



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica - Campus Patos de Minas
Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações

DIOGO CAMPOS DE ARVELOS

**SENSORIAMENTO ESPECTRAL COOPERATIVO NA
PRESENÇA DE RUÍDO IMPULSIVO EM CENÁRIOS DE TV
WHITE SPACES**

Patos de Minas - MG

2024

DIOGO CAMPOS DE ARVELOS

**SENSORIAMENTO ESPECTRAL COOPERATIVO NA
PRESENÇA DE RUÍDO IMPULSIVO EM CENÁRIOS DE TV
WHITE SPACES**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à banca examinadora como requisito parcial 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 - MG

2024

DIOGO CAMPOS DE ARVELOS

**SENSORIAMENTO ESPECTRAL COOPERATIVO NA
PRESENÇA DE RUÍDO IMPULSIVO EM CENÁRIOS DE TV
WHITE SPACES**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à banca examinadora como requisito parcial 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, 17 de junho de 2024

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

Prof. Dr. Davi Sabbag Roveri
(Membro interno – FEELT – UFU)

Prof. Dr. Júlio César Coelho
(Membro interno – FEELT – UFU)

RESUMO

A política de alocação espectral fixa adotada pela Agência Nacional de Telecomunicações no Brasil permite que apenas usuários licenciados transmitam em determinadas faixas. As bandas designadas para transmissões de TV muitas vezes apresentam ineficiência espectral, pois nem sempre estão totalmente ocupadas, sendo identificadas em tais exemplos como *TV White Spaces*. Isto proporciona uma oportunidade para utilizadores secundários transmitirem quando os usuários primários não estiverem ocupando a banda, aumentando assim a eficiência do espectro.

Neste estudo, é realizado a comparação de desempenho da técnica de sensoriamento espectral de detecção de energia na forma cooperativa e não cooperativa. O objetivo é monitorar a ocupação do espectro nas faixas de transmissão de TV no Brasil, que possuem usuários primários transmitindo sinais OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) no padrão de TV ISDB-TB (*Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial Brazilian Version*). O estudo investiga o desempenho do sistema de sensoriamento em diversos contextos, com cenários que contemplam o ruído aditivo branco do tipo gaussiano (AWGN, do inglês *Additive White Gaussian Noise*), desvanecimentos por multipercurso e ruído impulsivo. A avaliação em cada caso simulado será realizada por meio da probabilidade de detecção e de falso alarme.

Palavras Chaves: Sensoriamento Espectral Cooperativo. Sensoriamento Espectral Não Cooperativo. *TV White Space*. Rádio Cognitivo. ISDB-TB. Detecção de Energia. *Ruído Impulsivo*.

ABSTRACT

The fixed spectral allocation policy adopted by the National Telecommunications Agency in Brazil allows only licensed users to transmit in certain bands. Bands designated for TV transmissions often exhibit spectral inefficiency, as they are not always fully occupied, identified in such cases as TV White Spaces. This provides an opportunity for secondary users to transmit when primary users are not occupying the band, thereby increasing spectrum efficiency.

In this study, the performance comparison of the spectral sensing technique for energy detection in cooperative and non-cooperative forms is carried out. The objective is to monitor spectrum occupancy in the TV transmission bands in Brazil, which have primary users transmitting Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) signals in the ISDB-TB TV standard. The study investigates the performance of the sensing system in various contexts, with scenarios that include additive white Gaussian noise (AWGN), multipath fading, and impulsive noise. Evaluation in each simulated case will be carried out through probability of detection and false alarm.

Keywords: *Cooperative Spectral Sensing. Non-Cooperative Spectral Sensing. TV White Space. Cognitive Radio. ISDB-TB. Energy Detection. Impulsive Noise.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Ciclo de um Rádio Cognitivo	20
Figura 2.2 - Arquitetura de rede DSA	20
Figura 2.3 - Utilização espectral oportunista por um RC.	21
Figura 2.4 - Função densidade de probabilidade da variável aleatória T.....	24
Figura 2.5 - Representação de uma curva ROC	26
Figura 2.6 - Diagrama de blocos do detector de energia.....	27
Figura 2.7 - Ruído impulsivo mais ruído térmico	30
Figura 4.1 - (a) Módulo do sinal OFDM e (b) Espectro do sinal OFDM.....	35
Figura 4.2 - Ruído impulsivo mais ruído térmico para 3 RCs.....	37
Figura 4.3 - Fluxograma para obter PD e PFA na simulação.....	39
Figura 5.1 - Histogramas para diferentes valores de SNR	41
Figura 5.2 - Histogramas para diferentes valores de “m”	42
Figura 5.3 - Curvas ROCs para diferentes valores de SNR.....	43
Figura 5.4 - Curvas ROCs para diferentes valores de “m”	44
Figura 5.5 - Curvas ROCs para diferentes valores de “n”	45
Figura 5.6 - Curvas ROCs para diferentes valores de “m” com SNR de -10dB.....	47
Figura 5.7 - Curvas ROCs para diferentes valores de “m” com SNR de -15dB.....	48
Figura 5.8 - Curvas ROCs com presença e ausência do RI.....	49
Figura 5.9 - Curvas ROCs com RI, para diferentes valores de “m”.....	50
Figura 5.10 - Curvas ROCs com RI para diferentes valores de “K”	51
Figura 5.11 - Curvas ROCs com RI para diferentes valores de “Pin”	52
Figura 5.12 - Curvas ROCs com RI para diferentes valores de “Pcr”	53
Figura 5.13 - Curvas ROCs com RI para diferentes valores de “ β ”	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	Conversor analógico para digital
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
CF	Centro de Fusão
CFAR	<i>Constant False Alarm Rate</i>
DSA	<i>Dynamic Spectrum Access</i>
ED	Detecção de Energia (<i>Energy Detection</i>)
EGC	<i>Equal Gain Combining</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
FDP	Função Densidade De Probabilidade
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
INATEL	Instituto Nacional de Telecomunicações
IRS	Superfícies Refletoras Inteligentes
ISDB-TB	<i>Integrated System Digital Broadcasting – Terrestrial Brazil</i>
MRC	<i>Maximal Ratio Combining</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
RC	Rádio Cognitivo
RCG	Redes de Convolução de Grafos
RDS	Rádio Definido por <i>Software</i>
RG	<i>Random Guess</i>
RI	Ruído Impulsivo
ROC	<i>Receiver Operating Characteristic</i>
SNR	Relação Sinal-Ruído

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 rc
$x(t)$	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
$\Pr[x]$	Probabilidade de ocorrência de um evento x
T_{ED}	Variável de decisão para a técnica detecção de energia
$f_Y(y H_j)$	Função densidade de probabilidade do sinal recebido $y(t)$ condicionada à hipótese H_j
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
$Q(\cdot)$	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
β	Separação média entre pulsos de ruído impulsivo
A	Média da variável Gaussiana para geração da amplitude Log-Normal
B	Desvio padrão da variável Gaussiana utilizada para geração da amplitude LogNormal.
Z	Variável aleatória com média A e desvio padrão B utilizada para geração das amplitudes de ruído impulsivo com distribuição LogNormal.
z	Valor com distribuição Lognormal que representa a amplitude da amostra do ruído impulsivo.

Sumário

Capítulo 1 - Introdução	13
1.1 Contextualização.....	13
1.2 Problematização.....	15
1.3 Tema do projeto	17
1.4 Objetivos gerais.....	17
1.5 Objetivos específicos.....	17
1.6 Justificativas.....	18
1.7 Considerações finais	18
Capítulo 2 - Referencial teórico	19
2.1 Considerações iniciais	19
2.2 Rádio cognitivo	19
2.3 Sensoriamento espectral.....	21
2.3.1 Sistema sensoriamento espectral cooperativo e centralizado	22
2.3.2 Modelo básico de um sistema de sensoriamento espectral	23
2.3.3 Detecção de energia	26
2.4 Ruído impulsivo	29
2.4.1 Modelo do ruído impulsivo	29
2.5 Sinal de usuário primário em cenário de TVWS no Brasil (ISDB-TB)	31
Capítulo 3 - Materiais e Métodos	33
3.1 Considerações iniciais.....	33
3.2 Recursos necessários	33
Capítulo 4 - Simulação de sensoriamento espectral cooperativo em TVWS	34
4.1 Considerações iniciais.....	34
4.2 Simulação do sinal do usuário primário.....	34

4.3	Simulação do Ruído impulsivo.....	35
4.4	Simulação do sensoriamento espectral.....	38
Capítulo 5 - Resultados das Simulações		41
5.1	Distribuição estatística da variável de decisão T_{ED}	41
5.2	Impacto da variação de SNR na curva ROC para cenário cooperativo	43
5.3	Comparação de desempenho entre sistema não cooperativo e cooperativo para diferentes valores de RCs.....	44
5.4	Comparação de desempenho com a variação do número de amostras coletadas em cenário cooperativo	45
5.5	Simulação em cenário Rayleigh e AWGN.....	46
5.6	Simulação em cenário cooperativo com ruído impulsivo.....	48
5.7	Comparação de desempenho com RI em cenário cooperativo e não cooperativo	49
5.8	Impacto dos parâmetros do RI em cenário cooperativo	51
Capítulo 6 - Conclusão, Trabalhos Futuros e Contribuições.....		56
Referências.....		58

Capítulo 1 - Introdução

1.1 Contextualização

A evolução dos sistemas de telecomunicações tem sido fomentada principalmente pela crescente demanda por altas velocidades na comunicação, pela necessidade de baixa latência e pelo desejo dos usuários de estarem sempre conectados a qualquer hora em qualquer lugar (1,2). No entanto, a disponibilidade limitada do espectro eletromagnético vem se tornando um grande problema, na criação e implementação desses novos sistemas (3). Como exemplo dessa evolução, é possível citar os sistemas de quinta geração de telefonia móvel celular (5G) e o padrão de rede sem fio WIFI 6, porém ambos ainda operando em faixas abaixo de 6GHz.

No Brasil e na maioria dos países, as redes 5G operam na faixa de frequência 1 (FR1 em 3,5 GHz) do padrão 5G. Futuramente, a implantação do 5G também envolverá o uso da faixa de frequência 2 (FR2), com frequências variando de 24,25 a 52,6 GHz. Conseqüentemente, os desafios técnicos no ambiente de rádio móvel serão muito mais pronunciados devido às frequências mais altas. Olhando para o futuro, para o 6G, há aspirações de aproveitar frequências ainda mais altas, potencialmente na faixa de centenas de GHz ou mesmo terahertz (THz).

Além destes desafios, as futuras redes de comunicações móveis deverão responder às necessidades das zonas com baixa densidade populacional, como as regiões remotas e rurais. Estabelecer conectividade nessas áreas é crucial não apenas para atender verticais como agricultura, pecuária e mineração, que são importantes para a economia de vários estados do Brasil, mas também para reduzir a exclusão digital que afeta uma parcela considerável da população rural brasileira. Para conseguir isso, a utilização de canais de TV não utilizados nas faixas UHF e VHF (30 MHz a 890 MHz) será extremamente estratégica devido às próprias características da propagação de sinais nessa faixa de frequência, conhecidas por apresentarem um longo alcance e uma alta penetração, contribuindo assim para que o sinal chegue nas áreas remotas com qualidade.

No Brasil, a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) funciona como órgão regulador do espectro eletromagnético. Sua função consiste em fiscalizar a aplicação e utilização dos serviços de telecomunicações. A estratégia predominante de uso do espectro obedece a um sistema de alocação pré-determinada, envolvendo o particionamento de faixas de frequência para fins específicos. Essas faixas de frequência são acessíveis exclusivamente a usuários primários (UPs), que possuem licenças da ANATEL para operar nessas faixas. Este arranjo restringe outros usuários ou serviços de empregar o mesmo espectro. A permissão para empregar o espectro eletromagnético é concedida por um período de tempo definido, muitas vezes condicionado à localização geográfica do aparelho transmissor. A ANATEL supervisiona o espectro eletromagnético, que se estende de 8,3 kHz a 3 THz. Porém, as frequências superiores a 300 GHz ainda não foram designados para usos específicos.

Diversas análises realizadas por autores de todo o mundo têm indicado que a atual situação de escassez espectral decorre não de uma limitação física do espectro eletromagnético, mas sim de sua subutilização (4,5). Este fenômeno é atribuído, em grande parte, à atual política de alocação fixa, que se torna mais evidente nas faixas de VHF (*Very High Frequency*) e UHF (*Ultra High Frequency*), destinadas à alocação de canais de TV. O autor de (6) apresentou que ao comparar os dados dos canais alocados pela ANATEL dentro do espectro com as medições obtidas na região de Niterói-RJ, fica evidente que existem canais licenciados para transmissão que permanecem sem uso. Isso resulta em porções substanciais do espectro ociosas, mesmo em áreas densamente povoadas.

As porções não utilizadas do espectro de TV ganharam reconhecimento global como TV *White Space* (TVWS). Paralelamente a esse desenvolvimento, surgiu uma nova abordagem para alocação de espectro chamada *Dynamic Spectrum Access* (DSA) (7). Como solução para resolver esse problema de "escassez" e tornar o uso do espectro mais eficiente, um avanço recente no Brasil foi a aprovação pelo Conselho de Administração da ANATEL de uma proposta regulatória para a utilização secundária dinâmica do espectro de TVWS (8).

A proposta de resolução aprovada designa porções das faixas de VHF e UHF para esse tipo de aplicação, focando inicialmente nas faixas de frequência de 54-72 MHz, 174-216 MHz, 470-608 MHz e 614-698 MHz. O marco regulatório que define as condições de uso está em processo de formulação, e espera-se que defina o uso de

bandas de TV ociosas para serviços móveis celulares e banda larga. Os provedores regionais manifestaram interesse em utilizar o TVWS de forma secundária por meio de LTE e 5G, embora reconhecendo a ausência de uma oferta significativa de equipamentos adequados para uso oportunista do espectro não utilizado (8).

Nesse contexto, surge a necessidade do estudo e desenvolvimento de rádios cada vez mais inteligentes e dotados de novas tecnologias, capazes de utilizar com eficiência esse recurso disponível. No Brasil, por exemplo, um projeto idealizado e coordenado pelo Centro de Informações da Rede Brasileira (NIC.br), por meio de um acordo de cooperação com a Embaixada do Reino Unido no Brasil, está explorando a viabilidade técnica e operacional de empregar o TVWS para expandir os esforços de inclusão digital no país (9). Desenvolvido em parceria com o Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL) e a Universidade Federal do Ceará (UFC), e com o apoio da ANATEL, este projeto visa investigar o potencial e desenvolver tecnologias que permitam aos provedores de serviços de Internet e provedores de acesso utilizar o TVWS para estender a conectividade a áreas remotas e rurais. O projeto leva em consideração aspectos econômicos, técnicos e operacionais, com foco especial nas condições técnicas e operacionais estipuladas pela regulamentação da ANATEL.

Rádios Cognitivos (RCs), essencialmente, são dispositivos inteligentes de telecomunicações capazes de tomar decisões dinâmicas com base em informações coletadas do ambiente ao seu redor (10). São dotados de tecnologia ágil que explora o espectro de forma oportunista, identificando canais vagos e possibilitando sua utilização por usuários secundários (USs) não licenciados. Um dos principais desafios é evitar a interferência na transmissão de um UP (11). O ciclo de um RC abrange: detectar lacunas espectrais, selecionar bandas ideais, coordenar o acesso espectral com outros usuários e desocupar a banda se um usuário primário surgir (11,12). A principal funcionalidade de um RC, prometendo resolver o problema da escassez espectral, reside no sensoriamento espectral e será o foco deste trabalho.

1.2 Problematização

As bandas de frequência designadas para canais de TV geralmente incluem espaços não utilizados no espectro, chamados de TVWS. Com o relaxamento das políticas de alocação de espectro, o sensoriamento de espectro por meio de rádios cognitivos em TVWS, foco deste estudo, está sendo considerado por vários

pesquisadores como a principal solução para abordar a questão da escassez espectral.

