamento de transmissão até que se obtivesse a SNR desejada para levantamento das curvas de desempenho.

5.4.1 DESEMPENHO EM AMBIENTE CONTROLADO

Com o intuito de verificar se o sistema de sensoriamento desenvolvido demonstra um desempenho em conformidade com a teoria descrita na seção 2.3.3.1, foi montado o *setup* de medições, conforme ilustrado na Figura 5.5. Este *setup* utiliza dois RDS do tipo URSP N210, um atuando como transmissor e o outro como receptor. No rádio transmissor, é empregado o sinal de TV digital gerado por meio de um notebook com o software GNU Radio, conforme detalhado na seção 5.2. No receptor, é implementado o sistema de sensoriamento espectral, utilizando um outro notebook e a aplicação desenvolvida no MATLAB, como explicado na seção 5.3.

Figura 5.5 Foto do ambiente de medição cabeado.

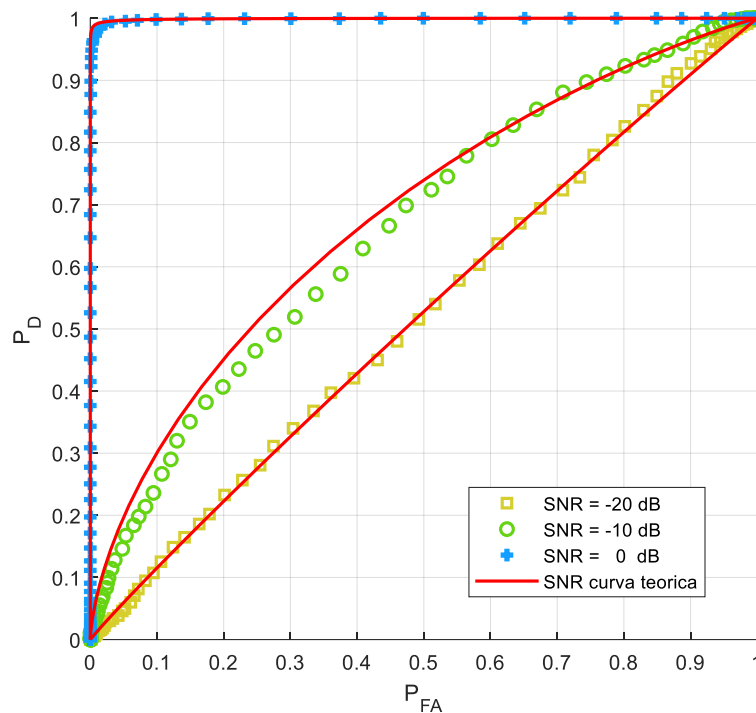


Fonte: Autora.

A saída de sinal do rádio transmissor é conectada ao RC por meio de um cabo SMA e um atenuador de 30 dB. Essa configuração inicial, mais controlada, foi escolhida devido ao seu benefício em proporcionar medições mais precisas de SNR no receptor, evitando variações no seu nível, mesmo em cenários com um baixo número de amostras capturadas.

Com o *setup* pronto, o desempenho do sistema prático em um ambiente confinado foi avaliado. Para tal, utilizou-se $n = 50$ amostras coletadas para o cálculo da variável de decisão e a SNR foi variada de acordo com SNR = -20 dB, -10 dB e 0 dB. As curvas de desempenho para os três casos de SNR avaliados são apresentadas na Figura 5.6. Na figura também são apresentadas as curvas teóricas de desempenho da técnica detecção de energia, para operação com a configuração avaliada em canal AWGN, obtida por meio das expressões (2.8) e (2.9).

Figura 5.6 Desempenho do sistema de sensoriamento espectral com a variação de SNR média em cenário cabeado.



Fonte: Autora.

Analisando os resultados apresentados no gráfico da Figura 5.6 é possível constatar que, de fato, o desempenho do sistema prático, conforme o esperado, aumenta à medida em que a SNR aumenta, tendendo para o ponto de operação ótimo quando a SNR = 0 dB. Outra constatação relevante é que o desempenho empírico em cenário cabeado, sem variação de SNR, se aproxima muito do desempenho teórico para operação em canal AWGN (sem desvanecimento), validando o funcionamento do sistema desenvolvido.

