

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

SENSORIAMENTO DO ESPECTRO EM SISTEMA TETRA POR
MEIO DE ANÁLISE TEMPO-FREQUÊNCIA

WILSON DINIZ WELLISCH

ORIENTADOR: ANDRÉ NOLL BARRETO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PUBLICAÇÃO: PPGEE. DM - 506/2012

BRASÍLIA/DF: OUTUBRO – 2012

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**SENSORIAMENTO DO ESPECTRO EM SISTEMA TETRA POR
MEIO DE ANÁLISE TEMPO-FREQUÊNCIA**

WILSON DINIZ WELLISCH

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

APROVADA POR:

**Prof. André Noll Barreto, PhD (ENE-UnB)
(Orientador)**

**Prof. Adoniran Judson de Barros Braga, PhD (ENE-UnB)
(Examinador Interno)**

**Prof. Robson Domingos Vieira, PhD (INDT)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 19 DE OUTUBRO DE 2012.

FICHA CATALOGRÁFICA

WELLISCH, WILSON DINIZ

Sensoriamento do Espectro em Sistema Tetra por Meio de Análise Tempo-Frequência [Distrito Federal] 2012.

xiv, 82p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Engenharia Elétrica, 2012).

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Rádio Cognitivo
3. Análise Tempo Frequência

2. Sensoriamento do Espectro
4. Espectrograma

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

WELLISCH, WILSON D. Sensoriamento do Espectro em Sistema Tetra por Meio de Análise Tempo-Frequência. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Outubro/2012, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 82p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Wilson Diniz Wellisch.

TÍTULO: Sensoriamento do Espectro em Sistema Tetra por Meio de Análise Tempo-Frequência.

GRAU/ANO: Mestre/2012

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste trabalho de conclusão de curso de graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. Os autores reservam outros direitos de publicação e nenhuma parte desse trabalho de conclusão de curso de graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito dos autores.

Wilson Diniz Wellisch

Condomínio Ville De Montagne, Qd. 32, Cs. 50, Lago Sul.

CEP: 71.680-357

Brasília – DF – Brasil.

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, Professor Dr André Noll Barreto, por todo esforço e dedicação empreendidos para a conclusão deste trabalho.

À minha irmã, Bárbara, o maior presente dado a mim por Deus, e por quem possuo aquele que considero o maior amor do mundo.

Ao João Paulo, companheiro do LEMOM, por toda a paciência, por todo subsídio prestado para a conclusão deste trabalho, e, principalmente, por ter me apresentado a Análise Tempo Frequência.

À Luciana, por todo o incentivo e companheirismo.

Aos colegas da Anatel, pela torcida.

Finalmente, à minha mãe, por todo o auxílio e amor incondicional, por ser meu porto seguro e por me suportar nos momentos mais difíceis.

A todos, obrigado!

Wilson Diniz Wellisch

Resumo

Em um sistema de rádio cognitivo no qual o usuário primário utiliza um sistema baseado em um esquema TDMA/FDMA, a detecção do espectro deverá ser capaz de identificar a ocupação tanto da banda de frequência quanto dos intervalos de tempo. Enquanto isso pode ser feito por sensoriamento de cada canal de frequência em banda estreita em turnos, nós também podemos realizar uma amostragem em banda larga do sinal transmitido, e identificar simultaneamente as bandas de frequência e os instantes de tempo ocupados por meio de uma Análise de Tempo-Frequência. Neste trabalho é proposta a utilização desta abordagem, utilizando o Espectrograma, a fim de detectar o espectro e determinar os canais ocupados de um sistema TETRA. Para esse fim, são apresentados os conceitos relacionados ao sistema TETRA, e aspectos regulamentares a serem considerados para disponibilização da tecnologia de rádio cognitivo no Brasil. Apresenta-se, também, as principais características de alguns dos métodos de sensoriamento espectral, como o Detector de Energia, a Detecção de Ciclostationaria, a Transformada de Fourier de Tempo Curto, o Espectrograma e a Wigner-Ville Distribuição. Por fim, um teste de desempenho do espectrograma é realizado.

Abstract

In a cognitive radio system where the primary user is a TDMA/FDMA based system, spectrum sensing must be able to identify the occupation of both a frequency band and a time slot. Whereas this can be done by scanning each narrowband frequency channel in turns, we can also perform a wideband sampling of the transmitted signal, and identify simultaneously the occupied frequency bands and time slots by means of a time-frequency analysis. In this work we propose the use of this approach, using a spectrogram, in order to sense the spectrum and determine the occupied channels of a TETRA system. For this purpose, it is presented the concepts related to TETRA systems and regulatory aspects to be consider in other to implement the cognitive radio technology in Brazil. It is presented, too, the main features of some spectral sensing methods, like Energy Detector, Cyclostationary Detection, Short Time Fourier Transform, Spectrogram and Wigner-Ville Distribution. Finally, a performance test of the Spectrogram is held.

SUMÁRIO

FICHA CATALOGRÁFICA.....	iii
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	iii
CESSÃO DE DIREITOS	iii
Agradecimentos	iv
Abstract	vi
1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2 - DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	3
1.3 - OBJETIVOS	4
1.4 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	5
2 - PROTOCOLO TETRA	6
2.1 - INTRODUÇÃO	6
2.2 - CARACTERÍSTICAS DO PROTOCOLO	6
2.2.1 - Multiplexação e Modulação.....	7
2.2.2 - Construção dos Quadros.....	10
2.2.3 - Codificação, entrelaçamento e embaralhamento.....	11
2.2.3.1 - Codificação.....	12
2.2.3.2 - Entrelaçamento.....	13
2.2.3.3 - Embaralhamento.....	13
2.2.4 - Modos de Operação.....	13
2.2.4.1 - Modo de Operação Direta	14
2.2.4.1.1. Modo <i>Back-to-Back</i>	14
2.2.4.1.2. Modo Repetidor	16
2.2.4.1.3. Modo <i>Gateway</i>	17
2.2.4.1.4. Modo <i>Dual Watch</i>	17
2.3 - CONCLUSÃO.....	18
3 - ASPECTOS LEGAIS E REGULAMENTARES	19
3.1 - INTRODUÇÃO	19
3.2 - A LEI GERAL DE TELECOMUNICAÇÕES (LGT) E OS SERVIÇOS DE TELECOMUNICAÇÕES.....	21
3.3 - RESOLUÇÃO N.º 259/2001 – REGULAMENTO DE USO DO ESPECTRO DE RADIOFREQUÊNCIAS	22
3.4 - ASPECTOS REGULATÓRIOS DOS SISTEMAS DE RADIOCOMUNICAÇÃO TRONCALIZADOS.....	27
3.5 - SISTEMAS DE RADIOCOMUNICAÇÃO TRONCALIZADOS PARA SEGURANÇA PÚBLICA.....	29

3.6 -	CONCLUSÃO.....	31
4 -	ASPÉCTOS TEÓRICOS SOBRE O SENSORIAMENTO ESPECTRAL.....	33
4.1 -	INTRODUÇÃO	33
4.2 -	CICLO COGNITIVO	33
4.2.1 -	Sensoriamento.....	34
4.2.2 -	Análise.	34
4.2.3 -	Gerenciamento do Espectro.....	34
4.3 -	ALGUNS DOS MÉTODOS DE SENSORIAMENTO ESPECTRAL.....	34
4.3.1 -	Detector de Energia.....	34
4.3.2 -	Detecção Cicloestacionária.	36
4.4 -	ANÁLISE TEMPO FREQUÊNCIA (ATF)	37
4.4.1 -	Transformada de Fourier de Tempo Curto (STFT) Discreta.....	37
4.4.2 -	Espectrograma.....	39
4.4.2.1 -	Relação Espectrograma x Detector de Energia.....	39
4.4.2.2 -	A janela de observação.....	40
4.4.3 -	Distribuição de Wigner-Ville.....	41
4.4.3.1 -	Interferência dos Termos Cruzados.....	42
4.5 -	CONCLUSÃO.....	43
5 -	VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO DA DISTRIBUIÇÃO TEMPO FREQUÊNCIA (DTF) ESPECTROGRAMA POR SIMULAÇÕES	45
5.1 -	INTRODUÇÃO	45
5.2 -	DETECTOR DE ENERGIA E A ANÁLISE TEMPO-FREQUÊNCIA CONHECIDA COMO ESPECTROGRAMA	46
5.2.1 -	Detector de Energia.....	46
5.2.2 -	Espectrograma.....	47
5.2.3 -	Comparação entre o Detector de Energia e o Espectrograma.....	48
5.3 -	DEMAIS RESULTADOS DE SIMULAÇÃO.....	51
5.3.1 -	Curvas de PFA x PND para diferentes RSRs.....	51
5.3.2 -	Curvas de PFA x PND para diferentes Comprimentos de Janelas de Observação.....	52
5.3.3 -	Desempenho do método de detecção espectral, na presença de desvanecimentos de multipercurso do tipo Rice e Rayleigh.....	54
5.3.3.1 -	Modelo Rice	55
5.3.3.2 -	Modelo Rayleigh	55
5.3.3.3 -	Resultados Simulados	55

5.3.4 - Sincronização para detecção do Quadro TDMA utilizando o Espectrograma.....	57
5.4 - CONCLUSÃO.....	60
6 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Histórico do Rádio Cognitivo [5].	2
Figura 2.1- Diagrama de blocos da camada física de um sistema TETRA.	7
Figura 2.2- Constelação da Modulação π 4- DQPSK [7]	9
Figura 2.3- Estrutura do quadro TDMA de um Sistema TETRA	10
Figura 2.4 - Estrutura de <i>time slot</i> do enlace de subida de um sistema TETRA	11
Figura 2.5 - Interfaces dos mecanismos de Codificação, entrelaçamento e embaralhamento	12
Figura 2.6 - Modo <i>Back-to-Back</i> .	15
Figura 2.7 - Operação <i>Back-to-Back</i> na prevenção de falhas na Comunicação com a Estação Rádio Base – ERB.	15
Figura 2.8 - Modo Repetidor	16
Figura 2.9 - Modo <i>Gateway</i> .	17
Figura 2.10 - Modo <i>Dual Watch</i> .	18
Figura 3.1- Tabela de Atribuição de Faixas de Frequência no Brasil [16].	20
Figura 4.1- Etapas do Ciclo Cognitivo [6].	33
Figura 4.2 - Demonstração do sinal no domínio Tempo-Frequência [8]	37
Figura 5.1 – Distribuição Tempo Frequência do sinal simulado com 10 dB de RSR e $N_{\text{symb}} = 30$.	49
Figura 5.2 - DTF do sinal simulado com -3dB de RSR e $N_{\text{symb}} = 30$.	50
Figura 5.3 - Comparação entre as curvas teóricas <i>PFA</i> x <i>PND</i> do Sensoriamento Espectral por Detector de Energia e os pontos simulados do Espectrograma (RSR = -3dB).	51
Figura 5.4 - Curvas de <i>PFA</i> x <i>PND</i> para diferentes cenários de RSR (variando de -10 dB e 0 dB), $N_{\text{symb}} = 30$.	52
Figura 5.5 - Distribuição Espectrograma com uma N_w igual ao número de amostras de sinal, RSR = 10dB e $N_{\text{symb}} = 30$.	53
Figura 5.6 - Distribuição Espectrograma usando um N_w é igual ao N° de amostras 25, RSR = 10dB e $N_{\text{symb}} = 30$.	53
Figura 5.7 - Distribuição Espectrograma usando um N_w é igual 4 amostras, RSR = 10dB e $N_{\text{symb}} = 30$.	53
Figura 5.8 - Curvas de <i>PFA</i> x <i>PND</i> para diferentes N_w , RSR = -3 dB e $N_{\text{symb}} = 30$.	54