Novos estudos no campo do sensoriamento espectral exploram vários cenários e empregam diferentes técnicas de implementação. Por exemplo, os pesquisadores em (13) introduzem o uso de superfícies refletoras inteligentes (IRS) que afetam o desempenho do processo de detecção espectral em rádios cognitivos, e o estudo analisa o impacto das IRS em duas configurações: melhorando o sinal de usuário primário para o usuário secundário e auxiliando o receptor primário. O texto destaca desafios, direções de pesquisa e apresenta resultados que mostram melhorias significativas na detecção espectral com o uso de IRS.

Os autores de (14) apresentam um estudo que aborda o sensoriamento espectral cooperativo sob um canal de retorno imperfeito. Primeiramente, é analisado o desempenho do sensoriamento espectral cooperativo baseado em detecção de energia sob canais de relatório imperfeitos. Em seguida, propõe-se um algoritmo baseado em código de canal, especificamente o código de repetição, para aprimorar o desempenho nesse contexto. Demonstra-se que o algoritmo proposto pode melhorar significativamente o desempenho e ajustando adequadamente os parâmetros, os erros no canal de retorno podem ser completamente eliminados.

Enquanto isso, em (15) é apresentado o problema dos nós ocultos como uma das questões mais desafiadoras na detecção espectral cooperativa. Os métodos existentes de detecção espectral baseada em aprendizado profundo não abordam adequadamente a modelagem do cenário de nós ocultos. Além disso, esses métodos não conseguem se adaptar às condições dinâmicas do canal no ambiente sem fio, pois não consideraram o efeito do ambiente de desvanecimento. Diante disso, é proposto a Redes de Convolução de Grafos (RCG), uma metodologia de detecção espectral cooperativa que se adapta às mudanças dinâmicas na rede de RC. Até onde se sabe, este é o primeiro trabalho a aplicar RCG para resolver o problema da detecção espectral cooperativa. Nas análises realizadas no trabalho considera-se RCs com múltiplas antenas de recepção, canais com desvanecimentos e canal de retorno imperfeito, onde foi possível comprovar a robustez do modelo de sensoriamento proposto.

No entanto, apesar da variedade de esforços científicos, ainda existe uma escassez de trabalhos voltados para aplicações mais realistas e práticas das técnicas de sensoriamento espectral. Nesse contexto, o presente estudo visa aprofundar a

exploração do sensoriamento espectral no cenário TVWS no Brasil, mas com uma abordagem mais realista, na qual se considera o sinal de transmissão do usuário primário em total conformidade com o que seria de fato encontrado na prática (OFDM do tipo ISDB-TB), além de prever aspectos de desvacamentos no sinal sensoriado e também de considerar interferências externas, tais como ruído AWGN e ruído impulsivo, com o foco em uma futura implementação prática em rádio definido por software.

1.3 Tema do projeto

O tema deste trabalho de conclusão de curso é o sensoriamento espectral cooperativo para rádios cognitivos, especificamente voltado para os espaços ociosos na faixa de TVWS no Brasil.

1.4 Objetivos gerais

O objetivo deste estudo é realizar, por meio de simulação, análises de desempenho da técnica de sensoriamento espectral cooperativa, baseadas em detecção de energia, aplicada em cenários realistas de TVWS no Brasil, com o objetivo final de possibilitar o uso oportunista do espectro em cenários de TV *White Space* no Brasil.

1.5 Objetivos específicos

Com o intuito de alcançar os objetivos gerais descrito acima, as atividades desse Projeto Final de Curso (PFC) serão realizadas da seguinte forma:

- a) Dominar conceitos fundamentais sobre Rádios Cognitivos;
- b) Estudar o sensoriamento espectral cooperativo e não cooperativo;
- c) Estudar a técnica de sensoriamento espectral de detecção de energia;
- d) Simular o desempenho da técnica de detecção de energia na forma cooperativa e não cooperativa usando o *software* MATLAB;
- e) Simular um sinal de transmissão de acordo com o padrão brasileiro de TV digital usando o *software* MATLAB;

- f) Integrar o sinal do usuário primário do padrão brasileiro de TV digital na simulação de sensoriamento espectral, avaliando o desempenho do sensoriamento dentro deste cenário de TVWS mais realista;
- g) A partir de simulações, avaliar o desempenho do sistema de sensoriamento espectral cooperativo e não cooperativo sob influência de desvanecimentos e de ruído impulsivo.

1.6 Justificativas

Com o avanço das tecnologias, surgem desafios na alocação de espectro, especialmente em frequências acima de 6 GHz e abaixo de 1 GHz. Enquanto frequências mais altas têm problemas de atenuação e complexidade, as mais baixas enfrentam o problema da escassez espectral. No entanto, há canais de TV subutilizados, especialmente em áreas rurais, que poderiam ser aproveitados para fornecer acesso à Internet em regiões remotas. O uso de sistemas de rádio cognitivos e sensoriamento espectral em TVWS oferece oportunidades para novos serviços sem interferir nas transmissões existentes de UPs. O estudo busca avançar nessa área para viabilizar comercialmente esses espaços espectrais.

1.7 Considerações finais

Neste capítulo, foram abordados tópicos relacionados ao contexto deste trabalho, que gira principalmente em torno da simulação de um sistema realista de sensoriamento espectral cooperativo com o objetivo de explorar TV *White Spaces* dentro da banda UHF com uma abordagem bem próxima da que seria encontrada em um sensoriamento espectral prático no Brasil.

Capítulo 2 - Referencial teórico

2.1 Considerações iniciais

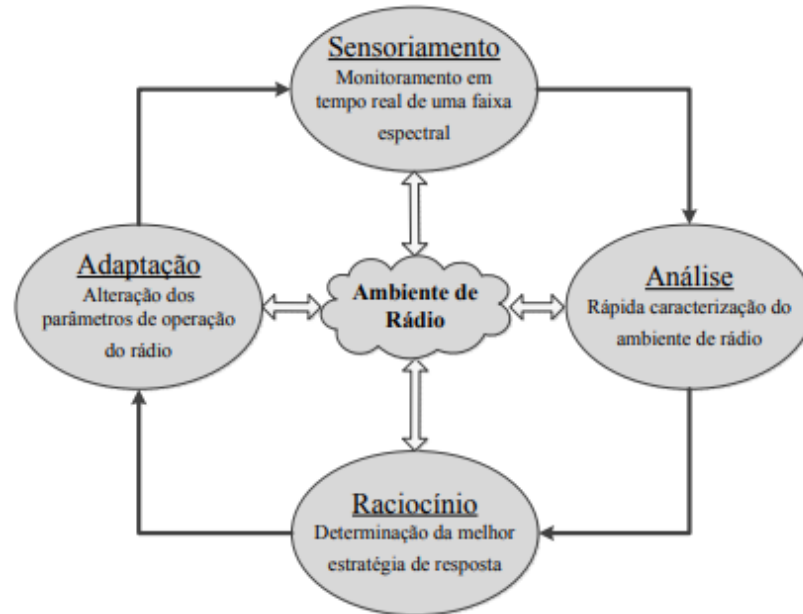
Com o objetivo de simular um sistema de sensoriamento espectral cooperativo para aplicação em cenários de TV *White Space* (TVWS), é necessário estabelecer um referencial teórico, conforme apresentado neste capítulo, que forneça o embasamento necessário para a execução das atividades propostas neste estudo.

2.2 Rádio cognitivo

O Rádio Cognitivo (RC) é um dispositivo que permitirá aos sistemas de comunicação do futuro usarem os recursos da rede de forma eficiente e flexível. Ele pode ajustar seus parâmetros de operação, como potência de transmissão e frequência, conforme as condições do ambiente mudam (16). Entre as características fundamentais de um RC estão sua capacidade cognitiva e configurabilidade (16,17). A capacidade cognitiva refere-se à aquisição de informações por meio do sensoriamento do ambiente. Usando essas informações adquiridas, um RC pode reconfigurar dinamicamente seus parâmetros de transmissão para obter desempenho otimizado, um recurso conhecido como reconfigurabilidade.

O ciclo operacional típico de um RC, representado na Figura 2.1, envolve monitorar uma banda específica, caracterizar o ambiente com base nas informações coletadas e ajustar a estratégia de resposta para garantir um desempenho adequado. Essa adaptação contínua e em tempo real é muito importante devido à natureza dinâmica do ambiente, onde novas transmissões ou cessação das existentes podem ocorrer a qualquer momento, evitando interferências com usuários primários.

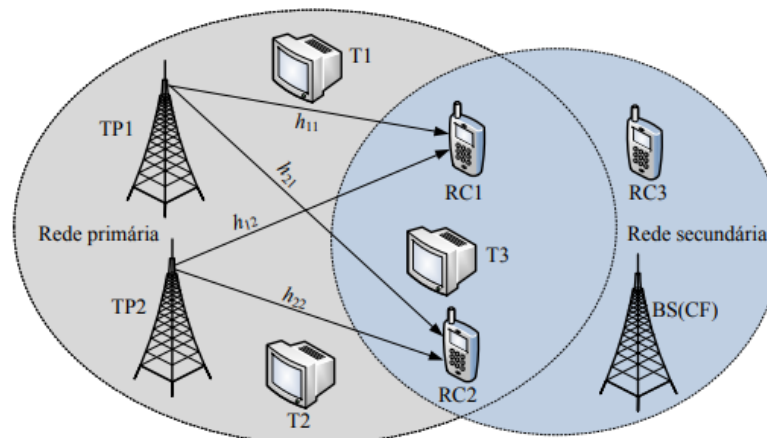
Figura 2.1 - Ciclo de um Rádio Cognitivo



Fonte: (18)

Em uma arquitetura de uma rede RC, também conhecida como *Dynamic Spectrum Access* (DSA) ilustrada na Figura 2.2 (18), há uma distinção entre uma rede primária e uma secundária. A primária consiste nos usuários primários com licenças para canais específicos, enquanto a secundária é formada por rádios cognitivos usados por usuários secundários quando os primários não estão ativos. Na Figura 2.2 TP se refere aos transmissores primários, T é o televisor com receptor da rede primária, RCs são os rádios cognitivos na rede secundária e BS(CF) se refere ao centro de fusão ou estação base da rede secundária.

Figura 2.2 - Arquitetura de rede DSA



Fonte: (18)

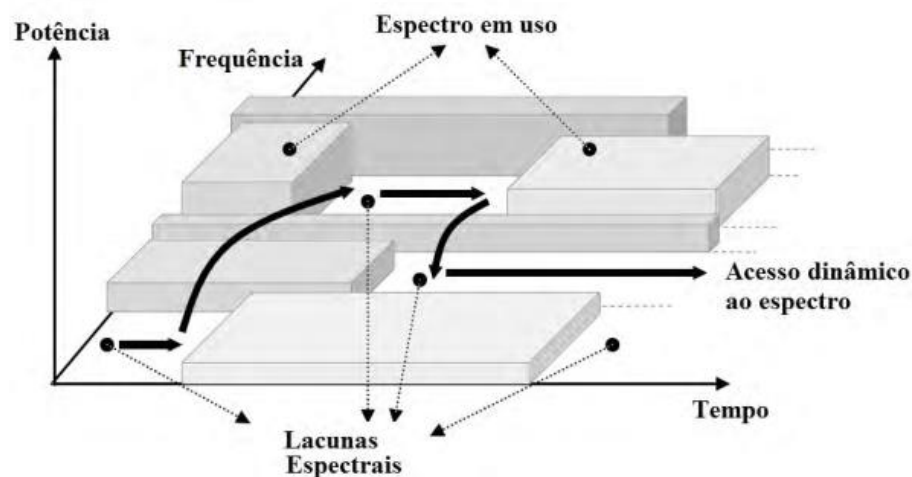
2.3 Sensoriamento espectral

O rádio cognitivo permite que os usuários examinem o espectro de frequências, procurando por oportunidades de transmissão em faixas que estejam temporariamente desocupadas. A detecção espectral é a fase encarregada de avaliar as bandas de frequência que possam ser aproveitadas oportunisticamente pelos usuários secundários (19).

Em essência, o sensoriamento espectral analisa se há usuários primários utilizando as bandas licenciadas. Quando não há usuários primários utilizando os canais disponíveis, são identificadas lacunas espectrais, que são faixas eletromagnéticas não utilizadas e podem ser aproveitadas por usuários cognitivos para operar de forma oportunista (20).

Quando um usuário licenciado é detectado operando, o usuário cognitivo deve liberar imediatamente o canal. Isso garante que o usuário primário tenha prioridade na ocupação e utilização daquela faixa de frequência. Enquanto isso, o usuário secundário deve ser capaz de procurar e usar outras faixas disponíveis para continuar sua transmissão (21). Esse funcionamento do sensoriamento espectral é detalhado na Figura 2.3.

Figura 2.3 - Utilização espectral oportunista por um RC.



Fonte: (18)

Existem duas grandes categorias de sensoriamento espectral o não cooperativo e o cooperativo. Na detecção não cooperativa, cada RC opera de forma individual e compete pela transmissão com outros rádios que possam ter tomado a mesma

decisão. Embora a implementação de técnicas de sensoriamento não cooperativas seja mais simples, elas sofrem com incertezas causadas por ruído no receptor, sombreamento e efeitos de desvanecimento por múltiplos percursos. Em situações de baixa relação sinal-ruído (SNR), a detecção não cooperativa pode não ser confiável e pode causar interferência na transmissão de usuários primários (UP).

A detecção cooperativa é uma solução proposta para minimizar os problemas do sensoriamento espectral não cooperativo. Ao combinar as informações de sensoriamento de vários USs, a precisão na decisão sobre o estado de ocupação do canal é elevada. O sensoriamento cooperativo pode ser categorizado em centralizado, distribuído e assistido por retransmissão, conforme explicado a seguir.

- Centralizado: Envolve um Centro de Fusão (CF) que recebe informações de todos os RCs da rede cooperativa e toma uma decisão global sobre a ocupação espectral (22).

- Distribuído: Usuários secundários trocam resultados de sensoriamento entre si, e os RCs em operação tomam decisões sobre a ocupação do canal sensoriado (12).

- Assistido por retransmissão: Esta técnica envolve a passagem de informações sensorizadas de um RC para um RC vizinho, que então retransmite as informações para o CF ou outros RCs. A eficácia reside no conceito de que os rádios podem ter melhores condições de comunicação com o terminal de destino do que outros. Assim, rádios com condições mais precárias podem transmitir informações para outro RC que pode retransmiti-las ao ponto de interesse (23).

2.3.1 Sistema sensoriamento espectral cooperativo e centralizado

O sensoriamento espectral cooperativo e centralizado utiliza a diversidade espacial como estratégia para mitigar os efeitos dos fenômenos de propagação em canais de comunicação sem fio. Nesse contexto, múltiplos rádios cognitivos são distribuídos em diferentes pontos dentro de uma área, formando uma rede secundária para realizar o sensoriamento espectral. Cada RC realiza independentemente o sensoriamento local de um sinal específico na rede primária. As informações resultantes do sensoriamento feito pelos diversos RCs são combinadas em um CF para tomar decisões globais sobre a presença ou ausência do sinal da rede primária.