Conjectura-se que a ligeira diferença de performance observada entre as curvas empíricas e teóricas, neste caso, seja ocasionada por fatores práticos de implementação, que

normalmente não são contemplados em modelamentos matemáticos teóricos, tais como: o número de bits de quantização do ADC do RDS, filtragens digitais, *jitter* no *clock* de amostragem do sistema, dentre outros.

5.4.2 PERFORMANCE DO SISTEMA DE SENSORIAMENTO ESPECTRAL EM AMBIENTE SEM FIO

Com o objetivo de avaliar o sistema de sensoriamento em um ambiente mais realista, um segundo *setup* de medições, para levantamento de curvas de desempenho em cenário sem fio, foi montado e está apresentado na Figura 5.7. Neste cenário, os dois RDSs foram conectados em suas respectivas antenas de transmissão (omnidirecional VERT900) e de recepção (Log periódica LP0410) e colocados a 3 metros de distância. Inicialmente, o sistema de sensoriamento foi avaliado com visada direta entre as antenas de transmissão e recepção, exatamente como ilustra a Figura 5.7. Em um segundo momento, o RDS de transmissão, juntamente com sua antena, foi posicionado atrás do notebook conectado ao transmissor, resultando na perda da linha de visada com a antena do sistema de sensoriamento.

Figura 5.7 Foto panorâmica do ambiente de medição sem fio.



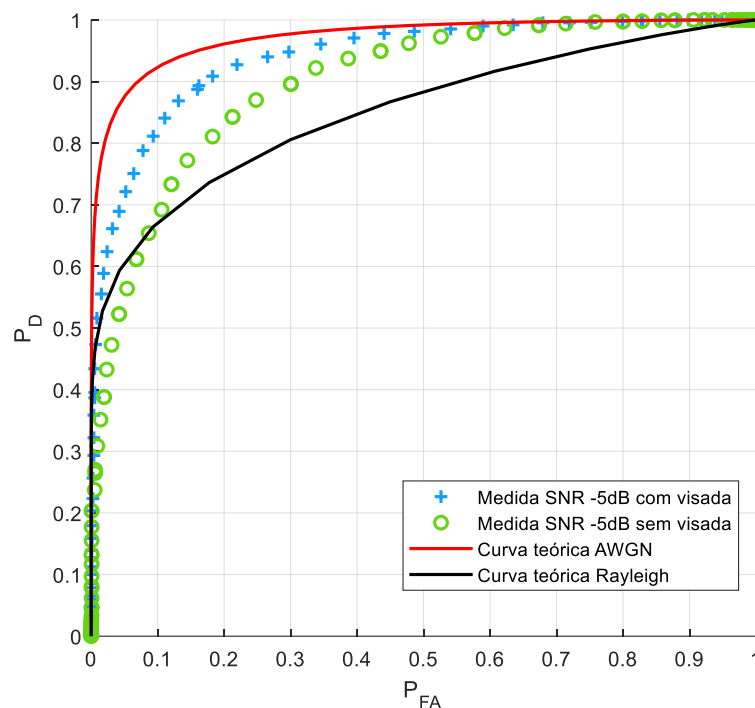
Fonte: Autora.

O desempenho do sistema de sensoriamento espectral implementado foi avaliado com e sem visada direta. Neste caso, a SNR média de recepção foi ajustada para -5 dB e o número de amostras coletadas pelo RC para o cálculo da variável de decisão foi de $n = 100$ amostras. O resultado para as duas condições (com e sem visada) está apresentado na Figura 5.8,

juntamente com as curvas teóricas para canal AWGN e Rayleigh, obtidas com auxílio das expressões (2.8), (2.9) e (2.11).

A análise dos resultados na Figura 5.8 revela que o desempenho do sistema com linha de visada tende a se aproximar mais da curva teórica AWGN do que da curva Rayleigh. No entanto, essa proximidade é menor em comparação com as medições realizadas por cabo, apresentadas na seção anterior. Esta observação pode ser justificada pelo fato de que, em condições de medição sem fio, além do ruído térmico no receptor, o sinal recebido está sujeito a outras degradações que não estão presentes em uma transmissão por cabo.

Figura 5.8 Desempenho do sistema de sensoriamento com e sem visada direta.



Fonte: Autora.