Figura 5.9 - Curvas de PFA x PND para canal Rice e detecção de um, dois e três quadros TDMA continuamente e uma comparação com o desempenho do sensoriamento em um cenário AWGN.....	56
Figura 5.10 - Curvas de PFA x PND para canal Rayleigh e detecção de um, dois e três quadros TDMA continuamente e uma comparação com o desempenho do sensoriamento em um cenário AWGN.....	56
Figura 5.11 - Processo de deslocamento da janela de sincronização para determinação da posição inicial do Quadro TDMA.	58
Figura 5.12 – Porcentagem de Acertos (PA) x Número de Períodos Sensoriados para RSR igual a -10 dB	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Taxas de Transmissão e Taxas de Símbolo para os diferentes esquemas de modulação.....	8
Tabela 2.2 – Transições de Fase para a Modulação π 4-DQPSK [TETRA].....	8
Tabela 3.1 – Relação Entre a Altura da ERB e a máxima E.r.p permitida.....	30

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ATF	Análise Tempo-Frequência
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
CAF	<i>Cyclic Autocorrelation Function</i>
DAS	<i>Dynamic Spectrum Access</i>
DMO	<i>Direct Mode Operation</i>
DQPSK	<i>Differential Quadrature Phase Shift Keying</i>
DTF	Distribuição Tempo-Frequência
E.r.p	<i>Effective Radiated Power</i>
ERB	Estação Rádio Base
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
GSM	<i>Global System for Mobile</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
LGT	Lei Geral das Telecomunicações
LOS	<i>Line of Sight</i>
NLOS	<i>on Line of Sight</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
RCPC	<i>Rate-Compatible Punctured Convolutional</i>
RSR	Razão Sinal Ruído
SCD	<i>Spectral Correlation Density</i>
SLMP	Serviço Limitado Móvel Privativo
STFC	Serviço Telefônico Fixo Comutado
STFT	<i>Short-Time Fourier Transform</i>
SwMI	<i>Switching and Management Infrastructure</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TETRA	<i>Terrestrial Trunked Radio</i>
TF	Transformada de Fourier
TMO	<i>Trunking mode Operation</i>

UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
UIT	União Internacional de Telecomunicações
UIT-R	Setor de Radiocomunicação da União Internacional de Telecomunicações

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - CONTEXTUALIZAÇÃO

No contexto de Grandes Eventos internacionais sediados pelo Brasil entre 2012 e 2016, como Rio+20, Copa das Confederações, Copa do Mundo de Futebol e Jogos Olímpicos, temas como segurança pública ganham foco e um viés ainda mais prioritário no âmbito governamental. Uma das principais ferramentas dos organismos responsáveis pela segurança pública é a radiocomunicação. Esse tipo de operação demanda critérios como alta confiabilidade, alta disponibilidade e taxas razoáveis de transmissão.

Vislumbrando a necessidade de uma faixa de radiofrequência específica para essa finalidade, a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) disponibilizou, por intermédio da Resolução n.º 557/2010 [1], uma faixa de radiofrequência em UHF para utilização exclusiva por entidades de segurança pública, em 380 MHz. Entretanto, sendo o espectro de radiofrequências um recurso escasso e disputado, principalmente no que diz respeito às faixas de frequência em UHF, a largura da faixa de radiofrequência definida pela citada resolução para uso por entidades de segurança pública foi de 2 MHz para o enlace de subida e 2MHz para o enlace de descida. Esta largura espectral tem se mostrado insuficiente para o atendimento de todas as entidades envolvidas no contexto de segurança pública no Brasil (Polícia Federal, Polícia Rodoviária Federal, Secretárias de Segurança Pública, etc.). Dessa forma, essas entidades terão de, a princípio, compartilhar os canais disponíveis, realizando a coordenação das frequências. Somado a este cenário, existe a necessidade de se evitar a chamada “interferência prejudicial¹” que, em se tratando de atividades críticas, pode significar o sucesso ou fracasso em salvar vidas, evitar práticas criminosas, entre outros aspectos.

A partir dessa alta demanda por canais de radiofrequência de forma confiável e com disponibilidade, surge a motivação para a utilização de uma tecnologia que permita que usuários secundários aproveitem oportunidades no espectro de radiofrequência, em situações onde o canal do primário está ocioso, para realizar sua transmissão sem correr o risco de prejudicar sua comunicação e, tão pouco, a do usuário primário. Uma das tecnologias aplicáveis é a do Rádio Cognitivo. A União Internacional de Telecomunicações definiu, no Grupo de Trabalho 5A da UIT-R (em novembro de 2008), os Sistemas de Rádio Cognitivo como sistemas de rádio que possibilitam [2]:

¹ O termo Interferência Prejudicial é definido pela União Internacional de Telecomunicações – UIT [<http://www.itu.int/net/about/basic-texts/constitution/annex.aspx>] e no Regulamento de Uso do Espectro Radioelétrico [3]

- Obter o conhecimento² do ambiente operacional de rádio³ e políticas estabelecidas, e monitorar os padrões de uso e as necessidades dos usuários;
- Ajustar Dinamicamente e de forma autônoma seus parâmetros e protocolos operacionais de acordo com esse conhecimento, a fim de atingir os objetivos pré-definidos, por exemplo, utilização mais eficiente do espectro, e
- Aprender com os resultados de suas ações, a fim de melhorar ainda mais seu desempenho.

Essa definição foi adaptada em fevereiro de 2009 pelo Grupo de Trabalho 1B da UIT-R conforme [4]. O Histórico dessa tecnologia é apresentado pela Figura 1.1:



Figura 1.1 - Histórico do Rádio Cognitivo [5].

A aplicação de Sistemas de Rádio Cognitivo será o objeto desse estudo, e o foco principal será a utilização de uma tecnologia de sensoriamento espectral que melhor aproveite o espectro disponível em faixas disputadas, como é o caso da faixa de 380 MHz disponibilizada para entidades de Segurança Pública. Dessa forma, será proposto um método para verificar, no tempo e na frequência, quais são as oportunidades de utilização, permitindo que, em determinados instantes, uma entidade de segurança pública “A” possa utilizar os canais outorgados para a entidade “B” e vice-versa. Para esse caso, é necessário um método de sensoriamento rápido e eficiente e, além disso, que possibilite a varredura

² Obtenção do conhecimento pode ser realizada, por exemplo, por meio da detecção do espectro, utilizando bases de dados conhecidas, por colaboração entre usuários, ou por difusão e recepção de informação de controle.

³ Ambiente Operacional de Rádio abrange ambientes de rádio e geográficos e estados internos do Sistema de Rádio Cognitivo.

em banda larga, para que seja possível obter todas as oportunidades de utilização dos canais outorgados para as outras entidades de segurança pública na faixa. A partir daí, pode-se evitar uma série de acordos necessários ao compartilhamento do espectro (que podem ser extremamente burocráticos em se tratando de órgãos públicos), uma vez que a alocação dinâmica (conhecida como *Dynamic Spectrum Access* - DSA [6]) tem a finalidade de automatizar o processo de definição de utilização do canal, de forma oportunista e evitando a interferência prejudicial. Para tanto, as redes de acesso dinâmico devem possuir, dentre outras, as seguintes características:

- Sensoriamento do espectro: capacidade de verificar a não utilização de porções do espectro levando em consideração o instante da utilização, evitando ocorrência de interferência prejudicial aos usuários primários;
- Análise: Com base nas informações do sensoriamento, a rede deve poder analisar as condições de uso do espectro com vista a subsidiar o procedimento de gerenciamento do espectro; e
- Gerenciamento do espectro: Determinar a utilização das oportunidades de acordo com a demanda dos usuários secundários.

Dentre os principais sistemas de radiocomunicação digital utilizados por entidades de Segurança Pública em todo o mundo, se encontra o *Terrestrial Trunked Radio* (TETRA) [7]. O padrão TETRA foi desenvolvido pela *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) e teve sua primeira versão publicada em 1995. Trata-se de um sistema de radiocomunicação digital que se vale de multiplexações de sinal nas modalidades *Time Division Multiple Access* (TDMA) e *Frequency Division Multiple Access* (FDMA) simultaneamente (de forma similar ao GSM), ou seja, permite a alocação de usuários em diversos canais de frequência e em períodos de tempo pré-definidos nesses canais. Esse sistema permite modulações de fase (como a $\frac{\pi}{4}$ -DQPSK) e modulações de fase e amplitude (QAM). Por suas características, o sistema TETRA se apresenta como uma boa oportunidade de estudo para métodos de sensoriamento espectral.

1.2 - DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Tomando como base a premissa de que a principal função das tecnologias de Rádio Cognitivo é a utilização do espectro de forma oportunista, evitando a interferência prejudicial da maneira mais eficiente possível, surgiram questionamentos relativos à utilização dessas em sistemas TDMA/FDMA. O foco é o aproveitamento não só dos canais

disponíveis em determinada faixa, mas também dos *time slots* ociosos destes canais. Nesse interim, foram estudados métodos de sensoriamento conhecidos como Análise Tempo-Frequência (ATF). As ATFs compõe um conjunto de transformadas que permitem a visualização da distribuição do sinal, simultaneamente, nos domínios do tempo e da frequência. Isso as diferencia dos demais mecanismos de sensoriamento espectral mais conhecidos, como o Detector de Energia e a Detecção Cicloestacionária (maiores detalhes no Capítulo 4). Algumas das distribuições que compõem as ATFs são a Transformada de Fourier de Tempo Curto (*Short-Time Fourier Transform* – STFT), o Espectrograma e a Transformada de Wigner-Ville [8][9][10]. Para a realização desse trabalho, foram feitas pesquisas a respeito da utilização das Análises Tempo-Frequência para a verificação de *time slots* ociosos em sistemas TDMA/FDMA, entretanto, não foram encontrados trabalhos com esse foco.

A realização de um estudo que permita a aplicação do sensoriamento do espectro, discriminando canais e *time slots* ociosos pode ser um grande passo para aplicação prática da tecnologia de Rádio Cognitivo.

1.3 - OBJETIVOS

Deve ser possível definir, dentre as técnicas disponíveis na literatura, a mais adequada ao problema proposto. Desta forma, o estudo tem como objetivo comparar técnicas de sensoriamento de espectro como o Detector de Energia e a Detecção Cicloestacionária com mecanismos de detecção baseados em Análise Tempo-Frequência e verificar qual melhor se adapta ao sensoriamento de sistemas TDMA/FDMA (neste trabalho, sistemas baseados no protocolo TETRA). Após essa verificação, são realizados diversos testes, baseados em simulações pelo método de Monte Carlo [11], em ambientes com ruído *Additive White Gaussian Noise* (AWGN) e ainda com canais sobre efeito de desvanecimentos seletivos em frequência e variantes no tempo, modelados por processos do tipo Rice e Rayleigh, para verificar o desempenho do método de sensoriamento escolhido.

Outro problema a ser abordado diz respeito à sincronização do tempo de sensoriamento do método escolhido com o Quadro TDMA do sistema TETRA. Para que seja possível determinar corretamente as oportunidades de utilização, pelo usuário secundário, do canal disponível para o usuário primário, é necessário saber exatamente o início e o final do quadro transmitido. Caso contrário, a medida de decisão do sensoriamento espectral não irá utilizar toda a energia transmitida pelo usuário primário em determinado *time slot* e o rádio cognitivo pode errar na sua decisão de alocar um usuário secundário no canal, naquele

instante. Em cenários pouco degradados, pode-se retirar essa informação do canal de controle do sistema primário. Entretanto, em muitas ocasiões, o Rádio Cognitivo poderá estar sensoriando o espectro em um ambiente altamente degradado (com baixíssima Razão Sinal Ruído – RSR e, em muitos casos, sobre efeito de desvanecimento seletivo em frequência). Nesses cenários é condizente imaginar que não seria possível retirar nenhuma informação do canal de controle do sistema primário e, portanto, é extremamente importante utilizar um mecanismo de sincronização entre o período de sensoriamento e o Quadro TDMA sensoriando, de modo a evitar a utilização, por um usuário secundário, de um determinado canal ocupado pelo usuário primário. Esse método de sincronização é descrito no Capítulo 5.