A maneira como as informações de sensoriamento dos RCs são combinadas no CF para realização do sensoriamento espectral cooperativo centralizado é chamada

de técnica de fusão ou regra de fusão. As técnicas de fusão podem ser divididas em fusão de dados e fusão de decisões. Na fusão de dados, os USs enviam para o CF as amostras coletadas ou mesmo a própria estatística de teste calculada para a banda sensoriada, por exemplo o valor da energia detectada. A fusão de dados pode ser realizada através de técnicas como o combinador por ganho igual (EGC, do inglês *Equal Gain Combining*) na qual as informações de todos usuários tem o mesmo peso na geração da decisão global, ou o combinador por máxima relação (MRC, do inglês *Maximal Ratio Combining*), na qual as informações dos usuários são ponderadas com base em algum parâmetro de confiabilidade, por exemplo, USs com melhor condição de SNR podem ter um peso maior na decisão global que USs que operam em condições de sombra ou baixa SNR. Outra abordagem é a fusão de decisões, onde os USs compartilham suas decisões binárias sobre a presença ou ausência do sinal na banda. O centro de fusão em uma abordagem centralizada utiliza regras de fusão, como a K -em- M , onde a presença do usuário primário é decidida com base na declaração de pelo menos K entre os M usuários secundários, ou mesmo utilizar a regra "E" na qual o canal é considerado ocupado apenas se todos os USs tiverem detectado a presença de sinal.

O desempenho do sensoriamento na rede secundária é influenciado por vários fatores, incluindo o número de USs, a arquitetura da rede e a regra de fusão utilizada. A comparação desses desempenhos é um tema amplo. Este trabalho focará na análise do sensoriamento cooperativo, centralizado por fusão de amostras no CF considerando as bandas UHF e VHF para TVWS no Brasil.

2.3.2 Modelo básico de um sistema de sensoriamento espectral

De forma simplificada, utiliza-se um teste binário de hipóteses para o sensoriamento espectral, onde se monitora a banda em análise para determinar se está ocupada ou livre. As hipóteses H_0 e H_1 , que podem ser descritas matematicamente da seguinte forma:

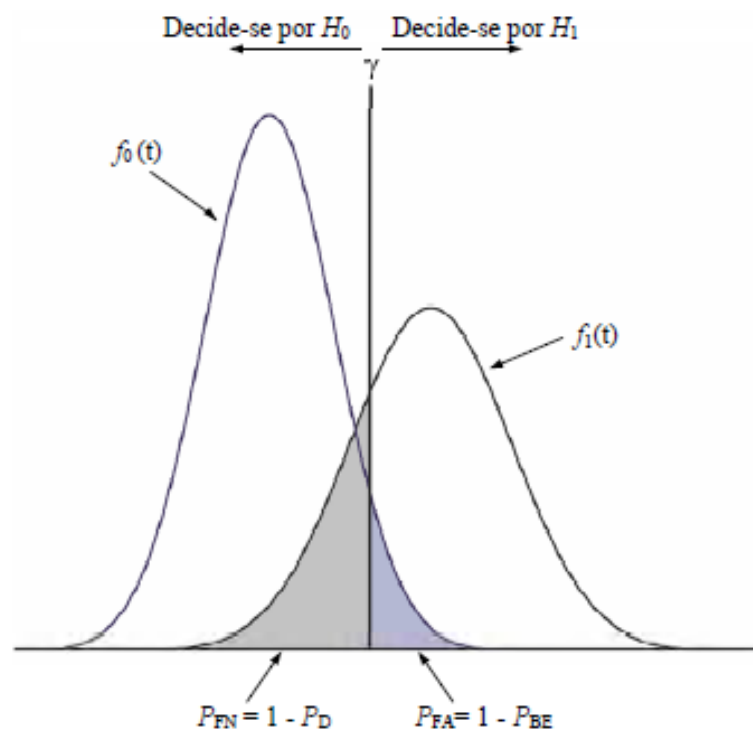
$$y(t) = \begin{cases} n(t) & : H_0, \\ h(t)x(t) + n(t) & : H_1, \end{cases} \quad (2.1)$$

onde $y(t)$ é o sinal capturado e analisado pelo RC, a hipótese H_0 indica que o canal está livre, uma vez que apenas o ruído térmico no receptor $n(t)$ é detectado; e a

hipótese H_1 indica que o canal está ocupado, pois tanto o sinal transmitido pelo UP $x(t)$, ponderado pelo ganho do canal de comunicação $h(t)$, quanto o ruído $n(t)$ são detectados.

Para que o RC realize efetivamente o processo de decisão de ocupação espectral, é essencial estabelecer um limiar de decisão, γ , e uma variável de decisão, T , gerada através do processamento de $y(t)$, o que dependerá da técnica de sensoriamento empregada. Assim, se $T > \gamma$, a decisão é pela ocupação espectral; caso contrário, o espectro é considerado disponível. Devido à aleatoriedade das amostras processadas, a variável de decisão T torna-se uma variável aleatória. Assim, a determinação da ocupação espectral torna-se um procedimento probabilístico, caracterizado por funções de densidade de probabilidade, conforme ilustrado na Figura 2.4. Aqui, $f_0(t)$ e $f_1(t)$ representam correspondentemente a função densidade de probabilidade (FDP) de T sob as hipóteses H_0 e H_1 . Com base nessas duas hipóteses, pode-se definir:

Figura 2.4 - Função densidade de probabilidade da variável aleatória T



Fonte: (18)

- A probabilidade de encontrar um buraco espectral, P_{BE} , que representa a probabilidade de encontrar um espaço espectral sem transmissão, dado que não há

realmente nenhum usuário primário transmitindo na banda sensoriada. Esta probabilidade é definida matematicamente como

$$P_{BE} = \Pr(H_0|H_0) = \Pr(T < \gamma|H_0) = \int_{-\infty}^{\gamma} f_0(t)dt \quad (2.2)$$

- A probabilidade de alarme falso, P_{FA} , que é a probabilidade de detectar um usuário primário transmitindo quando não há nenhuma transmissão real ocorrendo no canal analisado. Esta probabilidade é calculada através de

$$P_{FA} = 1 - P_{BE} = \Pr(H_1|H_0) = \Pr(T > \gamma|H_0) = \int_{\gamma}^{\infty} f_0(t)dt \quad (2.3)$$

- A probabilidade de detecção, P_D , que refere-se à probabilidade de detectar a transmissão de um usuário primário e de haver de fato um usuário primário transmitindo na banda. Esta probabilidade é definida matematicamente como

$$P_D = \Pr(H_1|H_1) = \Pr(T > \gamma|H_1) = \int_{\gamma}^{\infty} f_1(t)dt \quad (2.4)$$

- A probabilidade de falso negativo, P_{FN} , que é a probabilidade de detectar um espaço vazio enquanto houver um usuário primário transmitindo no canal. Esta probabilidade é calculada através de

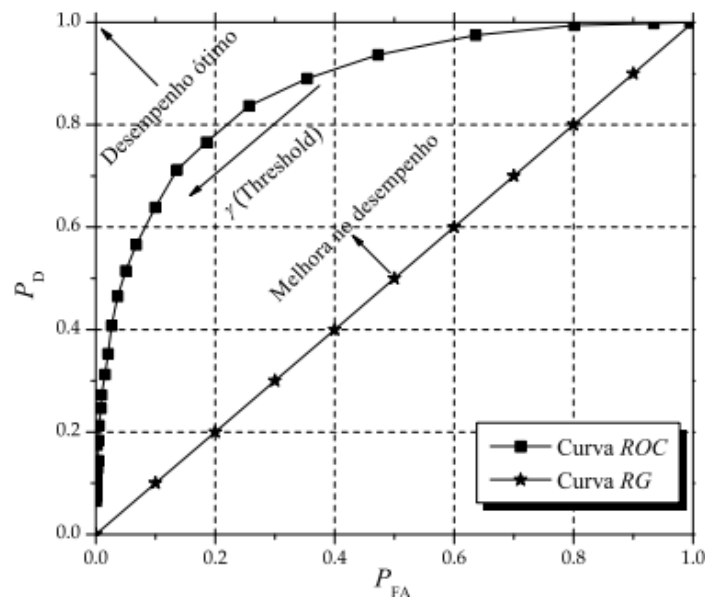
$$P_{FN} = 1 - P_D = \Pr(H_0|H_1) = \Pr(T < \gamma|H_1) = \int_{-\infty}^{\gamma} f_1(t)dt \quad (2.5)$$

Entre as quatro probabilidades descritas acima, P_{FA} e P_D são as principais métricas de desempenho utilizadas no contexto de sensoriamento espectral e, portanto, são empregadas em projetos de sensoriamento espectral em RCs (10).

A partir dos eventos discutidos anteriormente, é evidente que um limite de decisão ideal é aquele que maximiza P_D e P_{BE} enquanto minimiza P_{FA} e P_{FN} . No entanto, não é possível atingir um único γ que atinja tudo isso simultaneamente. Portanto, na prática, o limite de decisão é escolhido para atender a um requisito específico para a probabilidade de falso alarme, uma técnica conhecida como Taxa Constante de Falsos Alarmes (CFAR, do inglês *Constant False Alarm Rate*) (24).

As probabilidades P_{FA} e P_D , por serem concorrentes (aumentando-se uma, reduz-se a outra), são comumente expressas por meio de uma curva característica de operação do receptor (ROC, do inglês *Receiver Operating Characteristic*), conforme representada na Figura 2.5. A partir dela é possível observar a variação de P_D em função de P_{FA} à medida que o limiar de decisão γ (*Threshold*) é variado (18). A curva *random guess* (RG), também presente na Figura 2.5, 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.

Figura 2.5 - Representação de uma curva ROC



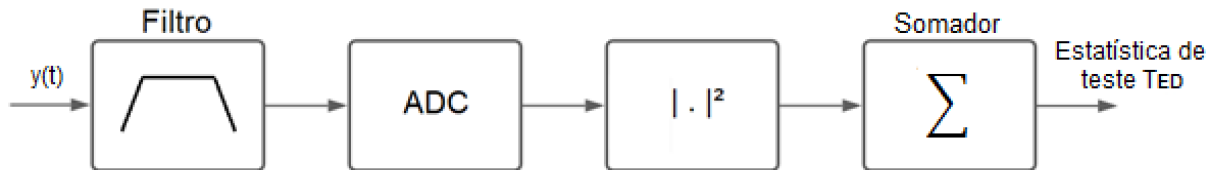
Fonte: (18)

2.3.3 Detecção de energia

Existem várias técnicas de detecção espectral disponíveis, entre as quais podem ser citadas, a detecção cicloestacionária (25), a detecção por filtro casado (26), e a detecção baseada em autovalores (27) e a detecção de energia (28), (29). Dentre elas, a detecção de energia é atualmente a técnica mais amplamente utilizada, devido à sua baixa complexidade de implementação. Ela é considerada uma técnica ótima quando não há conhecimento prévio do sinal de transmissão e o ruído não é uma

fonte de incerteza. Nesta técnica, a detecção da presença ou ausência do sinal é baseada no monitoramento da energia medida no canal, em comparação com um limiar de decisão. Apesar de ser uma técnica de detecção bem estabelecida, ela ainda atrai considerável atenção de pesquisadores em todo o mundo (30), (31). A Figura 2.6 ilustra o diagrama de blocos para a implementação da técnica de detecção de energia no domínio do tempo.

Figura 2.6 - Diagrama de blocos do detector de energia



Fonte: Autor.

Seguindo o diagrama de blocos mostrado na Figura 2.6, primeiro é usado um filtro passa-faixa centrado na frequência do canal de interesse. Subsequentemente, o sinal filtrado é convertido para a banda base e depois digitalizado por um conversor analógico-digital (ADC), gerando amostras que são elevadas ao quadrado. A estatística de decisão, T_{ED} , é então calculada de acordo com

$$T_{ED} = \sum_{i=1}^n |y(i)|^2, \quad (2.6)$$

onde n é o número total de amostras coletadas e $y(i)$ representa a i -ésima amostra digitalizada coletada pelo RC. Após o cálculo de T_{ED} , seu valor é comparado com γ para a tomada de decisão sobre qual das duas hipóteses, H_0 ou H_1 , será considerada. Na presença ou ausência do sinal primário, a variável de decisão possui uma distribuição qui-quadrado com n graus de liberdade (32). Considerando um número suficientemente grande de amostras, n , e utilizando o teorema do limite central, esta variável pode ser aproximada para uma variável aleatória Gaussiana, $T_{ED} = N(n\sigma_w^2, n\sigma_w^4)$ sob a hipótese H_0 e $T_{ED} = N(n(\sigma_s^2 + \sigma_w^2), n(\sigma_s^2 + \sigma_w^2)^2)$ sob a hipótese H_1 , e assim, as probabilidades de falso alarme e detecção podem ser resolvidas numericamente, dadas respectivamente por

$$P_{FA} = Q\left(\frac{\gamma - n\sigma_w^2}{\sqrt{n\sigma_w^4}}\right), \quad (2.7)$$

e

$$P_D = Q\left(\frac{\gamma - n(\sigma_s^2 + \sigma_w^2)}{\sqrt{n(\sigma_s^2 + \sigma_w^2)^2}}\right), \quad (2.8)$$

onde σ_w^2 e σ_s^2 são as variâncias do ruído e do sinal de UP, respectivamente; $Q(\cdot)$ é a função Q, comumente usada para resolver problemas que envolvem integração numérica de área em distribuições Gaussianas.

Suponha que o canal considerado seja do tipo Rayleigh com desvanecimento lento, modelando um ambiente de rádio móvel sem visada direta (nLoS, do inglês *Non-Line-of-Sight*). Nesse caso, a razão sinal-ruído variará aleatoriamente em cada período de sensoriamento, exibindo um comportamento estatístico descrito por uma função densidade de probabilidade exponencial como

$$f_\delta(\delta) = \frac{1}{\bar{\delta}} e^{-\frac{\delta}{\bar{\delta}}}, \quad (2.9)$$

onde δ e $\bar{\delta}$ referem-se à SNR instantânea e média, respectivamente. Neste caso, a probabilidade média de detecção é dada em sua forma integral por

$$\bar{P}_D = \int_0^\infty \frac{1}{\bar{\delta}} e^{-\frac{\delta}{\bar{\delta}}} Q\left(\frac{\gamma - n(\bar{\delta} + 1)}{\sqrt{n(\bar{\delta} + 1)^2}}\right) d\delta. \quad (2.10)$$

Para definir o limiar a ser utilizado, é usado um valor constante para a taxa de falso alarme, que pode ser calculado isolando γ na equação (2.7), e então

$$\gamma = \sigma_w^2(Q^{-1}(P_{FA})\sqrt{n} + n). \quad (2.11)$$

A versão cooperativa da técnica de detecção de energia será considerada neste trabalho, na qual todos os m RCs da rede secundária enviam suas amostras coletadas para um centro de fusão (CF) onde elas são usadas para calcular uma variável de decisão conjunta, calculada de maneira similar à calculada na equação (2.6), mas usando amostras de todos os RCs, totalizando $m \times n$ amostras processadas, o que tende a melhorar a confiabilidade das decisões.

2.4 Ruído impulsivo

O ruído impulsivo (RI) é uma forma de interferência indesejada que pode afetar sistemas de comunicação, incluindo telecomunicações e sistemas de sensoriamento espectral. Esse tipo de ruído é caracterizado por impulsos repentinos e de curta duração, que podem ser causados por uma variedade de fontes. Uma das principais causas do ruído impulsivo é a interferência eletromagnética gerada por dispositivos elétricos, como motores, interruptores, transformadores e equipamentos de soldagem. Além disso, descargas atmosféricas, como raios, também podem contribuir para a ocorrência desse tipo de ruído. O impacto do ruído impulsivo nos sistemas de comunicação é significativo, pois pode causar distorção ou até mesmo a perda de dados transmitidos. Em sistemas de sensoriamento do espectro, o ruído impulsivo pode aumentar a probabilidade de falso alarme ou reduzir a probabilidade de detecção de um buraco espectral, comprometendo a precisão das medições.

Um dos objetivos deste trabalho é analisar a influência do ruído impulsivo no desempenho do sensoriamento espectral cooperativo e não cooperativo em TVWS, uma vez que em vários trabalhos relacionados esse tipo de ruído não tem sido considerado.