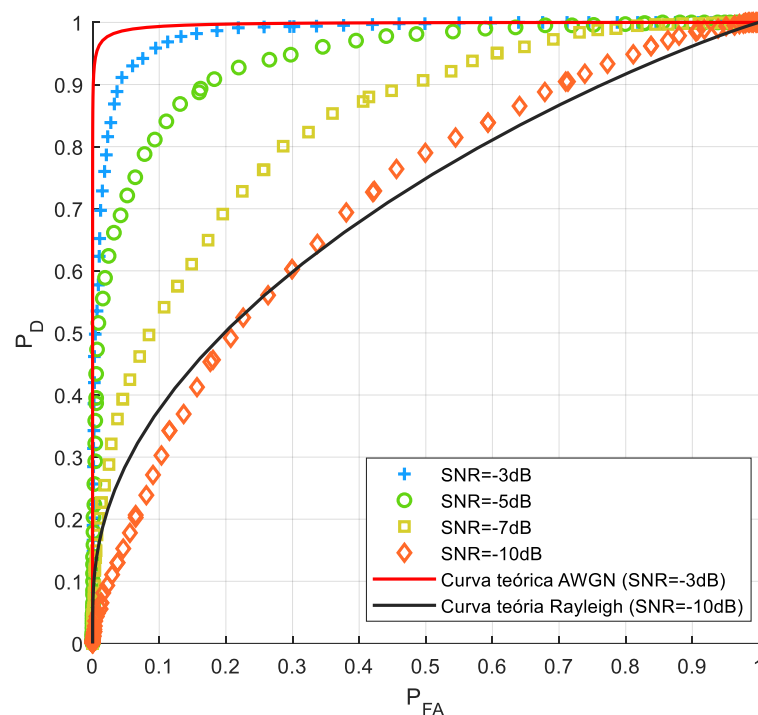
Por exemplo, apesar de se tratar de um cenário com visada e haver um percurso mais forte, o sinal recebido pela antena de recepção é composto também por várias réplicas do sinal de transmissão, originadas devido a múltiplas reflexões, difrações e espalhamento ocorridas nos objetos presentes no ambiente de medição. Isso causará flutuações instantâneas na envoltória das amostras capturadas, reduzindo a performance do sistema.

Por outro lado, a curva de desempenho do sistema sem linha de visada direta, também mostrada na Figura 5.8, ficou mais próxima da curva teórica do canal Rayleigh, que modela um ambiente pessimista de recepção em um cenário de multipercursos, onde nenhum sinal se destaca em relação aos demais. O desempenho superior do sistema sem linha de visada direta em relação ao modelo teórico considerando o canal Rayleigh é provavelmente devido à presença de um percurso dominante (com nível mais intenso) nas medições, gerado pela disposição dos

objetos no laboratório durante o experimento. Isso reduz a variação instantânea do nível das amostras capturadas e melhora o desempenho do sistema de sensoriamento.

O desempenho do sistema de sensoriamento em ambiente sem fio com visada (Figura 5.7) também foi avaliado em diferentes condições de SNR média. Para essa análise os valores considerados foram: $n = 100$ amostras e SNR = -3 dB, -5 dB, -7 dB e -10 dB. A curva ROC resultante das medições está apresentada na Figura 5.9, junto com o melhor resultado teórico (cenário AWGN, $n = 100$ e SNR = -3 dB) e com o pior (cenário Rayleigh, $n = 100$ e SNR = -10 dB). Observando as curvas obtidas, nota-se uma melhora no desempenho conforme o aumento de SNR, o que é previsto em teoria e já havia sido confirmado pelas simulações realizadas no capítulo 4 e pela análise em cenário cabeado. É importante destacar que todas as curvas empíricas de desempenho estão situadas entre o melhor e o pior caso teórico apresentado, mostrando a coerência dos resultados mesmo em cenários sem fio.