1.4 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho se divide em seis Capítulos, sendo eles:

- Capítulo 1: traz a contextualização do estudo, a definição do problema a qual se propõe a análise, os objetivos do trabalho e, por fim, a organização do mesmo.
- Capítulo 2: introduz os conceitos e demais definições do padrão ETSI EN 300 392-2 [7]. Neste capítulo busca-se uma compreensão da estrutura de transmissão do protocolo em questão, tipos de modulação possíveis, tipo de multiplexação, taxas de transmissão, etc.
- Capítulo 3: busca um balizamento dos aspectos regulatórios relacionados com as comunicações críticas, principais resoluções e faixas de frequências disponibilizadas pela Anatel para utilização por entidades de segurança pública.
- Capítulo 4: realiza uma introdução teórica a respeito dos principais métodos de sensoriamento de espectro. Compara a teoria envolvida entre os mecanismos e define aquele que será foco das simulações contidas no capítulo 5.
- Capítulo 5: nesse capítulo são realizadas diversas simulações para o método de sensoriamento escolhido. Dessa forma é verificado seu desempenho para os diferentes tipos de cenários aos quais o sensor poderá ser submetido. É, ainda, proposto um método de sincronização entre o período de sensoriamento e o Quadro TDMA do sistema TETRA.
- Capítulo 6: nesse se apresentam as conclusões a respeito do trabalho e propostas para futuras pesquisas relacionadas a ele.

2 - PROTOCOLO TETRA

2.1 - INTRODUÇÃO

Como citado no capítulo 1, este trabalho tem por objetivo apresentar uma proposta de solução para o problema da escassez espectral aplicada a uma das mais sensíveis atividades que se valem das telecomunicações no Brasil e no mundo: os serviços de segurança pública. Para tanto, pretende-se abordar a utilização dos métodos de sensoriamento espectral aplicados a um protocolo de comunicação digital de radiochamada. Para efeito de estudo, será abordado o protocolo de radiocomunicação TETRA.

O protocolo TETRA foi idealizado pelo Instituto Europeu de Padrões de Telecomunicações (*European Telecommunications Standards Institute* - ETSI) como um padrão europeu para desempenhar os serviços móveis de radiocomunicação digital troncalizada⁴ e teve sua primeira versão publicada no ano de 1995, conforme cita [12]. Atualmente encontra-se na versão [7]. Este padrão incluiu aspectos tecnológicos referentes à interface aérea, interfaces de rede, entre outros. Traz modos de operação ponto-a-ponto e ponto-área, e permite operação com ou sem comunicação direta com a estrutura central (*backbone*), de forma *ad-hoc*⁵. Dentre as principais aplicações para o referido protocolo, a que mais se destaca é a relacionada à segurança pública. O padrão TETRA propicia um sistema robusto e que opera em frequências que permitem o balanceamento entre área de cobertura e taxas de transmissão, adequado aos serviços emergenciais. Como estes serviços não requerem altas taxas de transmissão (não existe a necessidade de se trafegar dados em alta velocidade, por exemplo), há uma adequação às robustas técnicas de modulação propostas pelo TETRA, como o $\frac{\pi}{4}$ -DQPSK.

2.2 - CARACTERÍSTICAS DO PROTOCOLO

A camada física de um sistema TETRA segue, basicamente, o diagrama de blocos da Figura 2.1:

⁴ Conforme descrito em <http://www.etsi.org/website/technologies/tetra.aspx>

⁵ Sistemas de comunicação *ad-hoc* são aqueles que operam de maneira descentralizada, ou seja, não necessitam de uma estrutura central para encaminhamento das informações. Nesses sistemas os usuários se comunicam diretamente.

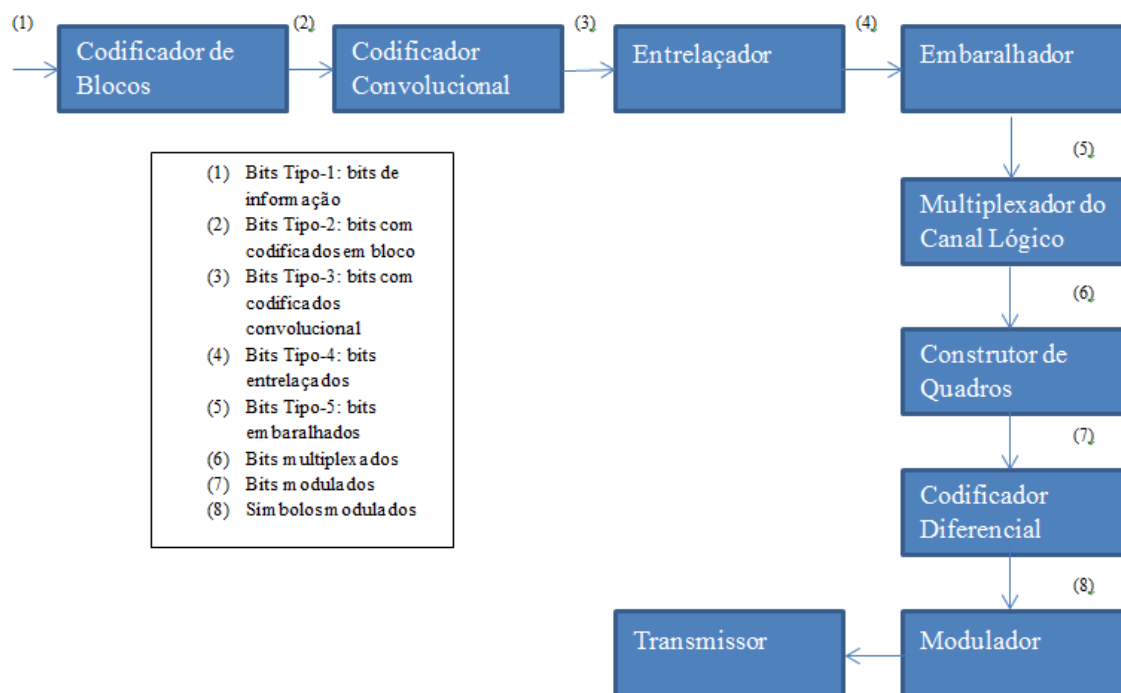


Figura 2.1- Diagrama de blocos da camada física de um sistema TETRA

A maioria dos blocos descritos pela Figura 2.1 será explicada em detalhes nos tópicos a seguir.

2.2.1 - Multiplexação e Modulação.

O padrão TETRA foi desenvolvido inicialmente para operar em um esquema de modulação robusto o suficiente de maneira a permitir a confiabilidade necessária às operações de comunicação crítica, portanto, o esquema escolhido foi o $\frac{\pi}{4}$ -DQPSK, com canais de 25 kHz [13].

A versão mais recente do padrão TETRA [7] trouxe a possibilidade de se utilizar modulações de fase e de fase e amplitude em seu escopo. Dentre as modulações de fase estão a $\frac{\pi}{4}$ -DQPSK e $\frac{\pi}{8}$ -D8PSK, com largura de banda das portadoras de 25 kHz. Já as modulações de fase e amplitude envolvem a 4-QAM, 16-QAM e 64-QAM, com largura de banda das portadoras de 25 kHz, 50 kHz, 100 kHz e 150kHz. Este trabalho, em específico, terá foco na modulação $\frac{\pi}{4}$ DQPSK, uma vez que essa é a mais difundida no mercado. As taxas de transmissão e de símbolos para os diferentes esquemas de modulação, considerando canais de 25 kHz, são descritos pela Tabela 2.1:

Tabela 2.1 – Taxas de Transmissão e Taxas de Símbolo para os diferentes esquemas de modulação

Esquema de Modulação	Taxa de Transmissão	Taxa de Símbolo
$\frac{\pi}{4}$ -DQPSK	36 kbps	18.000 símbolos/s
$\frac{\pi}{8}$ -D8PSK	54 kbps	18.000 símbolos/s
4-QAM	38,4 kbps	19.200 símbolos/s
16-QAM	76,8 kbps	19.200 símbolos/s
64-QAM	115,2 kbps	19.200 símbolos/s

Como o estudo estará focado na modulação $\frac{\pi}{4}$ -DQPSK, suas características são apresentadas, nesse momento. A equação (2.1) define o símbolo $S(k)$ gerado pela modulação $\frac{\pi}{4}$ -DQPSK no instante “ k ”:

$$S(k) = S(k - 1) \exp(jD_{\phi}(k)). \quad (2.1)$$

Onde $S(k)$ é o símbolo gerado no instante “ k ”, $S(k-1)$ é o símbolo no instante imediatamente anterior a $S(k)$, e $D_{\phi}(k)$ representa a transição de fase, em radianos, a ser aplicada sobre $S(k-1)$ para se chegar ao símbolo $S(k)$.

A Tabela 2.2 mostra as transições de fase para o esquema de modulação $\frac{\pi}{4}$ -DQPSK:

Tabela 2.2 – Transições de Fase para a Modulação $\frac{\pi}{4}$ -DQPSK [TETRA]

B(2k-1)	B(2k)	$D_{\phi}(k)$
1	1	$-3\pi/4$
0	1	$+3\pi/4$
0	0	$+\pi/4$
1	0	$-\pi/4$

Onde $B(.)$ representa o bit modulado da sequência a ser transmitida. O símbolo complexo modulado, portanto, terá 8 possibilidades, formadas por dois conjuntos de constelações com quatro símbolos cada. O primeiro conjunto possui as fases: $0, \frac{\pi}{2}, \pi$ e $\frac{-\pi}{2}$. Já o segundo possui as fases: $\frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, \frac{-\pi}{4}$ e $\frac{-3\pi}{4}$. Como fica evidenciado pela Figura 2.2, cada símbolo só permite a transição para um dos quatro símbolos do outro conjunto de constelações:

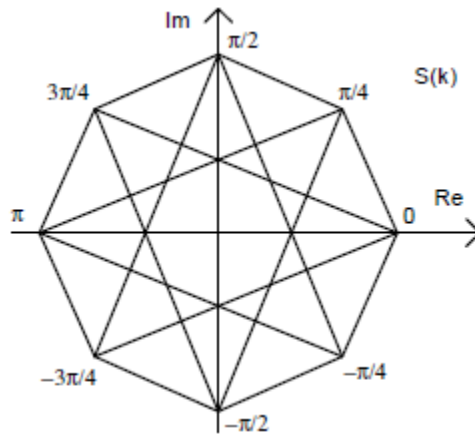


Figura 2.2- Constelação da Modulação $\frac{\pi}{4}$ - DQPSK [7]

O sinal modulado terá a seguinte característica:

$$M(t) = \Re\{s(t) \exp(j(2\pi f_c t + \phi_0))\} \quad (2.2)$$

onde $\Re\{ \}$ indica a parte real do termo entre chaves, “ f_c ” é a frequência da portadora, “ ϕ_0 ” é uma fase arbitrária e $s(t)$ é a envoltória complexa do sinal modulado, definida por:

$$s(t) = \sum_{k=0}^K S(k)g(t - t_k). \quad (2.3)$$

Na equação acima, “ K ” representa o número máximo de símbolos, $t_k = kT$ é o instante de tempo correspondente ao símbolo modulado $S(k)$ e “ T ” é a duração do símbolo. O termo $g(t)$ é a forma de onda do símbolo ideal, obtida da transformada inversa de Fourier de $G(f)$, em que:

$$G(f) = 1 \text{ para } |f| \leq (1 - \alpha)/2T$$

$$G(f) = \sqrt{0.5(1 - \text{sen}(\pi(2|f|T - 1)/2\alpha))} \text{ para } (1 - \alpha)/2T \leq |f| \leq (1 + \alpha)/2T \quad (2.4)$$

$$G(f) = 0 \text{ para } |f| \geq \frac{(1 - \alpha)}{2T},$$

onde α é o fator de *roll-off*, o qual determina a largura da banda de transmissão, para uma determinada taxa de símbolos.

O filtro de modulação ideal para este tipo de sistema deve ser um filtro de fase definido por:

$$|H(f)| = G(f) \quad (2.5)$$

Quanto ao método de multiplexação, o padrão TETRA de radiocomunicação digital opera utilizando um sistema TDMA com quatro *time slots* distribuídos em uma banda com espaçamento entre portadoras de 25 kHz para modulações de fase e de 25 kHz, 50 kHz, 100 kHz e 150 kHz para modulações do tipo QAM.

2.2.2 - Construção dos Quadros.