2.4.1 Modelo do ruído impulsivo

O modelo de ruído impulsivo utilizado nesse trabalho foi proposto em (33) e (34). Neste modelo, assume-se que o número de pulsos de ruído impulsivo, em um determinado intervalo de tempo, segue uma distribuição de Poisson (33). Desta forma, o intervalo entre as ocorrências pode ser modelado através de uma distribuição exponencial, dada por:

$$f(t) = \frac{-1}{\beta} e^{\frac{1}{\beta}t}, \quad (2.12)$$

onde t é o intervalo de tempo entre pulsos consecutivos e β é a separação média entre eles. Assim, sem perda de generalidade, para calcular o número de amostras de separação entre dois pulsos de RI, gera-se um número aleatório com distribuição exponencial de média β amostras.

A amplitude do pulso segue uma distribuição Log-normal (33, 34, 35). Assim, com o propósito de gerar os valores das amplitudes do ruído impulsivo, uma variável aleatória gaussiana Z com média A [dB μ V] e desvio padrão B [dB] é gerada. Então, o valor $Z=z$ [dB μ V] é convertido para sua forma z [μ V], como a seguir:

$$z[\mu V] = 10^{\frac{z[\text{dB}\mu V]}{20}}. \quad (2.13)$$

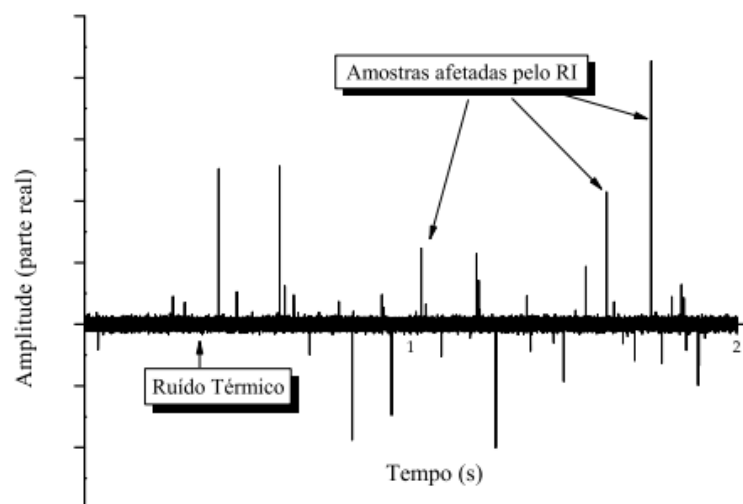
A fase do ruído impulsivo é modelada através de uma variável aleatória θ , com distribuição uniforme entre $(0, 2\pi]$. Assim, conhecendo-se a magnitude z e a fase θ das amostras de ruído impulsivo, as componentes em fase e quadratura do ruído impulsivo podem ser expressas por:

$$I = z \cos(\theta), \quad (2.14)$$

$$Q = z \sin(\theta).$$

Em ambientes reais, nem todas as amostras serão contaminadas com o ruído impulsivo, mas todas elas serão afetadas pelo ruído térmico. A Figura 2.7 ilustra um exemplo de ruído impulsivo gerado a partir do modelo proposto em (33) e (34).

Figura 2.7 - Ruído impulsivo mais ruído térmico.



Fonte: (21)

Nesta figura, a média da magnitude do pulso é $A=70$ [dB μ V], o desvio padrão $B=8.5$ [dB], $\beta=900$ (indicando que em média existem 900 amostras entre dois pulsos

consecutivos de ruído impulsivo), a potência de ruído térmico é de 50 [dB μ V], a frequência de amostragem é 30 kHz, e o tempo total de análise é de dois segundos, totalizando 60.000 amostras.

No Capítulo 4, através de simulações, será avaliado o impacto do ruído impulsivo no sensoriamento espectral em cenários de TVWS.

2.5 Sinal de usuário primário em cenário de TVWS no Brasil (ISDB-TB)

Para compreender as características dos sinais de usuário primário nas faixas de *TV White Spaces* no Brasil, visando sua futura implementação em simulações de sensoriamento espectral, é essencial compreender o sistema brasileiro de transmissão de TV digital.

O padrão de TV digital adotado no Brasil é conhecido como Radiodifusão Digital de Serviços Integrados - Terrestre Brasileiro (ISDB-TB, do *inglês Integrated System Digital Broadcasting - Terrestrial Brazil*). Este padrão é altamente flexível em termos de configurações possíveis, especialmente quando comparado com outros padrões de TV digital em todo o mundo (36). Esta flexibilidade permite atender diversos tipos de serviços, tanto em cenários de recepção móvel como fixa. Oferece transmissão em três modos operacionais distintos (1, 2 e 3), diferindo pelo número de portadoras utilizadas na formação dos símbolos de transmissão OFDM (2048 portadoras, 4096 e 8192).

O sistema ISDB-TB emprega processamento hierárquico, onde a faixa de transmissão de 6 MHz é subdividida em 14 segmentos. Um segmento é usado como banda de guarda entre canais adjacentes e os outros 13 segmentos (segmentos úteis) podem ser alocados em até 3 camadas hierárquicas distintas (A, B e C). Cada camada hierárquica pode ser configurada com diferentes parâmetros de transmissão, como taxa de código de correção de erros, modulação e profundidade de entrelaçamento na etapa de codificação do canal.

De uma forma geral, o padrão ISDB-TB é composto principalmente por um codificador, um multiplexador, um modulador e um amplificador de acordo com a norma ABNT NBR 15601 (37), que especifica o sistema de TV brasileiro. Na etapa de codificação são recebidos sinais de vídeo, áudio e dados para compressão, utilizando

o padrão MPEG-4 no contexto brasileiro. Isto porque, em termos de taxa de dados, é impraticável transmitir diretamente os sinais de um determinado programa, que originalmente poderia ter taxas variando de centenas de Mbps a Gbps. Durante a codificação, as informações são organizadas em pacotes de tamanho fixo, 188 bytes, conhecidos como *Transport Stream* (TS). O TS pode transportar vídeo, áudio e informações adicionais sobre o fluxo.

Esse sinal de usuário primário em cenário de TVWS no Brasil, considerado nas simulações de sensoriamento espectral avaliadas neste trabalho é um sinal OFDM que pode ser descrito matematicamente por.

$$s(t) = \text{Re}\left\{e^{j2\pi f_c t} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{K-1} c(n, k) \Psi(n, k, t)\right\}, \quad (2.15)$$

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

onde 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 entendimento teórico do sinal de transmissão ISDB-TB, torna-se viável simular o sinal UP de maneira consistente com o que seria encontrado em um ambiente real de sensoriamento espectral dentro das bandas de frequência do TVWS.

Capítulo 3 - Materiais e Métodos

3.1 Considerações iniciais

O objetivo final deste trabalho é analisar o desempenho de técnicas de sensoriamento espectral cooperativas e centralizadas por fusão de amostras, visando compreender 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, uma avaliação de desempenho foi utilizada.

3.2 Recursos necessários

Para desenvolver um sistema simulado de sensoriamento espectral para operação em faixas de TVWS, primeiramente foi necessário um estudo teórico abrangendo artigos, livros, dissertações, normas e teses, focando nos assuntos mais relevantes necessários para facilitar a implementação. Iniciando com uma exploração de conceitos fundamentais sobre rádios cognitivos, e sensoriamento espectral. Na sequência, foi realizado um estudo das principais características dos sinais de TV no padrão ISDB-TB, uma vez que o projeto está centrado na utilização de bandas de TVWS no Brasil. Por fim, uma análise teórica sobre ruído impulsivo também foi realizada com o intuito de entender as principais causas, modelos e impactos desse fenômeno.

Após o estudo teórico, simulações de sensoriamento espectral em TVWS foram desenvolvidas utilizando MATLAB. Inicialmente, foi simulado um sinal OFDM compatível com o padrão ISDB-TB, espelhando as especificações encontradas nas transmissões de TV no Brasil, incluindo duração, largura de banda de transmissão, taxa de bits, intervalos de guarda, taxa de codificação, entre outros. Posteriormente, simulações de detecção espectral foram construídas com o sinal OFDM gerado anteriormente atuando como sinal primário do usuário. Por último, o RI foi implementado e integrado na simulação de sensoriamento. Através dessas simulações, foi possível avaliar o impacto de diversos parâmetros do sistema de sensoriamento espectral em métricas de desempenho típicas para este tipo de aplicação, como probabilidade de detecção, probabilidade de falsos alarmes e curvas ROC.

Capítulo 4 - Simulação de sensoriamiento espectral cooperativo em TVWS

4.1 Considerações iniciais

Neste capítulo, descrevemos as simulações conduzidas para simular em MATLAB um sistema de detecção espectral cooperativo nas bandas de TVWS, com presença de ruído térmico, ruído impulsivo e desvanecimentos.

4.2 Simulação do sinal do usuário primário

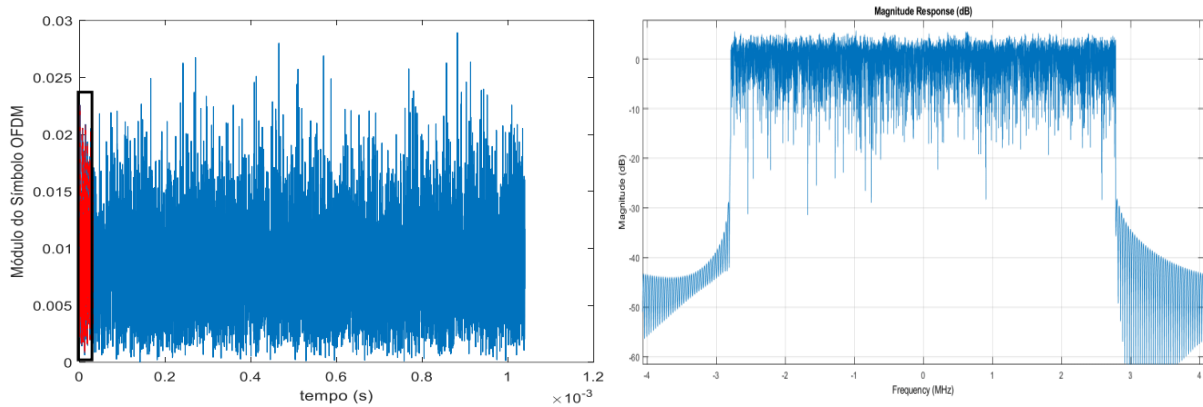
Nesta seção, é apresentada a simulação do sinal do usuário primário OFDM, em conformidade com as características típicas de um sinal do padrão ISDB-TB. Esta implementação baseou-se nos princípios teóricos expostos na seção 2.5. Os parâmetros empregados na construção do sinal OFDM estão detalhados a seguir: modo de operação = 3, intervalo de guarda = $1/32$, número de segmentos = 13, ordem da modulação = 64-QAM, taxa de codificação = $7/8$, banda útil = 5,57 MHz.

Para gerar o sinal OFDM no modo em questão, primeiramente é criado aleatoriamente um vetor composto por 5617 símbolos complexos organizados em uma estrutura de quadro OFDM. Em seguida, esse vetor de símbolos é paralelizado para a multiplexação por divisão de frequências ortogonais, realizada por meio da operação matemática IFFT (Transformada Rápida de Fourier Inversa). Isso gera um sinal complexo no domínio do tempo, composto por 8192 amostras (modo 3) na frequência de amostragem da IFFT (512/63 MHz), representando o símbolo OFDM útil. Para concluir, é adicionado um intervalo de guarda de $1/32$ ao início do símbolo OFDM.

A Figura 4.1 (a) exhibe o módulo do sinal OFDM gerado no domínio do tempo, destacando o intervalo de guarda. É muito importante ressaltar que o símbolo OFDM

em questão apresenta 5617 símbolos complexos multiplexados em frequência. O sinal gerado possui uma banda útil de 5,57 MHz, conforme a Figura 4.1 (b), que apresenta o espectro estimado do sinal OFDM gerado.

Figura 4.1 – (a) Módulo do sinal OFDM e (b) Espectro do sinal OFDM



Fonte: Autor.

O sinal OFDM produzido em banda base será empregado nas simulações de sensoriamento espectral para simular o sinal de possíveis usuários primários que podem utilizar as faixas designadas para TVWS.

4.3 Simulação do Ruído impulsivo

Nesta seção, é abordado a simulação do ruído impulsivo, descrevendo detalhadamente o processo de geração e sua aplicação em um contexto de sensoriamento espectral cooperativo. A implementação baseou-se nos princípios teóricos expostos na seção 2.4, e considerou um cenário de sensoriamento no qual existem m RCs sensoriando e o ruído impulsivo pode ocorrer com uma probabilidade P_{in} , afetando um percentual de P_{cr} rádios. A seguir são descritos todos os parâmetros de entrada da função de geração do RI para o cenário de sensoriamento espectral:

- (m): Indica a quantidade de RCs no sistema de sensoriamento.
- (n): Define o número de amostras coletadas por cada RC.
- (P_{in}): Indica a probabilidade de ocorrência de RI.
- (P_{cr}): Representa a porcentagem média de RCs afetados pelo RI.
- (K): Indica a razão entre a potência do RI e a potência do ruído térmico.
- (A): Define a média da amplitude do RI com distribuição Log-normal.
- (B): Representa o desvio padrão das amplitudes de RI Log-normal.

- (β): Indica o espaçamento médio entre as amostras de RI.
- (SNR): Define a relação sinal-ruído quando o UP transmitindo for considerado.

O processo de geração do ruído impulsivo segue uma série de etapas para modelar sua presença em um sistema de sensoriamento espectral. Inicialmente, presença do ruído impulsivo no sistema é determinada inicialmente por meio de uma variável aleatória de Bernoulli. Essa variável possui uma probabilidade de sucesso igual a P_{in} , indicando probabilidade de ocorrência do ruído impulsivo. Se o ruído impulsivo estiver presente na simulação, a próxima etapa é determinar quais rádios serão afetados por ele. Isso é feito utilizando uma variável aleatória binomial, onde a probabilidade de sucesso (um rádio ser afetado) é definida como P_{cr} .

Após a identificação dos RCs afetados, o ruído impulsivo é gerado de forma aleatória. Para cada RC afetado, são geradas amostras de ruído impulsivo com base no espaçamento médio entre as amostras de RI, representado por β . Esse espaçamento determina a frequência com que o ruído impulsivo é introduzido no sistema e é obtido na simulação por meio da geração de uma variável aleatória exponencial de média β .

Durante a geração das amostras de RI, para cada posição determinada como afetada, uma amplitude é calculada a partir de uma distribuição log-normal com média (A) e desvio padrão (B). Essa amplitude representa a magnitude do ruído impulsivo. Além disso, uma fase é aleatoriamente selecionada dentro do intervalo $(0, 2\pi]$ para cada amostra afetada.