Figura 5.9 Desempenho do sistema de sensoriamento com variação da SNR

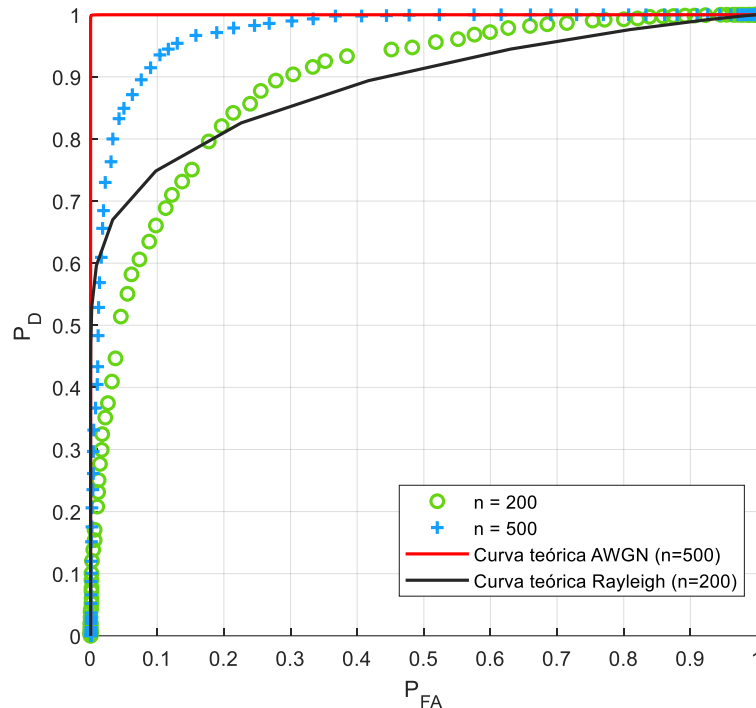


Fonte: Autora.

A última análise conduzida no cenário sem fio, mostrado na Figura 5.10, foi a avaliação da influência do número de amostras coletadas em um ambiente com SNR média fixa. Nesse caso, a SNR média foi ajustada para -5 dB, e o desempenho do sistema de sensoriamento espectral foi avaliado considerando $n = 200$ e 500 amostras capturadas. As curvas de desempenho obtidas a partir desse experimento estão apresentadas na Figura 5.10, onde também

estão incluídas as curvas teóricas para a melhor (cenário AWGN, $n = 500$ e $\text{SNR} = -5$ dB) e a pior (cenário Rayleigh, $n = 200$ e $\text{SNR} = -5$ dB) configuração avaliada.

Figura 5.10 Desempenho do sistema de sensoriamento com variação do número de amostras.



Fonte: Autora.

Conforme pode ser visto nos resultados da Figura 5.10, a implementação prática em RDS está em conformidade com a teoria e com os resultados de simulação explorados na seção 4.4.3, na qual quanto maior o número de amostras coletadas, melhor é a decisão sobre a ocupação do canal. O melhor desempenho empírico ($n = 500$) ficou abaixo do desempenho teórico AWGN e o pior ($n = 200$) ficou em sua maior parte acima do desempenho teórico em canal Rayleigh.

Neste ponto é importante destacar a grande dificuldade em se levantar curvas empíricas de desempenho em cenários sem fio, com baixa SNR e poucas amostras coletadas. Nesses casos, há uma grande variação instantânea da SNR, que podem comprometer a qualidade do conjunto de amostras selecionado para análise. Foram realizadas várias medidas com diferentes quantidades de amostras e valores de SNR configurados. No entanto, em vários casos, as amostras coletadas não apresentavam a SNR prevista, resultando na exclusão dos resultados correspondentes.

Após todas as análises realizadas no cenário sem fio, conclui-se que o sistema de sensoriamento desenvolvido apresenta um comportamento consistente com as expectativas. As divergências entre os resultados teóricos e empíricos são principalmente atribuíveis a fatores

práticos de implementação e aos modelos de canal considerados neste estudo. Isso inclui o modelo AWGN, que é otimista e considera apenas a degradação devido ao ruído térmico no receptor, e o modelo Rayleigh, que é mais pessimista e pressupõe um canal de multipercurso sem um percurso dominante.

Caso seja necessário obter uma modelagem mais precisa do ambiente sem fio real, especialmente do ambiente indoor mostrado na Figura 5.7, a fim de obter uma congruência mais forte entre os resultados práticos e teóricos, outros modelos de canais de desvanecimento mais sofisticados podem ser considerados. Por exemplo, os modelos de Rice e o modelo κ - μ que levam em conta a presença de um percurso dominante em seus fundamentos físicos.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO E PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho de conclusão de curso avançou na parte de estudo, simulação e implementação prática do sensoriamento espectral baseado em detecção de energia, considerando um cenário de TVWS no Brasil.