A estrutura de quadros do protocolo TETRA é ilustrada pela Figura 2.3:

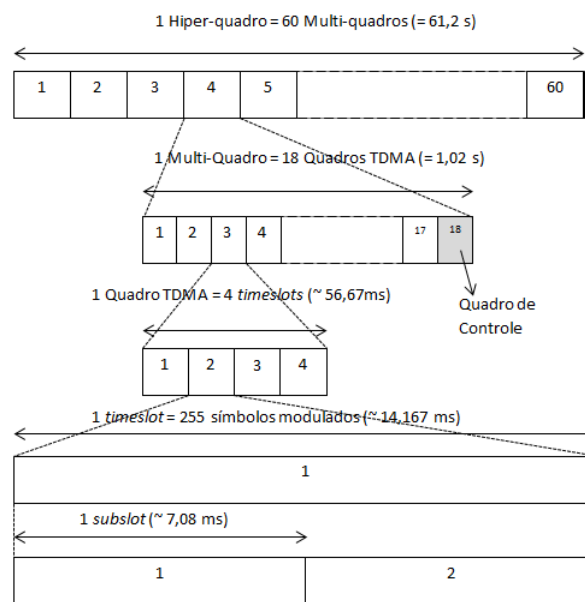


Figura 2.3- Estrutura do quadro TDMA de um Sistema TETRA

Um hiper-quadro é dividido em 60 multi-quadros e possui a duração de 61,2 segundos. Cada multi-quadro é dividido em 18 Quadros TDMA, durando 1,02 segundos. O 18º quadro é utilizado como quadro de controle. O Quadro TDMA é então composto por 4 *time slots*, de 14,167 milissegundos cada, onde são alocados os recursos para o usuário. Para sistemas TETRA com modulação de fase, cada *time slot* corresponde a 255 símbolos

modulados. Os *time slots* se subdividem em 2 *subslots*, que podem ser utilizados para sinalização e controle. Como as estações móveis do sistema primário podem se encontrar em várias posições, inclusive no extremo oposto do sensor espectral do usuário secundário, além de apresentarem desvanecimento seletivo em frequência em sua transmissão, considera-se que o enlace poderá estar sujeito aos piores cenários de ruído e desvanecimento. Dessa forma buscou-se um foco no sensoriamento do enlace de subida do usuário primário. Portanto, a Figura 2.4 ilustra a estrutura de um *time slot* do enlace de subida do sistema TETRA:

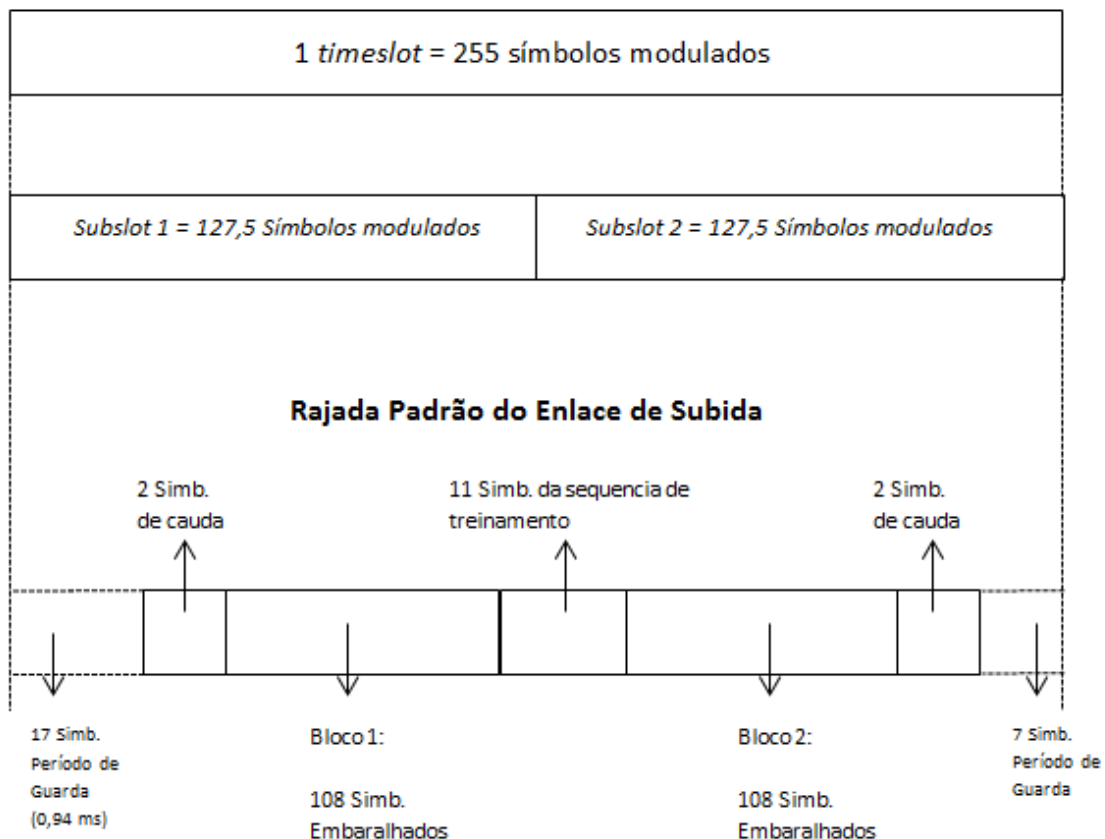


Figura 2.4 - Estrutura de *time slot* do enlace de subida de um sistema TETRA

Como fica explícito na Figura 2.4, o enlace de subida possui um período de guarda correspondente a 24 símbolos modulados entre *time slots* consecutivos que possui o objetivo de evitar a interferência Inter simbólica.

2.2.3 - Codificação, entrelaçamento e embaralhamento.

O padrão TETRA ainda propõe a utilização de alguns dos principais mecanismos de controle e correção de erros, como códigos corretores de erro, entrelaçamento e

embaralhamento. A Figura 2.5 mostra, para modulações de fase, as interfaces dos mecanismos supracitados:

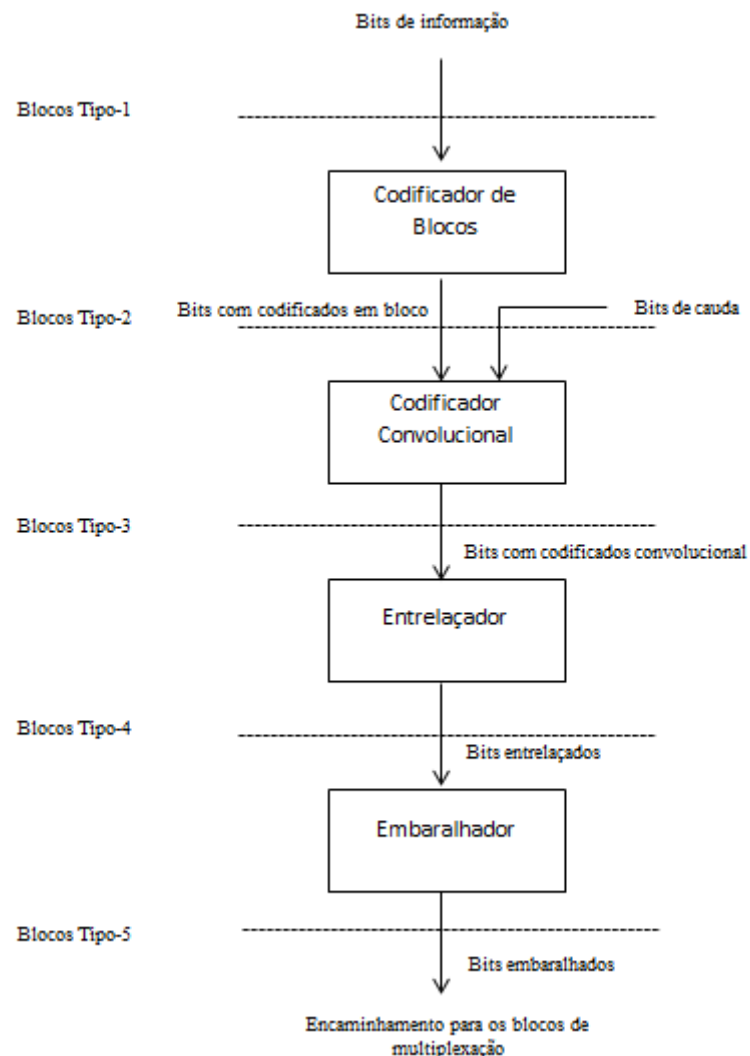


Figura 2.5 - Interfaces dos mecanismos de Codificação, entrelaçamento e embaralhamento

2.2.3.1 - Codificação

O processo de codificação passa por duas etapas principais na qual fazem parte três classes de bits. Os bits Tipo-1 são os bits de informação entregues pela camada MAC, que são submetidos a uma codificação de bloco, gerando os bits de Tipo-2. Os bits de Tipo-2 são adicionados de bits de cauda e submetidos a um bloco de codificação convolucional, conhecido como *Rate-Compatible Punctured Convolutional Code* (RCPC) de 16 estados. O código RCPC realiza a codificação da seguinte forma: inicialmente codifica os bits a partir de um “código mãe” de 16 estados com taxa de codificação de $\frac{1}{4}$; em seguida,

realiza uma perfuração no “código mãe” de forma a obter taxas de codificação de 2/3, 1/3, 292/432 e 148/432. O resultado desse processo são os bits de Tipo-3.

2.2.3.2 - Entrelaçamento

Para modulações de fase, a padronização define a utilização de um entrelaçamento de bloco. O entrelaçamento de bloco (K,a) , sendo “ K ” o total de bits do Tipo-3, o novo ordenamento dos bits fica da seguinte forma:

$$b_4(k) = b_3(i), \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (2.6)$$

em que “ i ” é o índice que indica a posição do bit Tipo-3 a ser entrelaçado, $k = 1 + ((a \times i) \bmod K)$, b_4 indica os bit Tipo-4, após o entrelaçamento, e b_3 os bit de Tipo-3.

2.2.3.3 - Embaralhamento

O método de embaralhamento proposto pelo protocolo TETRA prevê a transformação de bits Tipo-4 em bits Tipo-5 fazendo a soma módulo 2 definida a seguir:

$$b_5(k) = b_4(k) + p(k), \quad \text{para } k = 1, 2, \dots, K. \quad (2.7)$$

Na equação acima, $p(k)$ é o k -ésimo elemento da sequência de embaralhamento e b_5 indica os bits Tipo-5. Demais informações referentes ao procedimento de embaralhamento podem ser encontradas em [7].

2.2.4 - Modos de Operação.

O padrão TETRA opera, basicamente, sob dois modos: o Modo de Operação Troncalizado (*Trunking mode Operation – TMO*) e o Modo de Operação Direto (*Direct Mode Operation – DMO*) [14].

2.2.4.1 – Modo de Operação Troncalizado

O Modo de Operação Troncalizado, que será referenciado a partir de agora como modo TMO, funciona sobre a modalidade despacho (definida no Capítulo 3) e utiliza uma

estrutura de comunicação baseada na troca de informação de móveis com Estações Rádio Base (ERB), assim como a maioria dos sistemas de comunicação móveis. A estrutura de rede se assemelha à arquitetura do GSM, também desenvolvido pela ETSI. A transmissão pode ser *half duplex* ou *full duplex*, possibilitando o fornecimento de acesso à rede para muitos clientes através do compartilhamento de um conjunto de linhas e frequências ao invés de fornecê-los individualmente. A faixa de operação varia entre 380 MHz a 900 MHz. Opera utilizando uma estrutura central que se comunica com as demais estações móveis (*Switching and Management Infrastructure – SwMI*).