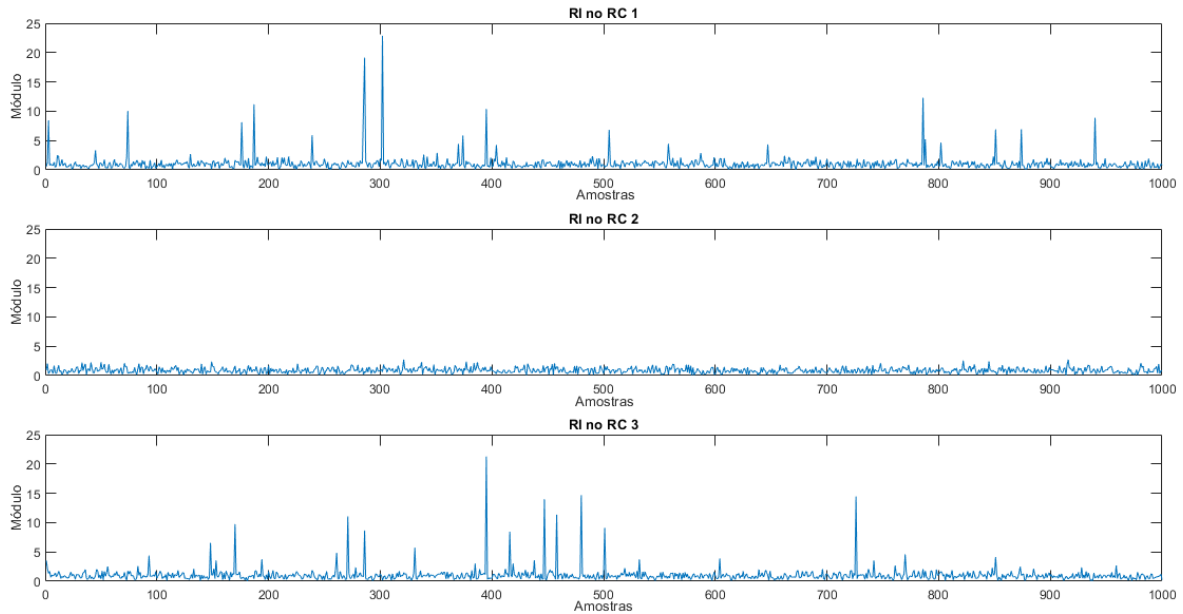
Após a geração das amostras de ruído impulsivo, é realizada uma etapa para eliminar o RI nos RCs não afetados. Isso é feito multiplicando o ruído gerado para os m RCs da rede cooperativa por uma matriz diagonal que indica quais deles serão corrompidos pelo RI.

Finalmente, o ruído gerado é normalizado e aplicado ao sistema. O vetor contendo as amostras de ruído impulsivo para cada RC é dividido pela raiz quadrada de sua energia e multiplicado por um fator de normalização específico, (\sqrt{K}) , garantindo que o RI fique com potência K vezes maior que a do ruído térmico, que foi considerado como tendo potência unitária na simulação desenvolvida.

A Figura 4.2 apresenta um exemplo de ruído impulsivo para o cenário cooperativo gerado a partir dessa simulação. Nesta figura, é apresentado o ruído impulsivo somado com o ruído térmico branco. Na simulação foram usados os

seguintes parâmetros: $m = 3$, $n = 1000$, $K = 2$, $P_{in} = 1$, $P_{cr} = 0.7$, $A = 500$, $B = 7.5$, $\beta = 30$ e $SNR = -10$ dB.

Figura 4.2 - Ruído impulsivo mais ruído térmico para 3 RCs.



Fonte: Autor.

A análise dos gráficos apresentados na Figura 4.2 revela o perfil do ruído impulsivo experimentado pelos três diferentes RCs. É possível ver que, apenas o RC 1 e o RC 3 possuem amostras afetadas pelo ruído impulsivo, enquanto que o RC 2 enfrenta apenas o ruído térmico, sem a influência do ruído impulsivo. Esta diferença é atribuída à presença do ruído impulsivo em cada rádio, uma condição determinada pelo parâmetro P_{cr} na simulação, cujo valor é 0,7 (70%). Ou seja, é bem provável que, dentre os três RCs, pelo menos um não seja afetado pelo ruído impulsivo, dado o valor de P_{cr} considerado.

Essa observação destaca a aleatoriedade da ocorrência do ruído impulsivo e destaca a importância de compreender e modelar sua presença para uma operação eficiente de sensoriamento espectral. Por fim, é possível observar também que o resultado obtido nessa simulação é bastante similar ao apresentado na teoria e exemplificado na Figura 2.7.

Esse sistema de geração do ruído impulsivo será integrado nas simulações de sensoriamento espectral que serão descritas na subseção a seguir.

4.4 Simulação do sensoriamento espectral

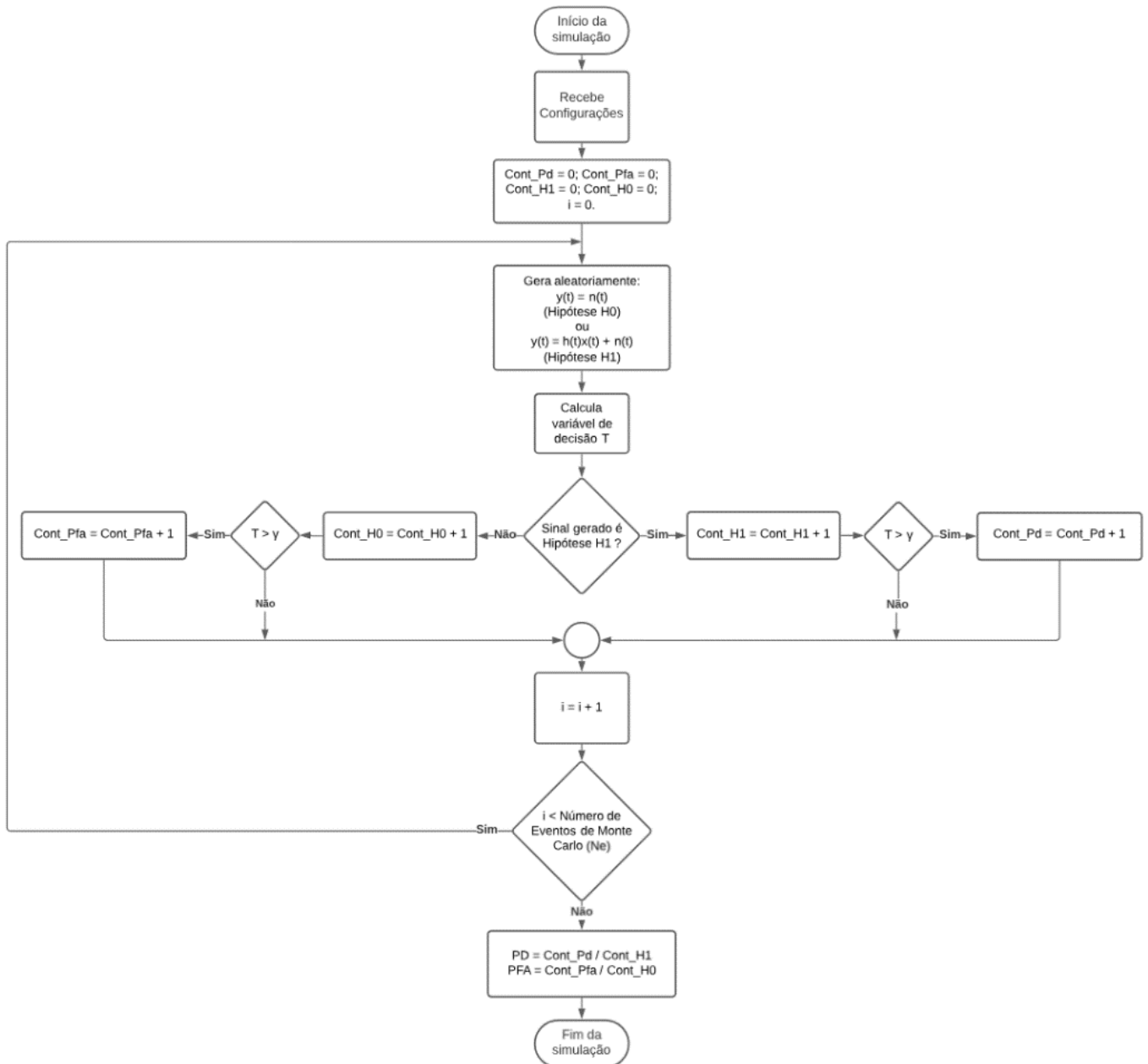
Com o intuito de avaliar o desempenho do sensoriamento espectral em um cenário realista de TVWS, uma simulação foi desenvolvida no software MATLAB, baseando-se na teoria apresentada na seção 2.3. Os códigos-fonte dessa simulação estão disponíveis para download em (38). No contexto dessa simulação, o sinal de transmissão do usuário primário (UP), denotado por $x(t)$, é aquele apresentado na seção 4.2. O ganho do canal, $h(t)$, é gerado por amostras aleatórias com distribuição Rayleigh de variância unitária (simulando a ausência de visada direta entre o transmissor primário e o Rádio Cognitivo - RC), e o ruído $n(t)$ considerado é o AWGN com média zero e variância unitária. O ruído impulsivo explicado na seção 2.4 e simulado na seção 4.3 também é considerado na simulação de sensoriamento espectral. A técnica de sensoriamento utilizada nas simulações é a detecção de energia, detalhada na seção 2.3.3. A variável de decisão T , utilizada para determinar a ocupação espectral, é calculada conforme apresentado na Equação 2.6, apenas com a adaptação de que para o caso cooperativo, é considerada no somatório da equação todas amostras coletadas e enviadas para o CF por todos os RCs da rede cooperativa.

Conforme previsto na teoria apresentada na seção 2.3, as principais métricas de avaliação do desempenho do sensoriamento espectral estão relacionadas às probabilidades de detecção e falso alarme. A estimação desses parâmetros é realizada utilizando o método de Monte Carlo (39), onde extensos experimentos aleatórios sob as hipóteses H_0 e H_1 são conduzidos para determinar essas probabilidades.

A simulação desenvolvida tem como parâmetros de entrada o número de RCs (m), o número de amostras coletadas por cada RC (n), o número de transmissores primários (p), a relação sinal-ruído, o limiar de decisão, o número de eventos de Monte Carlo (N_e) da simulação, a relação entre a potência do RI e a potência do ruído térmico presente no sistema (K), a probabilidade de ocorrência do RI (P_{in}), a porcentagem média de RCs afetados pelo RI (P_{cr}), o espaçamento médio entre as amostras de RI (β), a média da amplitude do RI com distribuição Log-normal (A), o desvio padrão das amplitudes de RI Log-normal (B), e por fim é definido também se a simulação utilizara um canal AWGN ou um canal Rayleigh. O fluxograma apresentado na Figura 4.3

demonstra como as probabilidades de detecção e de falso alarme podem ser obtidas via simulação para cada ponto de análise.

Figura 4.3 - Fluxograma para obter PD e PFA na simulação.



Fonte: Autor.

Para a avaliação do desempenho do sensoriamento espectral, a simulação será executada com SNR fixa e limiar de decisão variável, possibilitando a geração da curva ROC, da curva de Probabilidade de Detecção (P_D) e Probabilidade de Falso Alarme (P_{FA}) em função do limiar, bem como a análise de histogramas com possíveis valores da variável de decisão T sob hipótese H_0 e H_1 .

O desempenho do sensoriamento espectral em cenário de TVWS cooperativo e não cooperativo será avaliado em diversas situações, variando parâmetros como a relação sinal-ruído, o número de amostras coletadas por um rádio cognitivo, o limiar de decisão, tipo de canal, além de todos os parâmetros relacionados com o ruído impulsivo, visando compreender como esses parâmetros afetam o sensoriamento espectral em cenários mais realistas de TVWS.

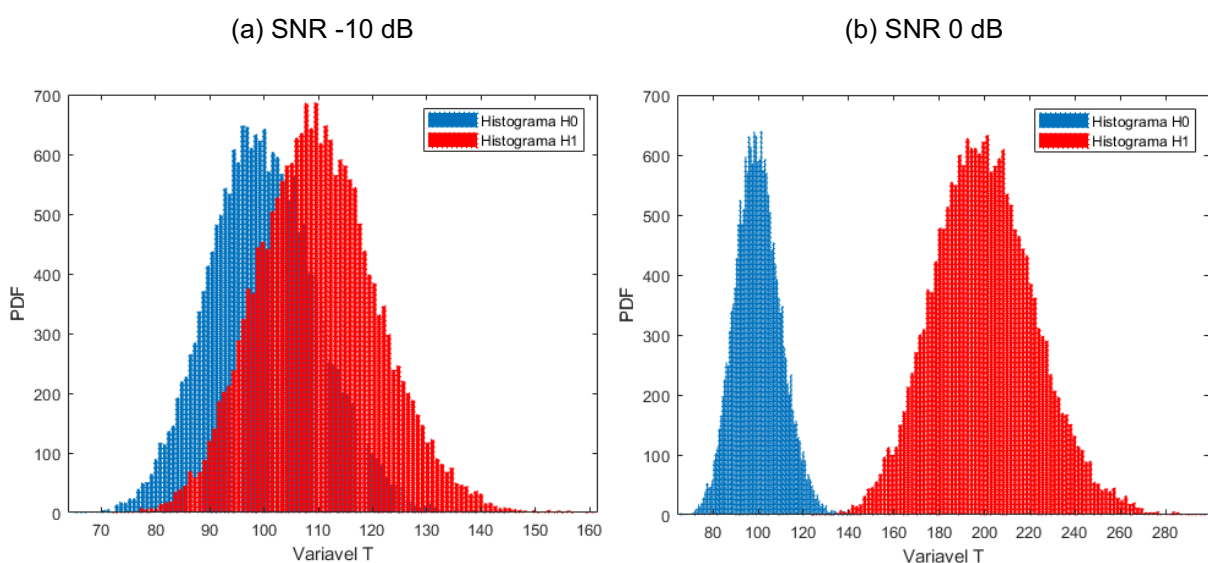
Capítulo 5 - Resultados das Simulações

Nesta seção, os resultados de desempenho do sensoriamento espectral são apresentados para vários cenários de análise. Todas as curvas de desempenho exibidas foram derivadas da simulação realizada no software MATLAB, considerando 20 mil eventos de Monte Carlo.

5.1 Distribuição estatística da variável de decisão T_{ED}

As análises realizadas nesta subseção têm como objetivo verificar a influência da relação sinal-ruído e do número de rádios cognitivos na distribuição da variável de decisão. A Figura 5.1 apresenta as funções densidade de probabilidade empíricas (histogramas) para a estatística de teste T_{ED} , geradas pela simulação sob as seguintes configurações: $m = 2$, $n = 50$, $p = 1$, SNR = -10 dB (a) e SNR = 0 dB (b). Os histogramas representam a estatística de teste T_{ED} sob as hipóteses H_0 (ausência de sinal primário) e H_1 (presença de sinal primário).

Figura 5.1 - Histogramas para diferentes valores de SNR.



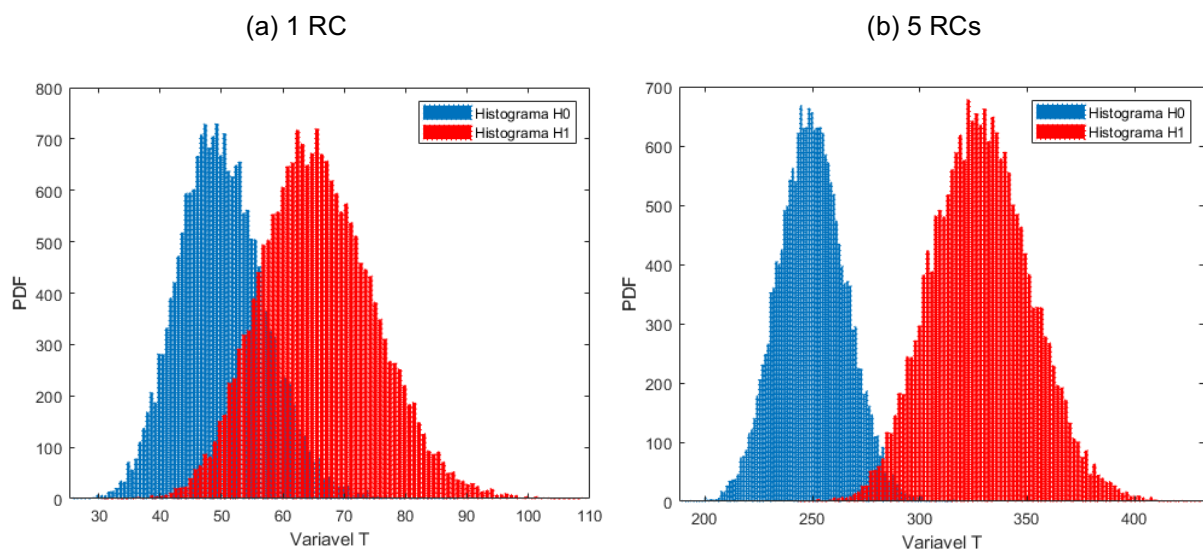
Fonte: Autor.