As simulações realizadas no trabalho revelaram que diversos parâmetros afetam o desempenho do sensoriamento espectral em TVWS. Portanto, para otimização de um sistema é necessário que se encontre uma combinação de parâmetros satisfatória que atenda aos requisitos necessários de P_D e P_{FA} . Pelas análises apresentadas foi possível concluir que em cenários de baixa relação sinal-ruído, principalmente em condições de desvanecimento, os RCs precisaram coletar uma grande quantidade de amostra para a realização de um sensoriamento espectral robusto. Além disso, foi constatado também que quanto mais RCs forem utilizados em um cenário de sensoriamento cooperativo, melhor será a qualidade da detecção realizada, visto que a própria diferença de localidade dos RCs agregaria ao sistema uma espécie de diversidade espacial, tornando as decisões sobre a ocupação espectral do canal mais confiáveis.

O sistema de sensoriamento espectral real foi implementado no RDS USRP 210 e mostrou resultados em conformidade com a teoria e com as simulações desenvolvidas. O sistema foi avaliado em condições controladas (por meio de cabos) e em um cenário sem fio *indoor* de laboratório com e sem visada direta. Os resultados no cenário cabeado ficaram muito próximos do ideal teórico (AWGN), já que a situação em questão permite condições de transmissão muito boas. Em cenários sem fio com visada, foi possível verificar que o desempenho do sistema de sensoriamento fica um pouco abaixo daquele obtido em canal AWGN, já o sistema sem fio e sem visada ficou com o desempenho ligeiramente superior àquele teórico considerando um canal Rayleigh. Análises com variações de quantidade de amostras e variação de SNR também foram consideradas e os resultados obtidos são completamente explicáveis dado o cenário de medições sem fio considerado. Vale destacar também que, em condições de SNR positiva e alto número de amostras, o sistema avaliado no laboratório obteve 100% de eficácia na detecção da presença ou ausência do usuário primário na banda sensoriada.

Com base nisso, podemos concluir que, embora a técnica de detecção de energia seja mais simples, em comparação com outras técnicas mais robustas, ela é viável para implementação do sensoriamento espectral em cenários de TVWS, obviamente dentro das limitações dessa abordagem, sendo uma opção adequada, especialmente em situações em que se prima pela simplicidade e pelo custo-benefício.

Como trabalhos futuros, propõe-se:

- (i) A avaliação de outros modelos de canal mais abrangentes que se ajustem melhor aos resultados de medições práticas obtidas neste trabalho;
- (ii) A Implementação prática de outras técnicas de sensoriamento espectral na plataforma para comparação de desempenho com a técnica detecção de energia;
- (iii) Análise em simulação da viabilidade do sensoriamento cooperativo em cenário de TVWS.

REFERÊNCIAS

- 1 NEWMAN, Peter. How internet of things technology growth is reaching mainstream companies and consumers, **Business Insider**, Tech. Rep. Jan. 2019, Disponível em: <https://www.businessinsider.com/internet-of-things-report>

- 2 MORE than 50 billion connected devices, **Ericson**. Disponível em: <https://vdna.be/publications/Wp-50-Billions.Pdf>

- 3 CHAPIN, John M. *et al.* Mobile Broadband Growth, Spectrum Scarcity, and Sustainable Competition, **SSNR**, Disponível em: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1992423

- 4 M. A. McHenry, NSF Spectrum Occupancy Measurements Project Summary, Shared Spectrum Co. Report, August 2005.

- 5 HAYKIN, Simon *et al.* Spectrum Sensing for Cognitive Radio, **Proceedings of the IEEE**, Volume 97, Edição 5, mai. 2019 p. 849 DOI 10.1109/JPROC.2009.2015711 Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4840525>

- 6 VIDAL, Daniel da C.; CASELLANOS, Pedro V. G.; FERREIRA, Tadeu N. Avaliação Preliminar das Oportunidades de Espectro na Região Metropolitana de Niterói na Faixa UHF da TV Digital. **XXXVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS**, Petrópolis, RJ, 2019

- 7 DEFINING Cognitive Radio (CR) and Dynamic Spectrum Access (DSA). **Wireless Innovation Forum**, Disponível em: https://www.wirelessinnovation.org/Defining_CR_and_DSA

- 8 AMARAL, Bruno. Anatel aprova regulamento de uso de White Spaces, **teletime**. 30 set. 2021, Disponível em: <https://teletime.com.br/30/09/2021/anatel-aprova-regulamento-de-uso-de-white-spaces/>

- 9 PROJETO analisa o uso da tecnologia TV White Spaces no Brasil para ampliar inclusão digital, **Infra News Telecom**, Disponível em: <https://infranewstelecom.com.br/projeto-analisa-o-uso-da-tecnologia-tv-white-spaces-no-brasil-para-ampliar-inclusao-digital/> Acesso em: 08 nov. 2022.