2.2.4.1 - Modo de Operação Direta

O modo de operação direta, doravante denominado DMO, é um dos grandes diferenciais da utilização do TETRA para serviços de segurança pública. Ele permite a comunicação entre as diversas estações móveis mesmo em situações onde não há cobertura direta de uma ERB, ou seja, permite que haja comunicação mesmo que o móvel não esteja acessando a rede TMO, a qual faz parte, diretamente. Este modo de operação se utiliza de canais específicos, distintos dos troncalizados, e a operação é normalmente realizada no modo *simplex*. A cobertura típica em áreas urbanas é de 400 m, com tempo máximo de realização dos procedimentos de chamada de 150 ms [14]. Existem quatro modos operacionais básicos para a utilização do DMO, listados a seguir:

2.2.4.1.1. Modo *Back-to-Back*

A operação *Back-to-Back* permite que o usuário que está na borda da célula ou fora da Rede TMO se comunique por meio da Rede DMO, onde os usuários se trocam informações diretamente de forma *ad-hoc*. A Figura 2.6 ilustra tal operação:

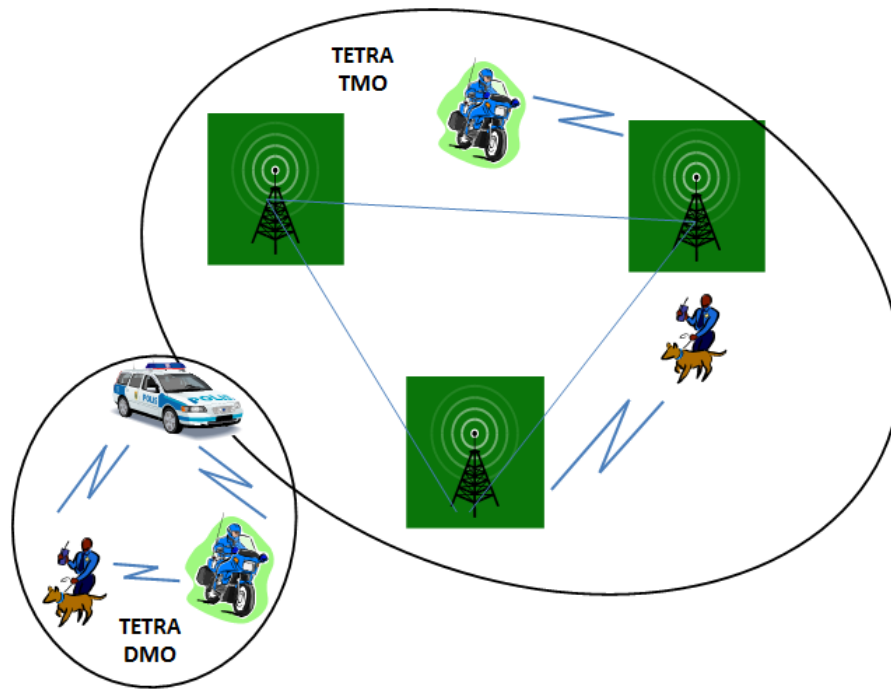


Figura 2.6 - Modo *Back-to-Back*.

Desta forma, o usuário que se encontra na borda da célula da rede troncalizada possui um considerável ganho em sua área de comunicação e a confiabilidade de não ficar isolado caso perca contato com a rede TMO, o que, em se tratando de comunicação crítica pode fazer a diferença entre operações bem e mal sucedidas. A operação *Back-to-Back* permite também a comunicação entre usuários, dentro da rede troncalizada, mesmo quando há uma falha de comunicação no tronco, conforme mostra a Figura 2.7:

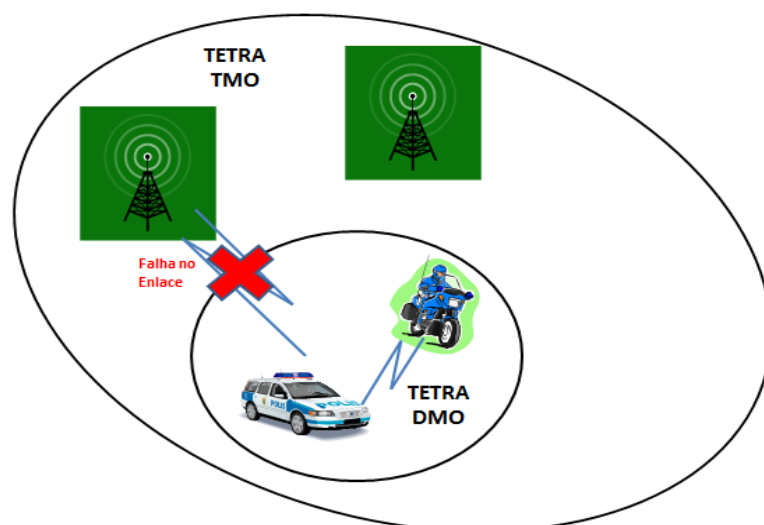


Figura 2.7 - Operação *Back-to-Back* na prevenção de falhas na Comunicação com a Estação Rádio Base – ERB.

Desta forma, aumenta-se a probabilidade de se obter uma comunicação bem sucedida entre usuários, uma vez que os mesmos não precisam, necessariamente, estarem conectados à rede TMO para trocarem informações. Há ainda a possibilidade de comunicação em localidades onde nem mesmo existe uma rede troncalizada. Operações em áreas rurais, por exemplo, podem ser executadas unicamente com a comunicação direta entre os usuários, permitindo assim a diminuição dos custos, uma vez que não é necessária, de acordo com a situação, a instalação de uma Rede TMO na localidade.

2.2.4.1.2. Modo Repetidor

O modo de operação repetidor permite que determinado usuário atue como repetidor do sinal de um segundo usuário para um terceiro usuário, em uma rede DMO:

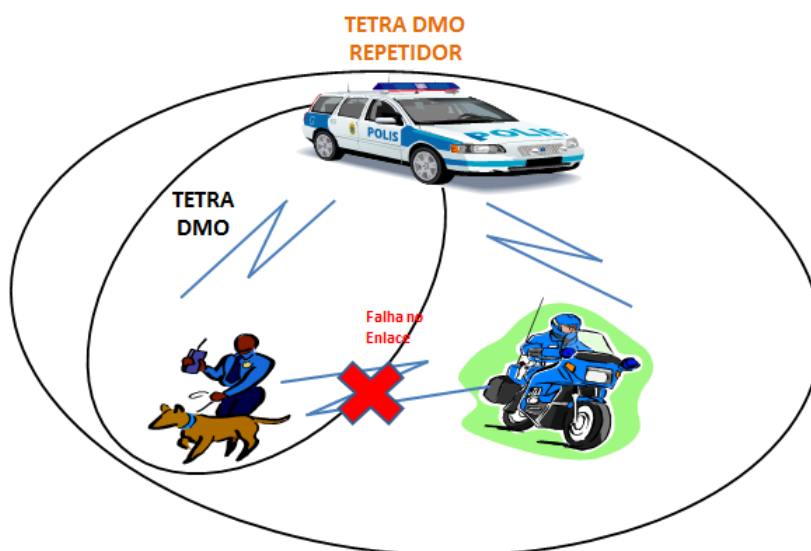


Figura 2.8 - Modo Repetidor

A Figura 2.8 representa a operação do TETRA DMO como repetidor em uma situação onde o caminho direto entre dois usuários falha. Neste sentido, um terceiro usuário pode repassar a informação desejada utilizando essa função do protocolo TETRA. Assim como no modo de operação *Back-to-Back*, o modo de operação Repetidor permite maior confiabilidade no sistema, uma vez que um usuário pode atuar como uma redundância para que determinada comunicação se complete. Permite ainda um incremento no que tange a área de cobertura de uma rede TETRA DMO (deve-se notar que, nesse modo, não há operação na Rede TMO, o que o diferencia do Modo *Gateway*).

2.2.4.1.3. Modo *Gateway*

O modo de operação *Gateway* possui a interessante característica de possibilitar que um usuário sirva de porta de entrada para a Rede TMO para outro que se encontra em comunicação direta com o mesmo (via Modo DMO), mas que não está inserido a essa rede. Desta forma, e se valendo de uma combinação com outros modos de operação, a área de cobertura de uma determinada rede troncalizada pode ser maximizada de uma forma extremamente conveniente. A Figura 2.9 ilustra tal operação:

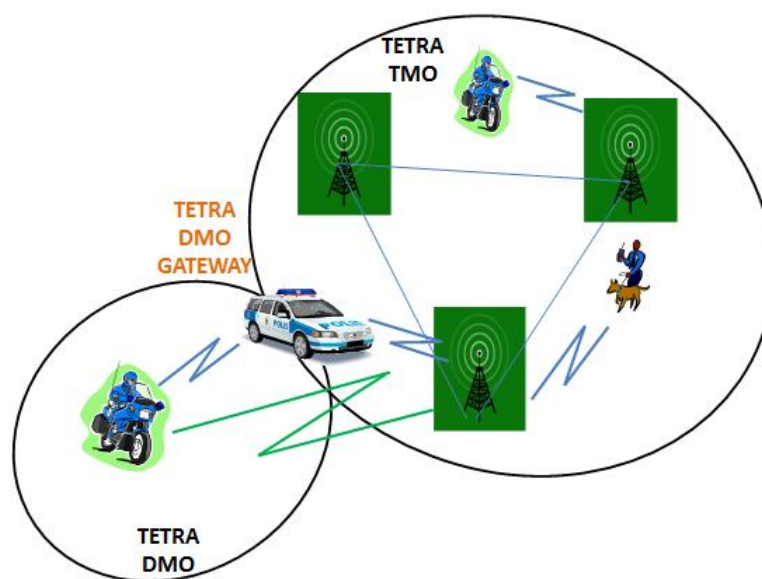


Figura 2.9 - Modo *Gateway*

Tal solução permite um ajuste adequado ao comprometimento entre área de cobertura x custo, uma vez que se pode criar uma rede TMO menor para atender determinada área e, mesmo assim, se obter uma comunicação confiável em termos de cobertura.

2.2.4.1.4. Modo *Dual Watch*

O modo de operação *dual watch* disponibiliza a capacidade de um determinado usuário se comunicar, simultaneamente, com a rede TMO e com determinado usuário na Rede DMO. A figura 2.10 ilustra este modo de operação:

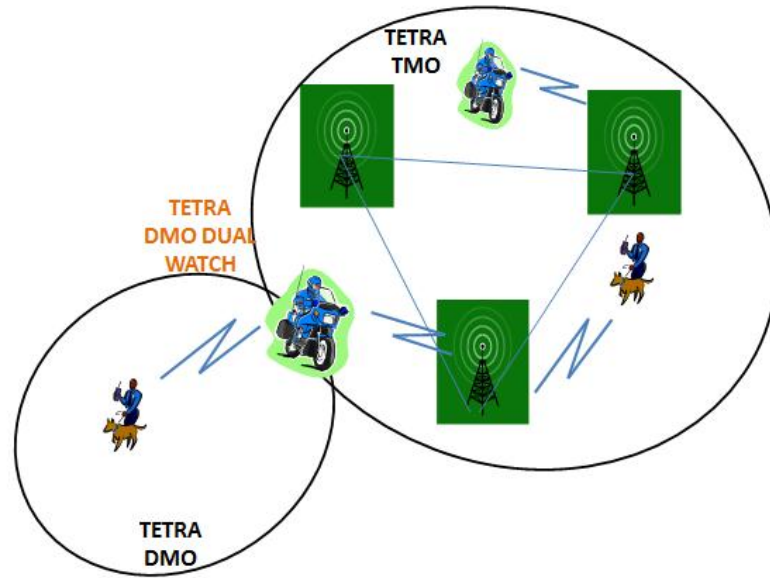


Figura 2.10 - Modo *Dual Watch*

Desta forma, é possível se obter informações tanto da rede troncalizada quanto da DMO e, portanto, compartilhar com a rede os dados dos usuários que não se encontram no alcance da mesma.

O Modo de operação direta pode ser considerado um desafio para o sensoriamento espectral, uma vez que insere novos participantes à rede troncalizada, mesmo estando fora do raio de cobertura da ERB.

2.3 - CONCLUSÃO

Neste Capítulo buscou-se aprofundar os conceitos relativos ao protocolo de radiocomunicação digital que servirá como base para o estudo do sensoriamento de espectro em redes TDMA/FDMA. Para tanto, foram descritos os blocos que compõem o sistema, desde sua codificação até a transmissão propriamente dita. Outro fator destacado foi o relativo aos modos de operação, que podem ou não utilizar a rede troncalizada, o que permite grande aumento de robustez e área de cobertura aos sistemas que se valem deste protocolo.