Ao analisar o resultado apresentado na Figura 5.1, para ambos os casos de SNR, constata-se que, de fato, a distribuição da variável de decisão T_{ED} é gaussiana, tanto sob a hipótese H_0 quanto sob a hipótese H_1 , com médias e variâncias de acordo com aquelas apresentadas na seção 2.3.3. Isso confirma que a simulação está em conformidade com a teoria.

Como conclusão, observa-se que, quando há ruído AWGN e a SNR é aumentada, a média da variável de decisão T_{ED} sob a hipótese H_1 também aumenta. Esse aumento contribui para elevar a probabilidade de detecção para um limiar γ fixo, corroborando a relação esperada entre SNR e desempenho na detecção de sinais.

Agora com o intuito de verificar o impacto do número de rádios cognitivos na distribuição da variável de decisão, foram realizadas mais duas simulações. A Figura 5.2 apresenta as funções densidade de probabilidade empíricas para a estatística de teste T_{ED} , geradas pelas simulações sob as seguintes configurações: SNR = -5 dB, $n = 50$, $p = 1$, $m = 1$ (a) e $m = 5$ (b).

Figura 5.2 - Histogramas para diferentes valores de “m”.

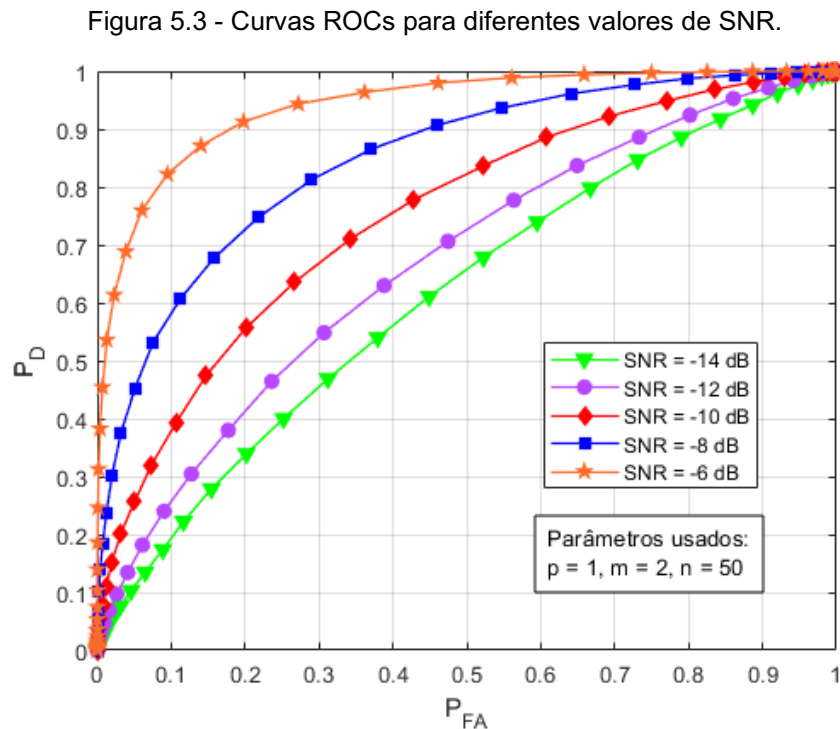


Fonte: Autor.

Comparando os resultados apresentados nas Figuras 5.2 (a) e 5.2 (b), é possível verificar que ocorre um aumento de média dos histogramas sob hipótese H_0 e H_1 quando se altera de $m = 1$ para $m = 5$, diminuindo a área de intersecção entre eles, o que irá se refletir em um aumento de probabilidade de detecção e uma redução da probabilidade de falso alarme. O que era de certa forma esperado, uma vez que se tem mais RCs coletando amostras e isso irá facilitar a obtenção de uma decisão mais precisa sobre a ocupação espectral.

5.2 Impacto da variação de SNR na curva ROC para cenário cooperativo

Com o intuito de avaliar como diferentes valores de SNR afetam o desempenho do sistema de sensoriamento cooperativo, a simulação foi executada utilizando os seguintes parâmetros: canal AWGN, $p = 1$, $m = 2$, $n = 50$ e SNR = -14, -12, -10, -8 e -6 dB. O desempenho obtido, expresso em termos de curvas ROC para cada valor de SNR considerado, é apresentado na Figura 5.3.



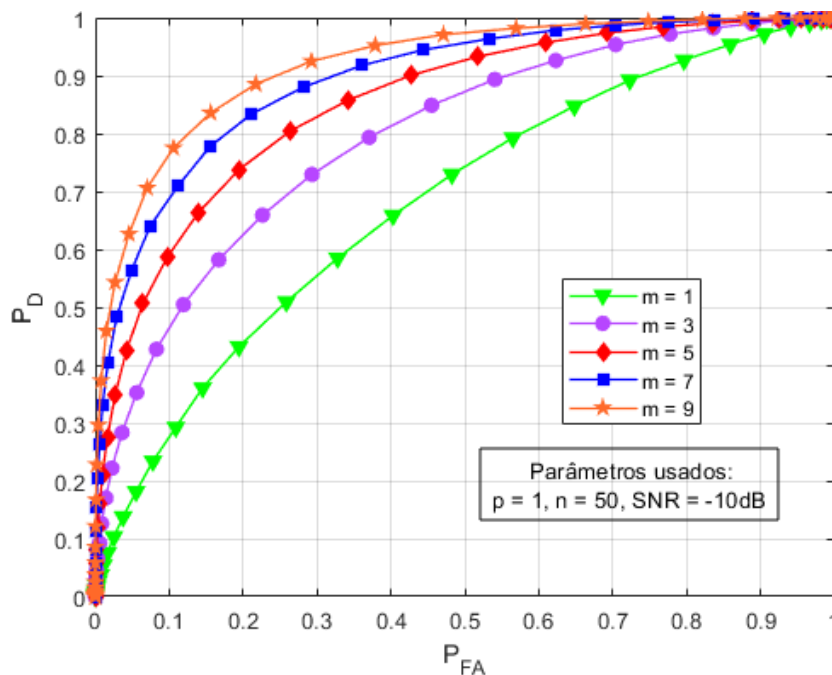
Fonte: Autor.

Ao analisar as curvas na Figura 5.3, observa-se que o pior desempenho é alcançado quando se considera SNR = -14 dB. Fazendo uma comparação curva a curva, nota-se uma melhora significativa no desempenho quando a SNR é de -6 dB, confirmando a expectativa de que o aumento da SNR leva as curvas a convergirem para o ponto ótimo. Isso evidencia que a SNR é um dos fatores cruciais no desempenho do sistema. Valores mais altos de SNR melhoram a detecção efetiva do sinal do usuário primário ou, em outras palavras, resultam em um aumento da probabilidade de detecção.

5.3 Comparação de desempenho entre sistema não cooperativo e cooperativo para diferentes valores de RCs.

A seguinte análise de desempenho considera a comparação de um cenário não cooperativo com cenários cooperativos, nos quais cada RC da rede cooperativa coleta e envia n amostras para o CF, em que a estatística de decisão será computada de forma conjunta. Para essa simulação, foram considerados os seguintes parâmetros: canal AWGN, $\rho = 1$, $n = 50$, SNR = -10 dB e $m = 1, 3, 5, 7$ e 9 . O resultado da simulação é apresentado na Figura 5.4. É importante destacar que, para esta simulação, 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 na transferência de amostras foi considerado.

Figura 5.4 - Curvas ROCs para diferentes valores de “ m ”.



Fonte: Autor.

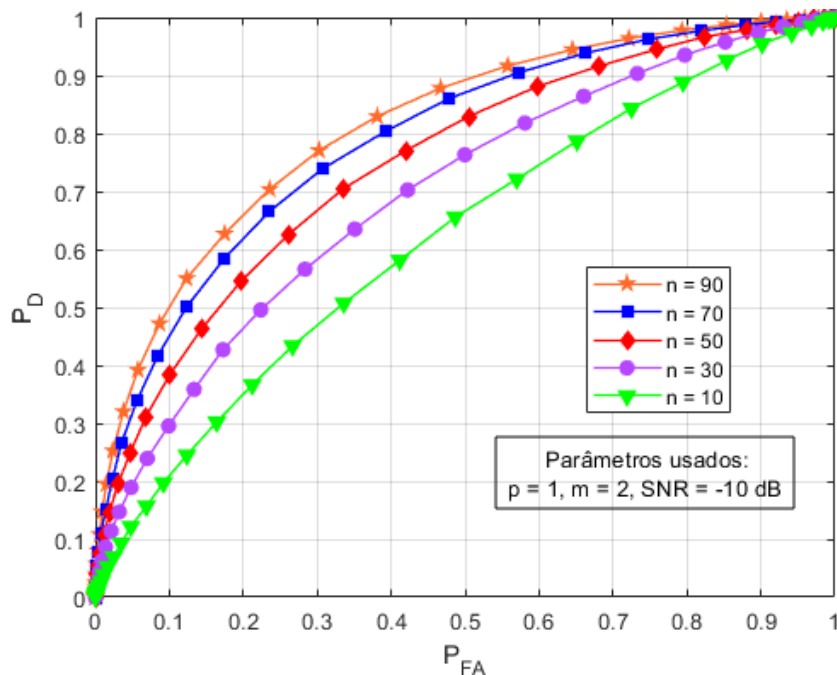
Ao analisar as curvas da Figura 5.4, conclui-se que o sensoriamento cooperativo ($m > 1$) em termos de desempenho supera o do sistema não cooperativo ($m = 1$, curva verde na Figura 5.4). Quando mais rádios coletam amostras, melhor é o sensoriamento espectral realizado, porém a melhoria de desempenho passa a ser menos intensa à medida em que o número de RCs aumenta. O impacto positivo no

desempenho é causado pelo aumento do número total de amostras coletadas, visto que haveria uma quantidade de amostras processadas proporcional à quantidade de rádios enviando dados para um Centro de Fusão. Além disso, as amostras coletadas por cada RC estariam descorrelacionadas espacialmente, reduzindo a incerteza das informações sobre o canal analisado.

5.4 Comparação de desempenho com a variação do número de amostras coletadas em cenário cooperativo

Com o objetivo de avaliar o impacto no sistema de sensoriamento espectral causado pelo número de amostras, n , coletadas pelos RCs, uma nova simulação foi executada considerando a seguinte parametrização: canal AWGN, $\rho = 1$, $m = 2$, SNR = -10 dB e $n = 10, 30, 50, 70$ e 90 . Os resultados simulados estão apresentados na Figura 5.5, onde é possível observar que o número de amostras coletadas pelos RCs da rede é outro fator importante para melhorar o desempenho do sensoriamento. Isso fica evidente ao perceber que um número maior de amostras resulta em uma curva ROC mais próxima do ponto ótimo.

Figura 5.5 - Curvas ROCs para diferentes valores de “ n ”.



Fonte: Autor.

Essa melhoria ocorre porque um maior número de amostras proporciona mais informações sobre a banda sensoriada, permitindo decidir com maior confiabilidade se existe um UP transmitindo naquele momento. Essa análise ressalta a importância de garantir que, em um cenário real de sensoriamento, o número de amostras coletadas por um RC seja suficientemente grande para que as probabilidades de detecção e de falso alarme permaneçam dentro das margens toleradas pelo sistema de sensoriamento desenvolvido.

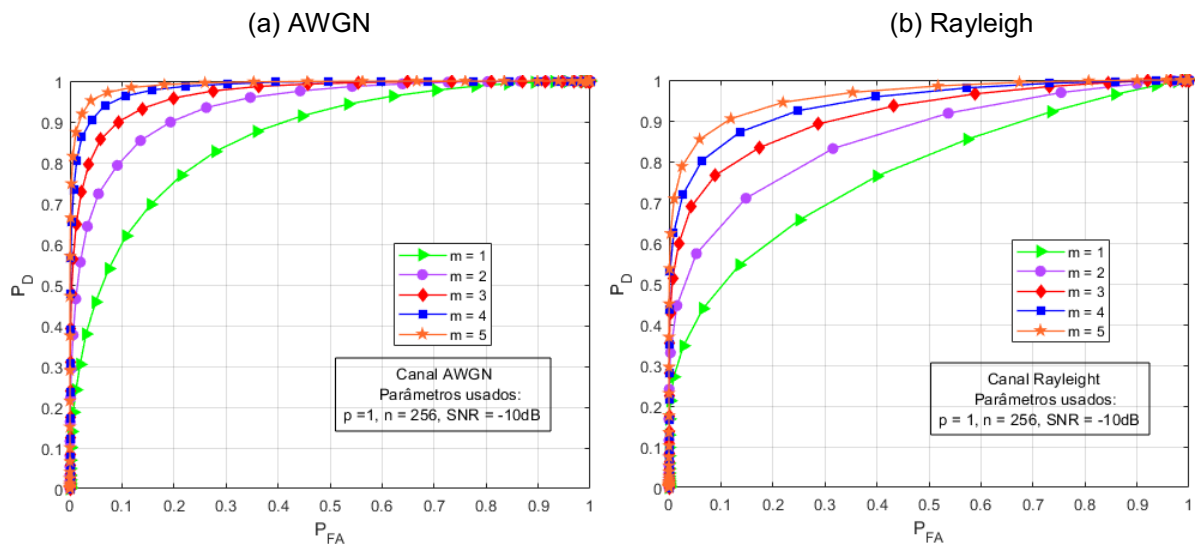
5.5 Simulação em cenário Rayleigh e AWGN

Todas as simulações feitas anteriormente utilizaram um ruído do tipo AWGN (canal AWGN). Cenários desse tipo são bem otimistas e dificilmente serão encontrados na prática em comunicação sem fio, porém servem como referência de desempenho ideal. Com o intuito de verificar um contexto mais realista, nessa subseção será considerado além do ruído AWGN um canal com desvanecimento Rayleigh (canal Rayleigh). O modelo Rayleigh aborda um cenário pessimista de recepção, que modela situações de multipercurso, nas quais não há visada direta entre o TX primário e os RCs da rede cooperativa.

Nessa subseção serão realizadas simulações com o intuito de se verificar a diferença entre um cenário com um canal AWGN e outro com um canal Rayleigh. As primeiras duas simulações foram executadas usando a mesma parametrização de: $p = 1$, $n = 256$, $\text{SNR} = -10$ dB e $m = 1, 2, 3, 4$ e 5 .

Abaixo é apresentado os resultados das simulações, sendo a Figura 5.6 (a) as curvas ROCs para o cenário AWGN, e a Figura 5.6 (b) as curvas ROCs para o cenário Rayleigh. Comparando os gráficos, é possível ver que ambos apresentam um desempenho de sensoriamento espectral maior conforme o número de RCs aumenta. Porém os resultados obtidos usando o canal Rayleigh são bem piores do que usando o canal AWGN, isso demonstra a dificuldade da operação do sistema de sensoriamento em condições mais realista de propagação sem fio.

Figura 5.6 - Curvas ROCs para diferentes valores de “ m ” com SNR de -10dB.