- 10 IEEE Standard - Information Technology, Telecommunications and information exchange between systems-Wireless Regional Area Networks-Specific requirements. Part 22: Cognitive Wireless RAN MAC and PHY specifications: Policies and Procedures for Operation in the Bands that Allow Spectrum Sharing where the Communications Devices May Opportunistically Operate in the Spectrum of Primary Service – Redline. **IEEE Std 802.22-2019 (Revision of IEEE Std 802.22-2011) - Redline**, p.1-2135, Mai. 2020 Disponível em: <https://ieeexplore-ieee-org.ez34.periodicos.capes.gov.br/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9282259>

- 11 KAKALOU, Ioanna *et al.* Radio Environment Maps for 5G Cognitive Radio Network, **2019 8th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies**

(MOCAST), 2019, pp. 1-4 DOI:10.1109/MOCAST.2019.8741554 Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8741554>

12 ALVES, Fátima Sayury Queralt Queda. **Sensoriamento espectral Cooperativo Baseado em Rádios Cognitivos com Múltiplas Antenas**. 2021. Dissertação (Mestrado em Telecomunicações) – Inatel, Instituto Nacional de Telecomunicações, Santa Rita do Sapucaí, 2021.

13 V. Amrutha; K. V. Karthikeyan, Spectrum sensing methodologies in cognitive radio networks: A survey. **International Conference on Innovations in Electrical, Electronics, Instrumentation and Media Technology (ICEEIMT)**, 2017, pp. 306-310, DOI 10.1109/ICIEEIMT.2017.8116855. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8116855>. Acesso em: 08 nov. 2022.

14 A. Ali; W. Hamouda, Advances on Spectrum Sensing for Cognitive Radio Networks: Theory and Applications, **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, vol. 19, no. 2, p. 1277-1304, Secondquarter 2017, DOI 10.1109/COMST.2016.2631080. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7748543> Acesso em: 08 nov. 2022.

15 ZHANG, Long. *et al.* Research on Spectrum Sensing System Based on Composite Neural Network, **2020 2nd International Conference on Advances in Computer Technology, Information Science and Communications (CTISC)**, 2020, pp. 22-26, doi: 10.1109/CTISC49998.2020.00010. Disponível em: <https://ieeexplore-ieee-org.ez34.periodicos.capes.gov.br/document/9203938>

16 ALFADHLI, Yahya. *et al.* Toward Dynamic 5g Networks Utilizing Flexibe Function Split, **2019 IEEE MTT-S International Microwave Conference on Hardware and Systems for 5G and Beyond (IMC-5G)**, 15-16 Ago. 2019, DOI: 10.1109/IMC-5G47857.2019.9160359 Disponível em: <https://ieeexplore-ieee-org.ez34.periodicos.capes.gov.br/document/9160359>

17 XIAO Tian *et al.* 5G Residency Enhancement Method based on 5G Beam Intelligent Optimization, **2021 20th International Conference on Ubiquitous Computing and Communications (IUCC/CIT/DSCI/SmartCNS)**, 20-22 Dez. 2021, DOI: 10.1109/IUCC-CIT-DSCI-SmartCNS55181.2021.00088 Disponível em: <https://ieeexplore-ieee-org.ez34.periodicos.capes.gov.br/document/9718804>

18 ADAME, Toni *et al.* Time-Sensitive Networking in IEEE 802.11be: On the Way to Low-Latency WiFi-7, **MDPI** Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/15/4954>

19 HAYKIN, Simon. Cognitive Radio: brain-empowered wireless communications, **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, Vol. 23. P. 201 – 220 Fev. 2005. DOI: 10.1109/JSAC.2004.839380 Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1391031>

20 AKYILDIZ, Ian F. Next Generation/dynamic spectrum acess/ cognitve radio wireless networks: A survey. **Elsevier**, Vol.50, No.13, pp. 2127-2159, Mai.2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1389128606001009>

21 ANJOS, André Antônio dos. **Plataforma de Simulação para Análise de Desempenho do Sensoriamento Espectral baseado em Autovalores para Rádios Cognitivos**. 2012.

Dissertação (Mestrado em Telecomunicações) – Inatel, Instituto Nacional de Telecomunicações, Santa Rita do Sapucaí, 2012.