3 - ASPECTOS LEGAIS E REGULAMENTARES

3.1 - INTRODUÇÃO

Neste Capítulo serão tratados os aspectos regulatórios que envolvem desde a execução do serviço de radiocomunicação troncalizado, o qual se insere a rede TETRA, até as questões referentes aos sistemas de Rádio Cognitivo para compartilhamento eficiente do espectro. Tendo em vista que a Agência Nacional de Telecomunicações (autarquia em regime especial vinculada ao Ministério das comunicações) é responsável por editar as normas e resoluções referentes ao setor de telecomunicações, com exceção das de radiodifusão, será realizado estudo sobre a lei à qual o setor está submetido, Lei n.º 9472/97 [15] ou Lei Geral das Telecomunicações (LGT), e os regulamentos específicos expedidos pela citada agência.

Serão tratadas a questão da escassez espectral e a tecnologia de sensoriamento do espectro aplicada ao Rádio Cognitivo do ponto de vista regulatório, além das modificações necessárias aos regulamentos para que se possa adequar tal tecnologia à realidade das telecomunicações no Brasil.

Para dar início aos estudos, este trabalho apresenta, por meio da Figura 3.1, o último levantamento realizado pela Anatel de atribuição do espectro de radiofrequências, visando possibilitar ao leitor a noção da escassez espectral e uma visão da importância de uma tecnologia que visa o compartilhamento dinâmico de frequências para cenários futuros:

3.2 - A LEI GERAL DE TELECOMUNICAÇÕES (LGT) E OS SERVIÇOS DE TELECOMUNICAÇÕES

A LGT define o serviço de telecomunicações da seguinte forma:

Art. 60. Serviço de telecomunicações é o conjunto de atividades que possibilita a oferta de telecomunicação.

Ela define ainda que os serviços de telecomunicações são classificados de acordo com a abrangência e o regime jurídico. Quanto à abrangência, estes podem ser de interesse coletivo ou de interesse restrito. Já em relação ao regime jurídico, podem ser definidos como públicos ou privados. Entretanto, os serviços prestados em regime público somente comportarão os que também forem de interesse coletivo, conforme os Artigos 64 e 67 desta lei:

Art. 64. Comportarão prestação no regime público as modalidades de serviço de telecomunicações de interesse coletivo, cuja existência, universalização e continuidade a própria União comprometa-se a assegurar.

Parágrafo único. Incluem-se neste caso as diversas modalidades do serviço telefônico fixo comutado, de qualquer âmbito, destinado ao uso do público em geral.

Art. 67. Não comportarão prestação no regime público os serviços de telecomunicações de interesse restrito.

Atualmente, somente o Serviço Telefônico Fixo Comutado (STFC) é prestado em regime público.

Os serviços podem ser prestados exclusivamente no regime público, exclusivamente no regime privado ou concomitantemente nos dois regimes, desde que atendida à particularidade do Artigo 67 da lei. Serviços prestados em regime público possuem obrigações de universalização e continuidade, em contrapartida à concessão de utilização de uma infraestrutura de rede já disponível. Já serviços prestados em regime privado não possuem tais obrigações e não recebem as citadas concessões. Desta forma, a LGT indica:

Art. 63. Quanto ao regime jurídico de sua prestação, os serviços de telecomunicações classificam-se em públicos e privados.

Parágrafo único. Serviço de telecomunicações em regime público é o prestado mediante concessão ou permissão, com atribuição a sua prestadora de obrigações de universalização e de continuidade.

Art. 83. A exploração do serviço no regime público dependerá de prévia outorga, pela Agência, mediante concessão, implicando esta o direito de uso das radiofrequências necessárias, conforme regulamentação.

Parágrafo único. Concessão de serviço de telecomunicações é a delegação de sua prestação, mediante contrato, por prazo determinado, no regime público, sujeitando-se a concessionária aos riscos empresariais, remunerando-se pela cobrança de tarifas dos usuários ou por outras receitas alternativas e respondendo diretamente pelas suas obrigações e pelos prejuízos que causar.

Art. 118. Será outorgada permissão, pela Agência, para prestação de serviço de telecomunicações em face de situação excepcional comprometedora do funcionamento do serviço que, em virtude de suas peculiaridades, não possa ser atendida, de forma conveniente ou em prazo adequado, mediante intervenção na empresa concessionária ou mediante outorga de nova concessão.

Parágrafo único. Permissão de serviço de telecomunicações é o ato administrativo pelo qual se atribui a alguém o dever de prestar serviço de telecomunicações no regime público e em caráter transitório, até que seja normalizada a situação excepcional que a tenha ensejado.

Art. 131. A exploração de serviço no regime privado dependerá de prévia autorização da Agência, que acarretará direito de uso das radiofrequências necessárias.

§ 1º Autorização de serviço de telecomunicações é o ato administrativo vinculado que faculta a exploração, no regime privado, de modalidade de serviço de telecomunicações, quando preenchidas as condições objetivas e subjetivas necessárias.

3.3 - RESOLUÇÃO N.º 259/2001 – REGULAMENTO DE USO DO ESPECTRO DE RADIOFREQUÊNCIAS

O anexo à Resolução n.º 259/2001 [3] da Anatel traz o regulamento de uso do espectro de radiofrequências. Este regulamento possui em seu escopo os conceitos referentes à citada utilização e, portanto, é o ponto de partida essencial para o estudo da tecnologia de Rádio Cognitivo.

Inicialmente, o regulamento trata dos objetivos de utilização das radiofrequências e, explicitamente, cita as aplicações em segurança e o desenvolvimento científico como objetivos:

Art. 3º O uso de radiofrequências tem como objetivos principais:

[...]

IV. servir à segurança e à defesa nacionais;

[...]

VI. permitir o desenvolvimento de pesquisa científica.

Em seguida, parte-se para definições de conceitos relativos à utilização das radiofrequências. Para evitar que o trabalho se torne excessivamente exaustivo, serão elencados somente os principais conceitos referentes ao mesmo:

Art. 4º Para os efeitos deste Regulamento, considera-se:

[...]

III. aplicações ponto-a-ponto: aquelas em que é prevista a comunicação entre duas estações fixas localizadas em pontos determinados;

[...]

IV. aplicações ponto-área bidirecionais: aquelas em que a comunicação com uma determinada estação nodal, de base ou espacial pode ser feita por estações terminais, fixas ou móveis, de qualquer ponto dentro de uma determinada área geográfica de cobertura ou, quando não existe a estação nodal, aquelas onde a comunicação bidirecional ocorre diretamente entre as estações terminais;

[...]

VI. área de coordenação: área geográfica dentro da qual os interessados devem efetuar coordenação;

VII. atribuição (de uma faixa de radiofrequências): inscrição de uma dada faixa de radiofrequências na tabela de atribuição de faixas de radiofrequências, com o propósito de usá-la, sob condições específicas, por um ou mais serviços de radiocomunicação terrestre ou espacial convencionados pela UIT, ou por serviços de radioastronomia;

[...]

VIII. autorização: ou autorização de uso de radiofrequências, ato administrativo vinculado, associado à concessão, permissão ou autorização para exploração de serviços de telecomunicações, que confere ao interessado, por prazo determinado, o direito de uso de radiofrequências;

[...]

XI. compartilhamento: uso de uma radiofrequência, faixa ou canal de radiofrequências por mais de um explorador de serviço de telecomunicações na mesma área geográfica, ao mesmo tempo ou não, sem interferência prejudicial entre eles;

[...]

XIII. coordenação: procedimento que visa tornar viável o uso, por mais de um interessado, de radiofrequência, faixa ou canal de radiofrequências de forma a prevenir ou corrigir a ocorrência de interferências prejudiciais entre as estações;

[...]

XV. destinação: inscrição de um ou mais sistemas ou serviços de telecomunicações – segundo classificação da Agência – no plano de destinação de faixas de radiofrequências editado pela Agência, que vincula a exploração desses serviços à utilização de determinadas faixas de radiofrequências, sem contrariar a atribuição estabelecida;

[...]

XXV. interferência prejudicial: qualquer emissão, radiação ou indução que obstrua, degrade, interrompa repetidamente, ou possa vir a comprometer a qualidade da comunicação;

[...]

XXXVII. uso em caráter primário: uso de radiofrequências caracterizado pelo direito à proteção contra interferências prejudiciais;

[...]

XXXVIII. uso em caráter secundário: uso de radiofrequências caracterizado pela inexistência de direito à proteção contra interferências prejudiciais;

[...]

XXXIX. uso exclusivo: hipótese em que uma autorização confere ao interessado o direito de utilizar-se privativamente e em caráter primário de uma radiofrequência, faixa ou canal de radiofrequências, numa determinada área geográfica, durante um determinado período de tempo, independentemente do número de consignações que, nesta mesma radiofrequência, canal ou faixa de radiofrequências, este venha a solicitar à Agência;

[...]

XL. uso não exclusivo: hipótese em que uma autorização confere ao interessado o direito de utilizar-se de uma radiofrequência, faixa ou canal de radiofrequências,

em caráter primário ou secundário, na mesma área geográfica e com compartilhamento;

[...]

Dadas as definições acima, passa-se a uma análise do regulamento, fazendo uma relação deste com os aspectos favoráveis e contrários (ou no qual serão necessárias modificações) à utilização da tecnologia de Rádio Cognitivo do ponto de vista regulatório. A primeira abertura à exigência de utilização de uma tecnologia como a de Rádio Cognitivo é desenvolvida no Art. 6º:

Art. 6º A Agência pode exigir dos interessados, visando o melhor aproveitamento na utilização das radiofrequências, sem prejuízo de outras medidas de interesse público:

[...]

III. o emprego de técnicas ou tecnologias específicas;

Sendo o Rádio Cognitivo uma tecnologia que visa o melhor aproveitamento do uso do espectro, o supracitado artigo permite que a agência exija sua utilização por parte dos prestadores dos serviços.

Um dos principais entraves, ou elemento passível de alteração, é a destinação da faixa de frequência para determinado serviço, uma vez que, mesmo utilizando em caráter secundário, o usuário só poderia operar sistemas autorizados para serviços em que as faixa de radiofrequências estivessem destinadas, limitando assim o escopo da tecnologia. Este entrave fica ainda mais evidente na leitura do Art 7º:

Art. 7º A Agência, ao atribuir, destinar ou distribuir faixas de radiofrequências, deverá observar:

[...]

III. as destinações, distribuições e consignações preexistentes.

Da maneira como hoje está escrito, o regulamento exige que as destinações de frequência observem o que está em vigência. Portanto, para melhor aproveitamento da tecnologia de Rádio Cognitivo, pode ser definido, por exemplo, que, para usuários operando em caráter secundário, não haja destinação de serviços.

Quanto à instrução do procedimento de autorização, verifica-se que a outorga serviços que utilizam tecnologias de Rádio Cognitivo independe de chamamento público, o que possibilita um processo menos moroso e oneroso:

Art. 31. Sempre que o requerimento apresentado pelo interessado estiver em conformidade com a regulamentação mencionada no art. 30, a autorização da radiofrequência, faixa ou canal de radiofrequências dar-se-á sem a

necessidade da realização de chamamento público e na forma dos artigos 32 e 33 deste Regulamento, quando se configurarem as seguintes situações:

I. autorização de uso não exclusivo, com compartilhamento no espaço e no tempo e sem direito a proteção contra interferências prejudiciais, de radiofrequências, canal ou faixa de radiofrequências, possibilitando-se o uso por todos os interessados;

Em seu Artigo 47, [3] define:

Art. 47. Com a finalidade de permitir maior disponibilidade de radiofrequências para futuras demandas de serviços, cada nova autorização deve ser outorgada de forma a atender as necessidades do interessado com o mínimo comprometimento possível de espectro.

§ 1o Entende-se por comprometimento a indisponibilidade da radiofrequência, faixa ou canal de radiofrequências, pelo período da emissão e na área geográfica abrangida pela emissão, de forma a tornar impossível a sua utilização por outros interessados.

Este artigo tem perfeita sintonia com os conceitos do Rádio Cognitivo, uma vez que esta tecnologia, de fato, permite maior disponibilidade de radiofrequências e visa a atender as necessidades dos interessados com o mínimo comprometimento possível de espectro.

Em seu Título IV, o Regulamento de Uso do Espectro de Radiofrequências define os mecanismos de controle do uso de radiofrequências e, portanto, pode ser o instrumento da agência para a fiscalização do correto funcionamento da tecnologia em estudo nesse trabalho. O Artigo 63 diz:

Art. 63. Compete à Agência a fiscalização do uso de radiofrequências.