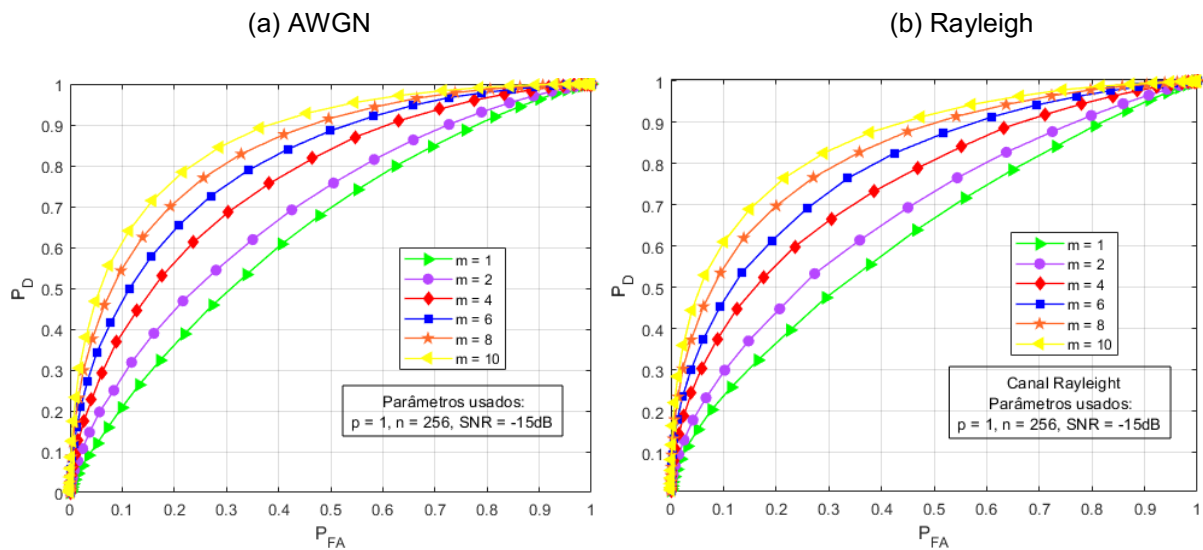
Fonte: Autor.

Por fim, serão realizadas mais duas simulações com o intuito de verificar a diferença entre um cenário com um canal AWGN e outro com um canal Rayleigh, em um caso de relação sinal-ruído muito baixa. As duas simulações foram executadas usando a seguinte parametrização para ambos os canais: $p = 1$, $n = 256$, SNR média = -15 dB e $m = 1, 2, 4, 6, 8$ e 10 .

A Figura 5.7 (a) apresenta as curvas ROCs para o cenário AWGN, e a Figura 5.7 (b) as curvas ROCs para o cenário Rayleigh. Comparando esses dois gráficos, é possível constatar que eles são muito similares, sendo possível observar apenas que o desempenho do sistema que utiliza o canal Rayleigh é ligeiramente pior que o desempenho do sistema que utiliza o canal AWGN.

Fazendo um comparativo desses gráficos apresentados na Figura 5.7 (a) e 5.7 (b) (SNR = -15 dB), com os gráficos da Figura 5.6 (a) e 5.6 (b), que estão com uma SNR maior (-10 dB), é possível concluir então que, em situações onde o valor da SNR é muito baixo, o desempenho do sistema simulado em canal AWGN e em canal Rayleigh é bastante similar. Ou seja, em termos de desempenho, mesmo o modelo AWGN sendo matematicamente mais simples ele poderia ser utilizado para situações de baixíssima SNR fornecendo um desempenho estimado próximo ao de um modelo mais elaborado como o de Rayleigh. O que pode ser útil em situações onde se deseja simular o sensoriamento espectral em condições de SNR muito baixa, mas não se dispões de um alto recurso computacional.

Figura 5.7 - Curvas ROCs para diferentes valores de “ m ” com SNR de -15dB.



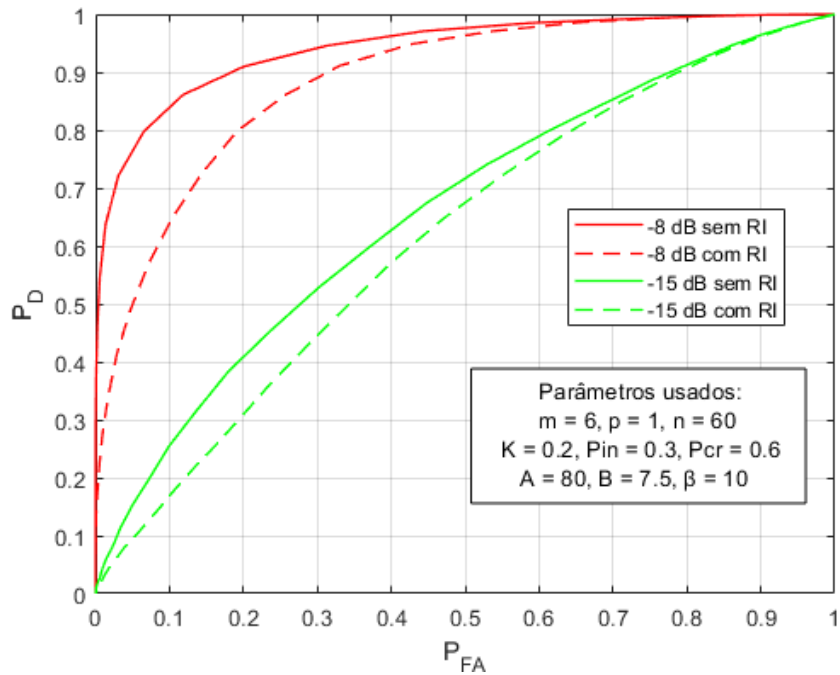
Fonte: Autor.

5.6 Simulação em cenário cooperativo com ruído impulsivo

Nesta subseção, será analisado o impacto do ruído impulsivo em sistemas de sensoriamento espectral cooperativo. Será realizada uma simulação com o intuito de verificar a diferença entre um cenário com ruído impulsivo e outro sem ruído impulsivo, além disso essa simulação irá mostrar o impacto do RI em diferentes condições de relação sinal-ruído.

A simulação realizada nessa subseção utiliza um canal Rayleigh, com uma parametrização: $\rho = 1, n = 60, m = 6$ e $\text{SNR} = -8 \text{ dB}$ e -15 dB . Os parâmetros relacionados ao RI estão destacados na Figura 5.8, em que são apresentados os resultados dessa simulação. Comparando as curvas do gráfico, é possível ver claramente o impacto da presença do ruído impulsivo, tanto para cenários com uma baixa SNR ($\text{SNR} = -15 \text{ dB}$) quanto para cenários com SNR um pouco mais alta ($\text{SNR} = -8 \text{ dB}$), nas quais a curva de desempenho considerando o RI tendem a se distanciar do ponto de operação ótimo que considera probabilidade de detecção igual a 1 e probabilidade de falso alarme igual a 0. Isso demonstra a dificuldade da operação em cenários onde o ruído impulsivo está presente.

Figura 5.8 - Curvas ROCs com presença e ausência do RI.



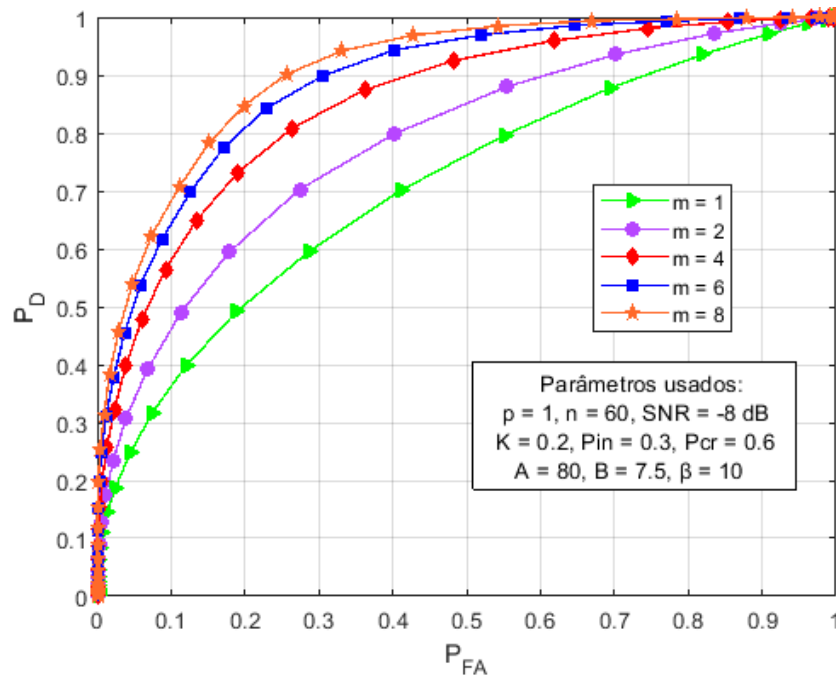
Fonte: Autor.

5.7 Comparação de desempenho com RI em cenário cooperativo e não cooperativo

Nesta subseção, será comparado o impacto do ruído impulsivo em sistemas de sensoriamento espectral cooperativo e não cooperativo. Será realizada uma simulação com o intuito de se verificar a influência do número de rádios cognitivos em um cenário com ruído impulsivo.

A simulação realizada nessa subseção utiliza um canal Rayleigh e a seguinte parametrização: $p = 1$, $n = 60$, SNR média = -8 dB e $m = 1, 2, 4, 6, 8$. Na Figura 5.9 são apresentadas as curvas de desempenho além de destacar os parâmetros utilizados na simulação.

Figura 5.9 - Curvas ROCs com RI, para diferentes valores de “ m ”.



Fonte: Autor.

Na figura 5.9 é possível verificar que a abordagem cooperativa oferece vantagens notáveis na mitigação do ruído impulsivo em comparação com um sistema não cooperativo. No entanto, conforme o número de rádios cognitivos no sistema aumenta, é observado que os ganhos de desempenho tendem a diminuir progressivamente, ou seja, em um determinado ponto, parece que o aumento de RCs não gera tanto efeito positivo no desempenho do sensoriamento espectral. A conclusão em questão pode ser um ponto muito importante para definição do número ideal de RCs da rede cooperativa, de forma que se tenha um desempenho muito bom, mas sem a necessidade de elevar demasiadamente o custo da rede com a aquisição de RCs para sensoriamento.

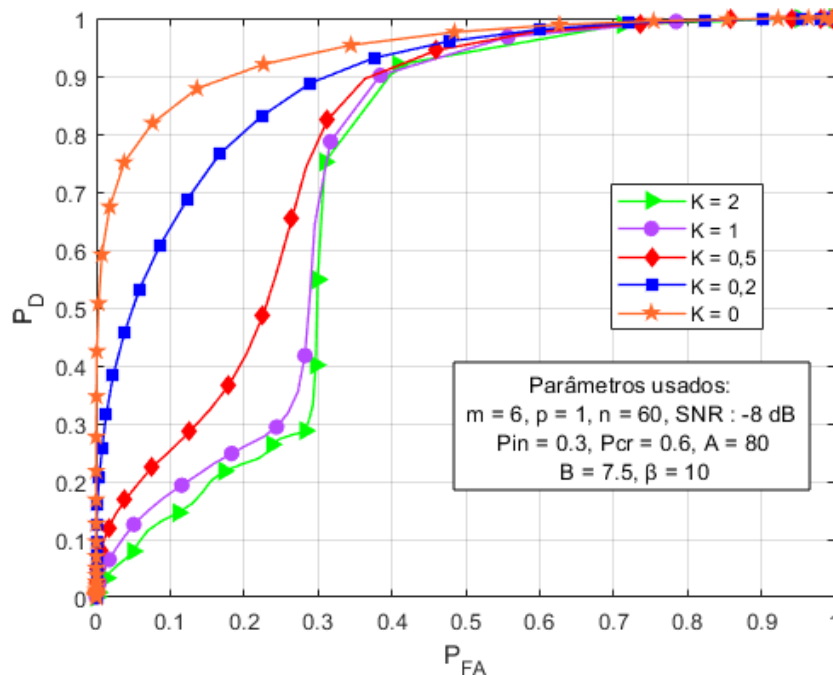
Essa vantagem do sistema cooperativo se mostra particularmente relevante em cenários onde o ruído impulsivo é uma preocupação, proporcionando uma caracterização mais robusta e precisa do ambiente espectral, essencial para aplicações que demandam decisões com alta confiabilidade.

5.8 Impacto dos parâmetros do RI em cenário cooperativo

Nesta subsecção, será analisado o impacto dos parâmetros do ruído impulsivo (K , P_{ri} , P_{rc} , β , A e B) em sistemas de sensoriamento espectral cooperativo. Todas as simulações realizadas nessa subsecção são executadas considerando um canal Rayleigh, e usam a mesma parametrização de: $\rho = 1$, $n = 60$, $m = 6$ e $\text{SNR} = -8$ dB.

O primeiro parâmetro a ser analisado é o K , que define a relação entre a potência do ruído impulsivo (RI) e a potência do ruído térmico presente no sistema. Para avaliar o impacto desse parâmetro, a seguinte configuração foi analisada: $A = 80$, $B = 7.5$, $\beta = 10$, $P_{in} = 0.3$, $P_{cr} = 0.6$ e $K = 0, 0.2, 0.5, 1, 2$. Os resultados são apresentados no gráfico da Figura 5.10.

Figura 5.10 - Curvas ROCs com RI para diferentes valores de “ K ”.

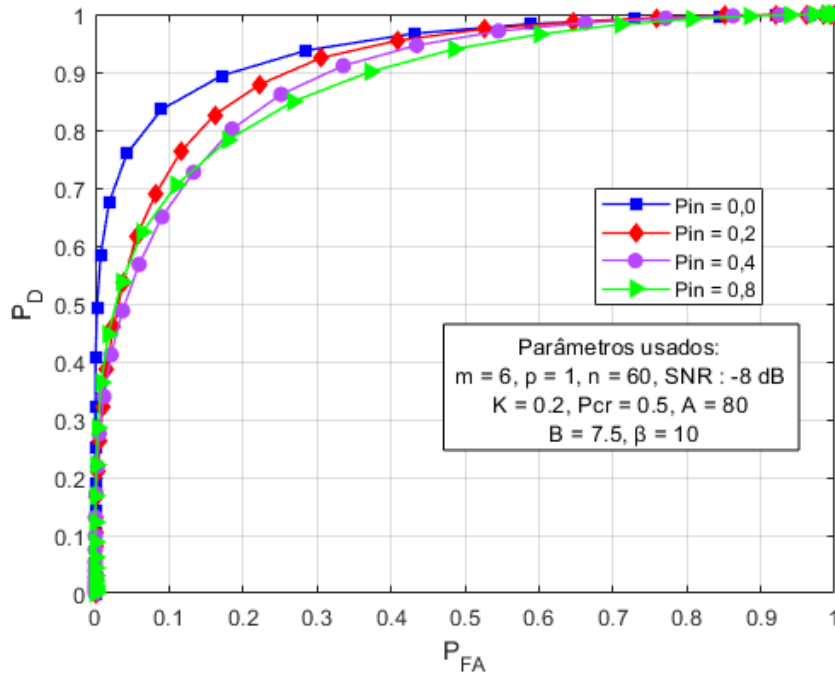


Fonte: Autor.

O aumento de K , resulta em uma queda de desempenho do sensoriamento. Isso ocorre porque a presença do RI aumenta a incerteza na decisão tomada no CF, o que se traduz em um aumento da probabilidade de falso alarme e uma redução na probabilidade de detectar um buraco espectral. Para valores elevados de K , o sensoriamento sofre uma degradação abrupta com o aumento do limiar de decisão, uma vez que a estatística de decisão T passa a ser fortemente influenciada pelo RI.

Agora, com o intuito de compreender como a probabilidade de ocorrência do ruído impulsivo, P_{in} , afeta o desempenho do sistema, foi configurado o seguinte cenário: $A = 80$, $B = 7.5$, $\beta = 10$, $K = 0.2$, $P_{cr} = 0.5$ e $P_{in} = 0, 0.2, 0.4, 0.8$. As curvas resultantes das simulações estão apresentadas a seguir na Figura 5.11.

Figura 5.11 - Curvas ROCs com RI para diferentes valores de " P_{in} ".