22 R. Ramyea, N. Kasthuri. Performance Analysis of Non Cooperative Spectrum Sensing Schemes in 5G Cognitive Radio Networks, **2018 International Conference on Intelligent Computing and Communication for Smart World (I2C2SW)**, 2018, pp. 263-267, doi: 10.1109/I2C2SW45816.2018.8997126. Disponível: <https://ieeexplore-ieee-org.ez34.periodicos.capes.gov.br/document/8997126/authors#authors>

23 T. Suseela, D. Sivakumar, Non-cooperative spectrum sensing techniques in cognitive radio-a survey, **2015 IEEE Technological Innovation in ICT for Agriculture and Rural Development (TIAR)**, 2015, pp. 127-133, doi: 10.1109/TIAR.2015.7358544. Disponível em: <https://ieeexplore-ieee-org.ez34.periodicos.capes.gov.br/document/7358544>

24 COSTA, Lucas dos Santos; BOMFIN, Roberto Cesar Dias Vilela; GUIMARÃES, Dayan Adionel; SOUZA, Rausley Adriano Amaral de. Performance of Blind Cooperative Spectrum Sensing under Nonuniform Signal and Noise Powers. **JOURNAL OF COMMUNICATION AND INFORMATION SYSTEMS**, v.33, n.01, 2018. Disponível em: <https://jcis.sbrc.org.br/jcis/article/view/476/385> Acesso em: 08 nov. 2022.

25 ZOU, Yulong et al. Cooperative relay techniques for cognitive radio systems: Spectrum sensing and secondary user transmissions, **IEEE Communications Magazine**, vol. 50, no. 4, pp. 98-103, Abril. 2012 DOI: 10.1109/MCOM.2012.6178840. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6178840>

26 F. Pascal. *et al.* Constant False Alarm Rate Detection In Spherically Invariant Random Processes, XII. **European Signal Processing Conference**, Set. 2004.

27 J. N. Javed;M. Khalil; A. Shabbir, A Survey on Cognitive Radio Spectrum Sensing: Classifications and Performance Comparison, **International Conference on Innovative Computing (ICIC)**, 2019, p.1-8, DOI 10.1109/ICIC48496.2019.8966677. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8966677> Acesso em: 08 nov. 2022.

28 PARVATHY, A.; GAYATHRI. Narayanan, Comparative Study of Energy Detection and Matched Filter Based Spectrum Sensing Techniques, **2020 12th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN)**, Bhimtal, India, 2020, pp. 147-153, doi: 10.1109/CICN49253.2020.9242609. Disponível em: <https://ieeexplore-ieee-org.ez34.periodicos.capes.gov.br/document/9242609>

29 M. Oner *et al.* Cyclostationarity based air interface recognition for software radio systems, **Proceedings 2004 IEEE Radio and Wireless Conference**, 2004, pp. 263-266, doi: 10.1109/RAWCON.2004.1389125. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1389125>

30 NETO, João Scudeler. GUIMARÃES, Dayan Adionel. Sensoriamento Espectral Cooperativo Baseado em Autovalores para Rádios Cognitivos, **REVISTA TELECOMUNICAÇÕES, VOL 15 N° 01, JUNHO DE 2012**, 2012

31 H. Huang, C. Yuan, Cooperative spectrum sensing over generalized fading channels based on energy detection, **China Communications**, vol. 15, no. 5, p. 128-137, mai. 2018, doi:

10.1109/CC.2018.8387992. Disponível em: <https://ieeexplore-ieee-org.ez34.periodicos.capes.gov.br/document/8387992>

32 CHATZIANTONIOU, Eleftherios *et al.* Threshold Optimization for Energy Detection-Based Spectrum Sensing Over Hyper-Rayleigh Fading Channels, **IEEE Communications Letters**, vol. 19, no. 6, p. 1077-1080, Jun. 2015, DOI: 10.1109/LCOMM.2015.2415486 Disponível em: <https://ieeexplore-ieee-org.ez34.periodicos.capes.gov.br/document/7069240>

33 ARJOUNE , Youness. KAABOUCH, Naima. A Comprehensive Survey on Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks: Recent Advances, New Challenges, and Future Research Directions Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/1/126>