§ 1o Quaisquer interferências prejudiciais deverão ser evitadas e, caso venham a existir, deverão ser imediatamente sanadas.

§ 2o A Agência poderá, a qualquer época, determinar a interrupção do funcionamento da estação quando esta estiver causando interferências prejudiciais a outras estações de radiocomunicação regularmente autorizadas, ou for constatada situação que possa causar riscos à vida humana.

O Artigo 66 define as condições de operação de forma coordenada:

Art. 66. Se após o início da operação da estação de radiocomunicação for detectada a existência de alguma interferência prejudicial deverá ser observado o seguinte:

- I. se a origem da interferência prejudicial for uma estação operando em caráter secundário e a estação interferida opere em caráter primário, a estação interferente deverá imediatamente cessar a sua transmissão e proceder os ajustes necessários para eliminar a interferência;*
- II. se a origem da interferência prejudicial for uma estação operando em caráter primário e a estação interferida também opere em caráter primário, os interessados devem proceder a coordenação de uso das radiofrequências de forma a eliminar as interferências;*
- III. se a origem da interferência prejudicial for uma estação operando em caráter secundário e a estação interferida também opere em caráter secundário, os interessados devem proceder a coordenação de uso das radiofrequências de forma a eliminar as interferências.*

Os casos de utilização de usuários operando com Rádio Cognitivo se enquadram nesses incisos.

3.4 - ASPECTOS REGULATÓRIOS DOS SISTEMAS DE RADIOCOMUNICAÇÃO TRONCALIZADOS

Os sistemas de Radiocomunicação Troncalizados operam, basicamente, através de operação do tipo despacho. O anexo à resolução n.º 404/2005 [17], traz a seguinte definição para este tipo de operação:

Art. 3º. Para fins deste Regulamento aplicam-se as seguintes definições:

[...]

IX - Operação tipo despacho: comunicação entre estações fixas e estações móveis ou entre duas ou mais estações móveis, na qual uma mensagem é transmitida simultaneamente a todas as estações ou a um grupo de estações e efetuada mediante compartilhamento automático de um pequeno número de canais, de forma a otimizar a utilização do espectro.

Atualmente, a definição do serviço que irá reger os aspectos regulatórios dos Sistemas de Radiocomunicação Troncalizados depende da faixa de frequência a qual estes irão operar, além da abrangência a qual este se insere.

A Norma n.º 13/97 [18], do Ministério das Comunicações, traz algumas definições importantes que ainda estão em vigor, tendo em vista que a citada Norma não foi substituída por regulamentos editados pela ANATEL:

4. DEFINIÇÕES

4.1 Para os fins desta norma, são adotadas as seguintes definições:

- a) *Serviço Limitado*: Serviço de telecomunicações destinado ao uso próprio do executante ou à prestação a terceiros, desde que sejam estes uma mesma pessoa, ou grupo de pessoas naturais ou jurídicas, caracterizado pela realização de atividade específica;
- b) *Serviço Limitado Privado*: Serviço Limitado, telefônico, telegráfico, de transmissão de dados ou qualquer outra forma de telecomunicações, destinado ao uso próprio do executante, seja este uma pessoa natural ou jurídica;

5. SUBMODALIDADES DE SERVIÇO

[...]

5.1.1 Constituem submodalidades de Serviço Limitado Privado, dentre outras:

- a) *Serviço Móvel Privado*: serviço móvel, não aberto à correspondência pública, destinado ao uso próprio do executante, que utiliza sistema de radiocomunicação basicamente para operações do tipo despacho nas faixas de radiofrequências de 460, 800 e 900 MHz;

A Norma n.º 002/97 [19] faz referência ao Serviço Limitado Privado, na modalidade Móvel Privado (SMP) para designar o Serviço Limitado Móvel Privativo. Com o advento do Serviço Móvel Pessoal (que possui a mesma sigla), a Resolução n.º 455/2006 [20] cria a sigla SLMP para o Serviço Limitado Móvel Privativo. Este é, como poderá ser visto no próximo tópico, o foco do estudo.

A Tabela 3.1 resume os principais aspectos regulatórios relacionados a uma possível utilização do rádio cognitivo no Brasil:

Tabela 3.1 – Aspectos regulatórios relacionados à utilização do rádio cognitivo no Brasil

Aspectos positivos	Principais entraves
A Resolução n.º 259/2001 já traz definições básicas para utilização do rádio cognitivo, como o do compartilhamento do espectro, interferência prejudicial, uso em caráter primário, uso em caráter secundário e uso não exclusivo.	O Art. 7º da Resolução n.º 259/2001 limita a destinação das faixas de radiofrequência, devendo ser observada a destinação já existente. Limita a utilização dos Rádio Cognitivos, uma vez que cada serviço tem sua especificidade.

Art. 6º da Resolução n.º 259 permite que a Anatel exija utilização de técnica ou tecnologia específica para melhor aproveitamento da radiofrequência	Falta de uma definição internacional para regulamentação da utilização da tecnologia de rádio cognitivo.
Art. 31 da Resolução n.º 259 permite a outorga da RF sem a necessidade de chamamento público quando o uso for: não exclusivo, com compartilhamento no espaço e no tempo e sem direito a proteção contra interferências prejudiciais	
Art. 47 da Resolução n.º 259 traz a obrigação de que cada autorização dever permitir o menor comprometimento possível de espectro	

3.5 - SISTEMAS DE RADIOCOMUNICAÇÃO TRONCALIZADOS PARA SEGURANÇA PÚBLICA

O Regulamento de Uso do Espectro de Radiofrequências define:

Art. 12. Para explicitar, especificar ou complementar o estabelecido neste regulamento, a Agência pode editar Regulamentos de canalização e condições específicas de uso de radiofrequências.

[...]

Art. 14. Somente pode utilizar-se de radiofrequências o interessado que cumpra, além do aqui estabelecido, as disposições do regulamento de canalização e condições específicas de uso de radiofrequências aplicável.

Portanto, tendo em vista a importância impar de se definir uma determinada canalização para operação de serviços de segurança pública, criou-se a Resolução 557/2010 [1].

Apesar da possibilidade de operar em outras faixas de frequência, a Resolução 557/2010 definiu uma faixa para operação, em caráter primário e sem exclusividade, às entidades de segurança pública:

Art. 2º Destinar as subfaixas de radiofrequências de 380,025 MHz a 382,050 MHz e de 390,025 MHz a 392,050 MHz ao Serviço Limitado Móvel Privativo (SLMP), em aplicações de Segurança Pública, em caráter primário e sem exclusividade.

Esta resolução traz em seu anexo o regulamento que define outros aspectos técnicos a serem observados quando da exploração ou execução dos serviços por ela referenciados. Dentre esses aspectos está a necessidade de se implantar sistemas digitais para utilização de sua canalização:

Art. 1º Este Regulamento tem por objetivo estabelecer a canalização e as condições de uso de radiofrequências na faixa de 380 MHz a 400 MHz, por sistemas digitais em aplicações dos serviços fixo e móvel, conforme definido no Regulamento de Radiocomunicações da UIT (1.20 e 1.24, respectivamente).

Além disso, especifica:

- Potência máxima na saída do transmissor da Estação Rádio Base - ERB: 54 dBm/250 W;
- Potência máxima na saída da Estação Terminal Móvel ou Fixa: 44 dBm/25 W

A Potência Efetivamente Radiada (*Effective Radiated Power* – e.r.p) máxima em relação a altura das antenas (referente ao nível médio do terreno):

Tabela 3.2 – Relação Entre a Altura da ERB e a máxima E.r.p permitida

Altura (m)	E.r.p. máxima (W)
0 – 100	800
101 – 200	200
201 – 300	65
301 – 400	35
401 – 500	21
501 – 600	15

Apesar do descrito na Tabela 3.2, deve-se atentar ao fato que as estações de telecomunicações devem seguir o disposto em [21]

Quanto às condições de coordenação e compartilhamento da faixa, o regulamento em questão especifica:

Art. 10. A Agência poderá solicitar à interessada, para o licenciamento de estações rádio base, documentação comprovando coordenação prévia com os demais usuários dos sistemas existentes, operando em caráter primário na mesma subfaixa ou em subfaixas adjacentes, na mesma área geográfica, desde que estejam autorizadas e em situação regular.

Art. 11. Para efeito deste regulamento, entende-se como coordenação prévia a atividade que consiste em acordar valores para parâmetros considerados necessários a garantir a convivência harmônica entre os sistemas

Art. 12. Quando se esgotarem todas as possibilidades de acordo entre as partes envolvidas no processo de coordenação prévia, a Anatel, por solicitação de uma das partes, decidirá as condições de compartilhamento.

Fica claro do exposto acima que a necessidade de se utilizar a mesma faixa de operação, da forma como o regulamento e as possibilidades tecnológicas atuais impõem, demanda uma série de acordos referentes à parametrização dos sistemas para que haja a convivência harmônica entre os mesmos. Em determinadas situações, onde não houver acordo entre as partes, a agência reguladora tem de ser provocada a decidir as condições de compartilhamento. Com o advento da utilização de técnicas de sensoriamento espectral e, conseqüentemente, da utilização do Rádio Cognitivo, uma série de inconvenientes podem ser evitados, uma vez que o mesmo visa possibilitar a utilização do espectro por um usuário secundário, sem que haja interferência prejudicial, de forma automatizada. Assim, evita-se a necessidade de se outorgar a operação de dois usuários primários na mesma faixa de frequência, mas mantendo o uso eficiente do espectro.

3.6 - CONCLUSÃO

Nesse Capítulo buscou-se criar um arcabouço regulatório para o desenvolvimento da Dissertação. Para tanto, buscou-se conceitos de dois dos principais instrumentos legais relativos ao setor de telecomunicações (a LGT [15] e o Regulamento de Uso do Espectro de Radiofrequências [3]) e do regulamento que define a utilização da faixa de frequência objeto de estudo (Resolução n.º 557/2010 [1]). De início, foram definidas as classificações relativas aos serviços de telecomunicações quanto ao regime jurídico e abrangência, e definidos os objetos de outorga, respectivos. Em seguida, informações importantes dos requisitos regulatórios foram expostas. Foram definidos como objetivos principais da radiofrequência sua utilização visando à segurança e à defesa nacional, além de subsidiar o desenvolvimento de pesquisas científicas. Foi evidenciada a competência da Anatel em

definir a utilização de tecnologias que visem o melhor aproveitamento do espectro, a necessidade de compartilhamento, a utilização visando evitar a interferência prejudicial, entraves relativos à amarração dos serviços, entre outros aspectos. Por fim, em relação à faixa de frequência de 380,025 MHz a 382,050 MHz e de 390,025 MHz a 392,050 MHz, foi definida a utilização para Serviço Limitado Móvel Privativo (SLMP), em aplicações de Segurança Pública, em caráter primário e sem exclusividade. Foi exposta a necessidade de se utilizar sistema digital e ainda definidos requisitos técnicos para sua utilização, como altura da antena e e.r.p. máxima. Foram ainda definidas as condições de compartilhamento do espectro de radiofrequência.

4 - ASPÉCTOS TEÓRICOS SOBRE O SENSORIAMENTO ESPECTRAL

4.1 - INTRODUÇÃO

Este Capítulo retrata alguns dos principais conceitos relativos ao Rádio Cognitivo, além de apresentar um comparativo entre diversas técnicas de sensoriamento espectral. A partir da análise dos métodos de sensoriamento, ocorre a escolha de um deles para a etapa de simulações.

Inicialmente, é descrito o ciclo cognitivo e são detalhadas suas etapas, principalmente no que se refere ao processo de sensoriamento do espectro de radiofrequências. Em seguida, são apresentados os principais métodos de sensoriamento espectral, como o Detector de Energia e a Detecção Ciclostacionária, para, então, introduzir alguns mecanismos baseados na Análise Tempo Frequência (ATF). Dentre as ATFs apresentadas nesse estudo estão a Transformada de Fourier de Tempo-Curto (*Short-Time Fourier Transform – STFT*), o Espectrograma e a Transformada de Wigner-Ville.