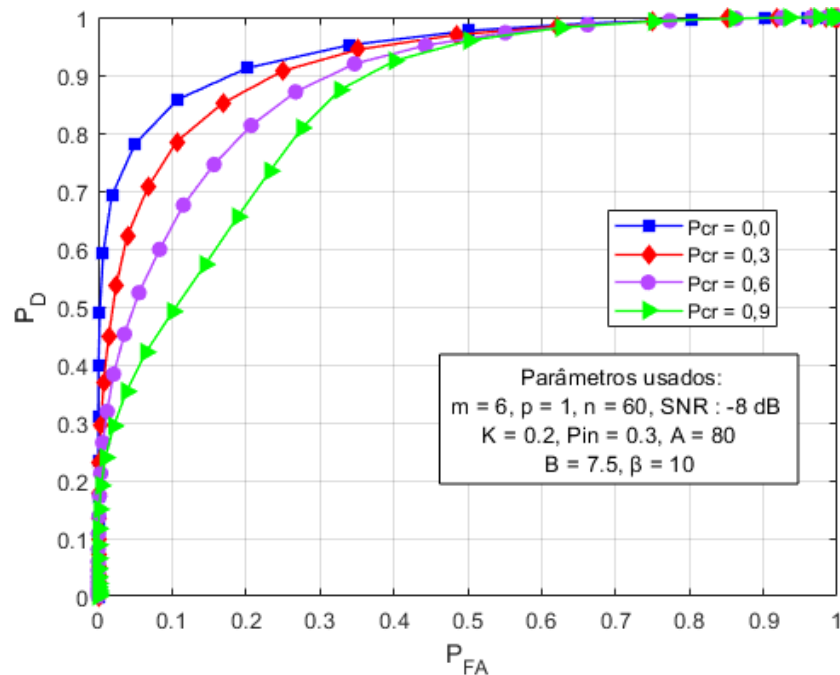


Fonte: Autor.

A partir dos resultados obtidos, fica evidente que um aumento na probabilidade de ocorrência do RI (P_{in}) resulta em uma queda de desempenho. Portanto, em ambientes com alta probabilidade de RI, este fenômeno deve ser considerado, uma vez que a degradação causada por tal fenômeno pode impedir que o sistema atinja os requisitos de probabilidade de detecção e de falso alarme. Uma curva de um sistema equivalente sem o ruído impulsivo ($P_{in} = 0$) também é mostrada na Figura 5.11 (curva azul) como referência para comparação.

Agora, a fim de avaliar o comportamento do sistema sob diferentes valores do parâmetro de porcentagem média de RCs afetados pelo Ruído Impulsivo (RI), P_{cr} , este parâmetro foi variado. Para esta análise, adotou-se a seguinte configuração: $A = 80$, $B = 7.5$, $\beta = 10$, $K = 0.2$, $P_{in} = 0.3$ e $P_{cr} = 0, 0.3, 0.6, 0.9$. O resultado desta simulação é apresentado na Figura 5.12.

Figura 5.12 - Curvas ROCs com RI para diferentes valores de “ P_{cr} ”.



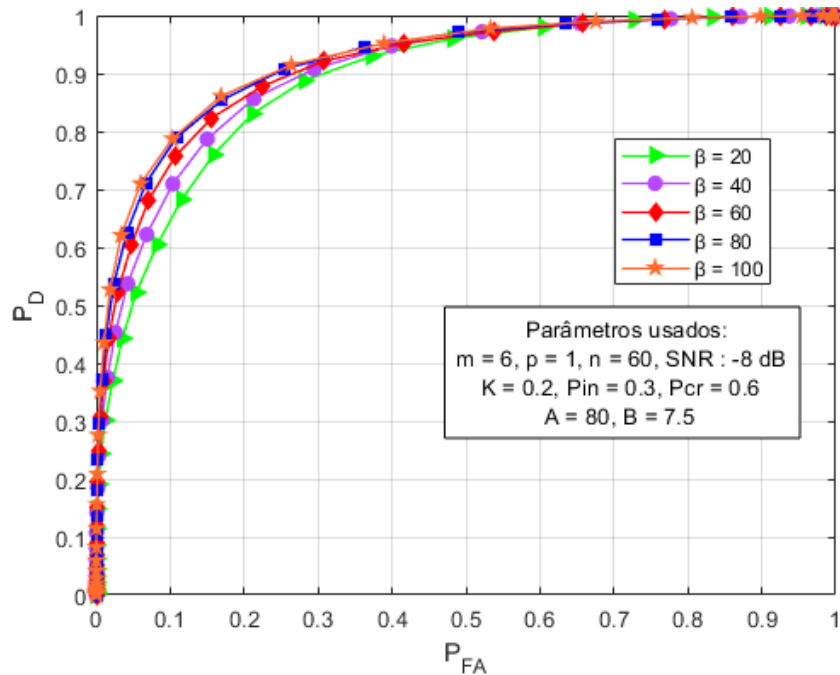
Fonte: Autor.

Observa-se que o aumento do P_{cr} , resulta em uma redução de desempenho do sistema, uma vez que a incerteza na decisão conjunta sobre a ocupação espectral no centro de fusão também aumenta, dado que mais rádios são afetados pelo RI e, conseqüentemente, mais amostras processadas no CF estão corrompidas pelo RI.

A seguir, com o intuito de compreender como o espaçamento médio entre as amostras de RI, β , afeta o desempenho do sistema, foi configurado o seguinte cenário: $A = 80$, $B = 7.5$, $K = 0.2$, $P_{cr} = 0.6$, $P_{in} = 0.3$ e $\beta = 20, 40, 60, 80, 100$. As curvas resultantes das simulações estão apresentadas a seguir na Figura 5.13.

Observa-se na Figura 5.13 que o aumento de β , resulta em uma melhora de desempenho do sistema, isso é justificável já que, com o aumento do espaçamento entre as amostras de RI, é diminuído, a quantidade efetiva de pulsos de RI que estão inseridos nas amostras capturadas pelos RCs da rede cooperativa do sistema e que são utilizadas para geração da variável de decisão.

Figura 5.13 - Curvas ROCs com RI para diferentes valores de " β ".



Fonte: Autor.

Vale ressaltar que os parâmetros A e B também foram variados, que são a média da amplitude do RI com distribuição Log-normal (A) e o desvio padrão das amplitudes de RI Log-normal (B). Porém, não surtiram efeitos no desempenho do sensoriamento espectral usando detecção de energia cooperativa e não cooperativo. Conjectura-se que isso tenha ocorrido devido à normalização de potência do RI pelo fator K .

Com base nas várias simulações realizadas, fica evidente que o ruído impulsivo pode causar impactos significativos em sistemas de sensoriamento espectral cooperativo e mais ainda em um não cooperativo. Ao modificar diversos parâmetros desse ruído (K , P_{in} , P_{cr} e β), foi possível observar diferentes níveis de degradação no desempenho do sistema. Uma das conclusões importantes é que o ruído impulsivo pode introduzir distorções nos dados capturados pelo sistema de sensoriamento, levando a erros graves de detecção. Isso pode comprometer a confiabilidade e a precisão das informações obtidas, afetando diretamente a tomada de decisões baseada nos dados coletados. Assim, é importante ressaltar que uma das formas eficazes de mitigar o Ruído Impulsivo (RI) é através da aplicação do sensoriamento cooperativo, conforme demonstrado nos resultados das simulações anteriores.

Portanto, é crucial considerar cuidadosamente o impacto do ruído impulsivo ao projetar e operar sistemas de sensoriamento espectral. Isso inclui não apenas a implementação de técnicas de mitigação apropriadas, mas também a avaliação contínua do desempenho do sistema em condições realistas de operação. Pesquisas adicionais nessa área podem contribuir para o desenvolvimento de soluções mais eficazes e robustas para lidar com os desafios que poderão ser encontrados em sistemas reais de sensoriamento espectral operando nas bandas de TVWS.

Capítulo 6 - Conclusão, Trabalhos Futuros e Contribuições

Este trabalho avançou no estudo do sensoriamento espectral cooperativo em TVWS, adotando uma abordagem mais realista, na qual se considera desvanecimentos no sinal sensoriado e ruído impulsivo, fatores que frequentemente afetam os sistemas de telecomunicações. Além disso, o sinal de usuário primário considerado nas análises é do tipo ISDB-TB (OFDM), em total conformidade com o que seria encontrado no sensoriamento espectral real no Brasil nas faixas UHF e VHF.

As simulações realizadas proporcionaram uma visão abrangente sobre o sensoriamento espectral cooperativo em TVWS e seu desempenho em diversos cenários. Vários fatores foram avaliados, como a influência do modelo de canal no sensoriamento espectral (AWGN e Rayleigh), a comparação entre sensoriamento cooperativo e não cooperativo, a influência do número de RCs e do número de amostras coletadas no sensoriamento cooperativo, e o impacto do ruído impulsivo (RI) e seus parâmetros no sensoriamento espectral.

Os resultados mostraram que o sensoriamento cooperativo oferece vantagens significativas em termos de precisão e confiabilidade das medições espectrais, especialmente em ambientes com ruído impulsivo. A capacidade de combinar informações de múltiplos sensores distribuídos permite uma melhor caracterização do ambiente espectral, reduzindo os efeitos adversos do ruído e melhorando a detecção e identificação de sinais de interesse. No entanto, constatou-se que aumentar excessivamente o número de RCs na rede cooperativa não proporciona ganhos significativos de desempenho, destacando a necessidade de uma abordagem otimizada para a criação de uma rede cooperativa eficiente e com custo reduzido. O estudo também considerou aspectos práticos de propagação, incluindo desvanecimento do sinal devido a multipercursos.

Em suma, este trabalho contribui para o avanço do conhecimento na área de sensoriamento espectral cooperativo para operação em TVWS. Os resultados das simulações apresentados fornecem *insights* valiosos para futuras pesquisas e

aplicações práticas, auxiliando no desenvolvimento de soluções mais eficazes e otimizadas para o sensoriamento espectral nas bandas ociosas nas faixas TV no Brasil.

Como trabalhos futuros, propõe-se:

(i) Análise de desempenho de técnicas de sensoriamento espectral que se baseiam em informações da fase do sinal recebido;

(ii) Avaliação de outros modelos de canal mais abrangentes que consigam contemplar uma ampla gama de cenários de propagação;

(iii) Implementação em RDS 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> Acesso em: 08 nov. 2023.
- 2 MORE than 50 billion connected devices, Ericson. Disponível em: <https://vdna.be/publications/Wp-50-Billions.Pdf> Acesso em: 08 nov. 2023.
- 3 CHAPIN, John M. et al. Mobile Broadband Growth, Spectrum Scarcity, and Sustainable Competition, SSRN, Disponível em: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1992423 Acesso em: 08 nov. 2023.
- 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> Acesso em: 08 nov. 2023.
- 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 Acesso em: 08 nov. 2023.
- 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/> Acesso em: 08 nov. 2023.
- 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. 2023.
- 10 ALVES, Fátima Sayury Queralt Queda. **Sensoriamento espectral Cooperativo Baseado em Rádio Cognitivos com Múltiplas Antenas**. 2021. Dissertação (Mestrado em Telecomunicações) – Inatel, Instituto Nacional de Telecomunicações, Santa Rita do Sapucaí, 2021.

- 11 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. 2023.
- 12 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. 2023.
- 13 A. Nasser; H. A. H. Hassan; A. Mansour; Koffi-Clement Yao; L. Nuaymi, Intelligent Reflecting Surfaces and Spectrum Sensing for Cognitive Radio Networks. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9765578>. Acesso em: 30 dez. 2023.
- 14 K. Captain; A. Chauhan; R. Kumar, Channel Coding for Cooperative Spectrum Sensing Under Imperfect Reporting Channels. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9668339>. Acesso em: 30 dez. 2023.
- 15 D. Janu; S. Kumar; K. Singh, A Graph Convolution Network Based Adaptive Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Network. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9918025>. Acesso em: 30 dez. 2023.
- 16 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> Acesso em: 08 nov. 2023.
- 17 AKYILDIZ, Ian F. Next Generation/dynamic spectrum access/ cognitive 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> Acesso em: 08 nov. 2023.
- 18 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.
- 19 S. HAYKIN; D. J. THOMSON e J. H. REED. Spectrum Sensing for Cognitive Radio. Proceedings of the IEEE. Vol. 97, No 5, p. 849-877, 2009
- 20 K. SITHAMPARANATHAN e A. GIORGETTI. Cognitive Radio Techniques - Spectrum Sensing, Interference Mitigation and Localization. Artech House, 2012
- 21 R. TANDRA; S. M. MISHRA e A. SAHAI. What is a Spectrum Hole and What Does It Take to Recognize One? Proceedings of the IEEE. Vol. 97, No. 5, p. 824 - 848, 2009.

- 22 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.sbvt.org.br/jcis/article/view/476/385> Acesso em: 08 nov. 2023.
- 23 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> Acesso em: 08 nov. 2023.
- 24 F. Pascal. *et al.* Constant False Alarm Rate Detection In Spherically Invariant Random Processes, XII. **European Signal Processing Conference**, Set. 2004.
- 25 M. Oner and F. Jondral, "Cyclostationarity based air interface recognition for software radio systems," in Proceedings. 2004 IEEE Radio and Wireless Conference (IEEE Cat. No.04TH8746), 2004, pp. 263–266.
- 26 Y. Zeng, Y.-C. Liang, A. T. Hoang, R. Zhang, and Z. Liu, "A review on spectrum sensing for cognitive radio: Challenges and solutions," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2010.
- 27 W. Zhao, H. Li, M. Jin, Y. Liu, and S.-J. Yoo, "Eigenvalues-based universal spectrum sensing algorithm in cognitive radio networks," *IEEE Systems Journal*, vol. 15, no. 3, pp. 3391–3402, 2021.
- 28 Y. Arjoun and N. Kaabouch, "A comprehensive survey on spectrum sensing in cognitive radio networks: Recent advances, new challenges, and future research directions," *Sensors*, vol. 19, no. 1, 2019.
- 29 H. Huang and C. Yuan, "Cooperative spectrum sensing over generalized fading channels based on energy detection," *China Communications*, vol. 15, no. 5, pp. 128–137, 2018.
- 30 W. Wu, Z. Wang, L. Yuan, F. Zhou, F. Lang, B. Wang, and Q. Wu, "Irs-enhanced energy detection for spectrum sensing in cognitive radio networks," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 10, no. 10, pp. 2254–2258, 2021.
- 31 C. Vlădeanu, A. Marțian, and D. C. Popescu, "Spectrum sensing with energy detection in multiple alternating time slots," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 38 565–38 574, 2022.
- 32 D. M. M. Plata and Á. G. A. Reátiga, "Evaluation of energy detection for spectrum sensing based on the dynamic selection of detection-threshold," *Procedia Engineering*, vol. 35, pp. 135–143, 2012.
- 33 P. T´orio, M. G. Sanchez, "Generating Impulsive Noise [Wireless Corner]," *Antennas and Propagation Magazine, IEEE.*, Vol. 52, pp. 168–73, 2010.

- 34 P. T´orio, M. G. Sanchez, I. Cuinas, “An algorithm to simulate impulsive noise”, Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), 2011 19th International Conference, pp. 1–4, 2011.
- 35 D. Middleton, “Non-Gaussian Noise Models in Signal Processing for Telecommunications: New Methods and Results for Class A and Class B Noise Models”, IEEE Trans. Inf. Theory, Vol. 45, No. 4, pp. 1129–1149, May 1999.
- 36 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> Acesso em: 08 nov. 2023.
- 37 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15601**: Televisão digital terrestre — Sistema de transmissão. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- 38 SIMULAÇÃO TVWS, André Antônio dos Anjos; Dayane Cristina Jesus; Diogo Campos de Arvelos. Disponível em: <https://drive.google.com/drive/u/0/folders/1hjdklcl1TMMtSUZMShfhwX7t2NqTZ5h1>.
- 39 J. M. Hammersley, et al. **Monte Carlo Methods**, Chapman and Hall, 1964, ISBN: 978-94-009-5819-7