34 ALINK, Mark *et al.* Spectrum Sensing With High Sensitivity and Interferer Robustness Using Cross-Correlation Energy Detection, **IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems**, vol. 3, no. 4, pp. 566-575, Dec. 2013, doi: 10.1109/JETCAS.2013.2280809. Disponível em: <https://ieeexplore-ieee-org.ez34.periodicos.capes.gov.br/document/6607235>

35 Urkowitz, H. Energy detection of unknown deterministic signals, **Proceedings of the 17 IEEE** , Vol.55, No.4, pp. 523–531, April 1967. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1447503>

36 WU, Wei *et al.* IRS-Enhanced Energy Detection for Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks, **IEEE Wireless Communications Letters**, vol. 10, no. 10, pp. 2254-2258, Oct. 2021, doi: 10.1109/LWC.2021.3099121. Disponível em: <https://ieeexplore-ieee-org.ez34.periodicos.capes.gov.br/document/9493720>

37 VLĂDEANU, Calin. *et al* Spectrum Sensing With Energy Detection in Multiple Alternating Time Slots, **IEEE Access**, vol. 10, pp. 38565-38574, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3165556. Disponível em: <https://ieeexplore-ieee-org.ez34.periodicos.capes.gov.br/document/9751082>

38 PLATA, Daniela Mercedes Martínez; REÁTIGA, Ángel Gabriel Andrade. Evaluation of energy detection for spectrum sensing based on the dynamic selection of detection-threshold. **ELSEVIER**. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705812018097>. Acesso em: Dez. 2022.

39 YACOUN, Michel. **Foundations of Mobile Radio Engineering**. New York: CRC Press, 1993. ISBN: 978-0849386770.

40 COLLINS, Travis. *et. al.* **Software-Defined Radio for Engineers**, Artech House, 2018, Bibliografia: p. 1-18. ISBN-13: 978-1-63081-457-1.

41 ETTUS. **USRP N210 Software Defined Radio (SDR) - Ettus Research**. Disponível em: <https://www.ettus.com/all-products/un210-kit/>. Acesso em: mar. 2023.

42 MEDINA, Euler Edson Apaza. **Sensoriamento Espectral Baseado na Detecção de energia para Rádios Cognitivos**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências) Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

- 43 RODRÍGUEZ, Erick Adrian Iglesias. Analysis and numeric determination of difference between SNR and CNR in Digital Television ISDB-Tb, **2018 IEEE MTT-S Latin America Microwave Conference**, 2018, doi: 10.1109/LAMC.2018.8699016. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8699016>
- 44 ANJOS, André Antônio dos. Parte III – Sistemas De Transmissão De Tv Digital, **GEE542 – SISTEMAS DE TELEVISÃO UFU**, 2021
- 45 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15601**: Televisão digital terrestre — Sistema de transmissão. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- 46 GUIMARÃES, D., SOUZA, R: **Transmissão Digital: princípios e aplicações**, São Paulo: Érica, 2012.
- 47 HAYKIN, Simon. **Digital Communications Systems**, Wiley, 2013
- 48 SIMULACÃO TVWS, André Antônio dos Anjos; Dayane Cristina Jesus. Disponível em: <https://drive.google.com/drive/folders/1qRK0757cqRRHPcwsU2zSM9lPAR5DMNV?usp=sharing>, Acesso em: Agosto de 2023.
- 49 J. M. Hammersley, et al. **Monte Carlo Methods**, Chapman and Hall, 1964, ISBN: 978-94-009-5819-7
- 50 FAWCETT, Tom. An introduction to ROC analysis. **Pattern Recognition Letters**, v. 27, n. 8, p. 861-874, 2006.
- 51 GIT-ARTES. **GitHub - git-artes/gr-isdbt: DTV ISDB-T in GNURadio**. Disponível em: <https://github.com/git-artes/gr-isdbt>. Acesso em: mar. 2023.
- 52 **Sensoriamento-Espectral-para-Rádios-Cognitivos-aplicado-em-cenários-de-TVWS**. Disponível em: <https://github.com/DayaneCJM/Sensoriamento-Espectral-para-Rádios-Cognitivos-aplicado-em-cenários-de-TVWS>. Acesso em: nov. 2023.
- 53 ETTUS. **VERT900 Antenna**. Disponível em: <https://www.ettus.com/all-products/vert900>. Acesso em: out. 2023.
- 54 ETTUS. **LP0410 Antenna**. Disponível em: <https://www.ettus.com/all-products/lp0410/>. Acesso em: out. 2023.