4.2 - CICLO COGNITIVO

Todo o conceito relacionado ao Rádio Cognitivo está intimamente ligado ao chamado ciclo cognitivo. A partir do encadeamento dos estados do ciclo, é possível a verificação da utilização do espectro, seu gerenciamento e a adaptação do sistema secundário às condições impostas pelo primário. Suas etapas são ilustradas na figura que se segue:

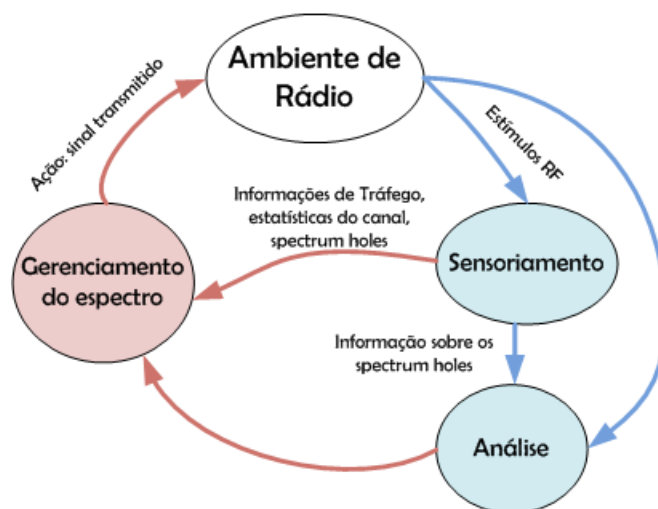


Figura 4.1- Etapas do Ciclo Cognitivo [6].

4.2.1 - Sensoriamento.

Esta é a etapa onde, através de um mecanismo adequado, o sistema do usuário secundário realiza uma verificação da utilização do espectro para subsidiar as demais etapas na tomada de decisão quanto à transmissão de seu sinal em determinada faixa de radiofrequência. É nessa etapa que se incluem os diversos mecanismos de sensoriamento espectral, como a Detecção de Energia, a Detecção Cicloestacionária e as Análises Tempo Frequência. Este estudo tem foco na definição do método de sensoriamento que melhor se adequa ao problema da verificação simultânea de canais e *time slots* vagos em sistemas TDMA/FDMA.

4.2.2 - Análise.

A partir das informações geradas pela etapa de sensoriamento, deve-se realizar a análise da utilização do espectro. O processamento dessas informações será de vital importância na tomada de decisão do sistema secundário. Nessa etapa se utilizam as medidas de decisão e limiares de detecção para a determinação da utilização do espectro por um usuário primário.

4.2.3 - Gerenciamento do Espectro.

Esta é a etapa onde se deve verificar a conveniência da transmissão, por parte do usuário secundário, em determinada oportunidade de utilização do espectro de radiofrequências. Premissas equivocadas utilizadas na etapa de Análise e/ou a escolha errada da metodologia de sensoriamento podem ser cruciais na determinação da oportunidade de transmissão.

4.3 - ALGUNS DOS MÉTODOS DE SENSORIAMENTO ESPECTRAL

Nesse tópico são abordados alguns dos métodos de sensoriamento espectral mais renomados, como o Detector de Energia e a Detecção Cicloestacionária. O objetivo é subsidiar o leitor com algumas das características que envolvem esses métodos para, a partir daí, justificar a escolha do método de sensoriamento utilizado no Capítulo 5.

4.3.1 - Detector de Energia.

A detecção de energia é o método mais comum de sensoriamento do espectro [22]. Esse método parte da verificação das seguintes hipóteses:

- Hipótese H1: hipótese de que existe um usuário primário utilizando a faixa de frequência sensoriada;
- Hipótese H0: Hipótese de que apenas ruído está presente na faixa de frequência sensoriada.

A equação (4.1) descreve as hipóteses:

$$r(t) = \begin{cases} \Re\{[hS_{LP}(t) + n_{LP}(t)]e^{j2\pi f_c t}\}, & H1 \\ \Re\{n_{LP}(t)e^{j2\pi f_c t}\}, & H0' \end{cases} \quad (4.1)$$

onde $\Re\{\cdot\}$ Indica a parte real, $h(t)$ representa o ganho de canal variante no tempo, incluindo o desvanecimento, S_{LP} e n_{LP} são o equivalente ao sinal passa-baixo do usuário primário e o ruído gaussiano branco, respectivamente, e f_c é a frequência central da banda sensoriada.

A partir do sinal recebido, define-se uma medida de decisão para verificar a utilização do canal de radiofrequência para, em seguida, compará-la a um limiar de detecção λ . A medida de decisão utilizada pelo Detector de Energia é :

$$T = \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} (r(t))^2 dt, \quad (4.2)$$

onde T representa o período do sinal $r(t)$. Já para o caso discreto tem-se:

$$M = \sum_{n=0}^{N-1} (r[n])^2, \quad (4.3)$$

em que “ n ” corresponde a determinado instante no tempo e “ N ” o tamanho do vetor de observação do sinal recebido. A medida “ M ”, correspondente à energia do sinal, é então comparada com λ , com o intuito de verificar a utilização da faixa. Na situação onde se considera a transmissão de um sinal no canal sensoriado quando na verdade essa não está ocorrendo (erro na Hipotese H0), diz-se que ocorreu um “Falso Alarme”. Por outro lado, caso os teste de detecção não verifiquem a utilização do canal por um usuário primário

quando esse efetivamente o está utilizando (erro na Hipótese H1), considera-se que houve uma “Não Detecção”. A partir desses conceitos definem-se duas medidas de elevada importância para o estudo em questão: A Probabilidade de Falso Alarme ($P_{fa} = P(H1|H0)$) e Probabilidade de Não Detecção ($P_{ND} = P(H0|H1)$). O balanceamento entre a menor P_{fa} e menor P_{ND} será considerado, para esse trabalho, na determinação do valor ótimo do limiar de detecção λ . Apesar da simplicidade empregada, o Detector de Energia define apenas a utilização da faixa de radiofrequência, não fornecendo informação dos momentos em que essa utilização ocorre. Para obter esse tipo de dado seria necessária a reutilização do algoritmo de forma repetida para todas as faixas a qual se deseja a verificação, o que torna o processo extremamente complexo e passível de erros.

4.3.2 - Detecção Cicloestacionária.

O método de Detecção Cicloestacionária se vale de uma característica de grande parte dos sinais digitais utilizados na atualidade: a periodicidade dos parâmetros estatísticos de segunda ordem desses sinais. Para a determinação da cicloestacionariedade do sinal, alguns aspectos relacionados à sua média ou função autocorrelação devem ser atendidos [23], e esses fatores são verificados para a verificação de utilização de determinado canal.

Define-se como Função de Autocorrelação Cíclica (*Cyclic Autocorrelation Function* – CAF):

$$\hat{R}_x(\tau) = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \int_{-\frac{\Delta \tau}{2}}^{\frac{\Delta \tau}{2}} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f t} dt \quad (4.4)$$

Na equação (4.4), τ representa um deslocamento no tempo, e $x(t)$ é o sinal a ser detectado. Para sinais cicloestacionário, as componentes em frequência que levam a equação (4.4) para valores diferentes de zero são ditas frequências cíclicas “ α ”. A Função de Autocorrelação Cíclica para uma frequência cíclica α possui a seguinte denotação: $\hat{R}_x^\alpha(\tau)$. Sinais diferentes possuem frequências cíclicas distintas [24], dessa forma pode-se verificar a existências de outros sinais no espectro analisado.

O equivalente em frequência da CAF é a sua Transformada de Fourier, conhecida como Densidade de Correlação Espectral (*Spectral Correlation Density* – SCD):

$$\hat{S}_x^\alpha(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{R}_x^\alpha(\tau) e^{-j2\pi \alpha \tau} d\tau \quad (4.5)$$

Como é possível verificar [24], a Detecção Cicloestacionária se utiliza da Autocorrelação Cíclica para a verificação da utilização de determinado canal, entretanto, não permite a localização dos instantes que essa utilização ocorre, não sendo o método mais adequado para o problema proposto.

4.4 - ANÁLISE TEMPO FREQUÊNCIA (ATF)

A Análise Tempo Frequência engloba um conjunto de Distribuições Tempo-Frequência (DTF) para obtenção de uma função cujo domínio é um plano bidimensional [8][10], conforme demonstrado na Figura 4.2 Esta análise permite a visualização do sinal simultaneamente no domínio do tempo e da frequência e, para o contexto do sensoriamento espectral de um sistema TDMA, pode ser especialmente interessante, uma vez que permite o acompanhamento não apenas da utilização do canal, mas também dos instantes de tempo em que isso ocorre. Dentre as principais Distribuições Tempo Frequência existentes estão a Transformada de Fourier de Curto Tempo (*Short-Time Fourier Transform – STFT*) [25], o Espectrograma e a Transformada de Wigner-Ville [8]. A Figura 4.2 exemplifica a ATF:

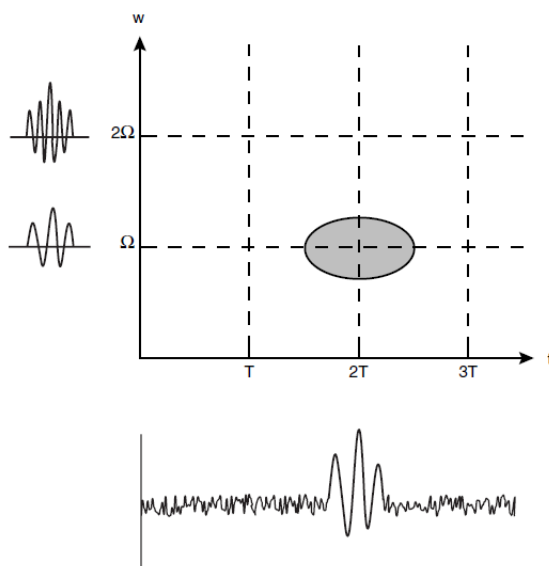


Figura 4.2 - Demonstração do sinal no domínio Tempo-Frequência [8]

4.4.1 - Transformada de Fourier de Tempo Curto (STFT) Discreta.

A Transformada de Fourier (TF) não proporciona uma visualização das variações de determinado sinal no tempo. Dessa forma, a TF é dita não localizada em relação à variável tempo, e o mesmo acontece para a representação do sinal no domínio do tempo

em relação à frequência. A STFT, entretanto, permite uma visualização em ambos os domínios, uma vez que é considerada localizada em t e f [10].

A STFT utiliza uma parcela do sinal (limitada pela janela de observação) para computar seu espectro em determinado instante. Em seguida, a janela de observação é deslocada e o procedimento é repetido, de forma a se obter várias “fatias” de espectro que, ao serem colocadas lado a lado, permitem a visualização do sinal, simultaneamente, no tempo e na frequência. Essa transformada faz parte da família das Transformadas de Fourier em Janela e é definida a partir da seguinte equação (caso discreto):

$$X_{STFT}[m, k] = \sum_{n=0}^{N_x-1} x[n]w[n-m]e^{-j2\pi kn/N_w}, \quad (4.6)$$

em que N_x define a quantidade de amostras no tempo da STFT, n a posição das amostras do sinal $x[.]$ no domínio do tempo, m a posição das amostras da STFT no domínio do tempo, k a posição das amostras da STFT no domínio da frequência, e $w[.]$ a janela de observação. A janela de observação é o fator determinante na qualidade da representação do sinal no domínio tempo-frequência, uma vez que define a resolução tempo frequência⁶. Assim, a diminuição do tamanho da janela permite a melhora da precisão na representação no tempo, mas distorce a distorce na frequência. Por outro lado, uma janela longa no domínio do tempo permite uma melhor visualização das oscilações no domínio da frequência, mas degrada a visualização no tempo. Essa relação segue o “princípio da incerteza de Heisenberg-Gabor” [26].

Conforme definido em [8] a transformada inversa da STFT para o caso discreto é definida como:

$$x[n] = \frac{1}{N_x \|w\|_2^2} \sum_{m=0}^{N_x-1} \sum_{k=0}^{N_x-1} X_{STFT}[m, k]w[n-m]e^{\frac{2\pi jkn}{N_x}}, \quad (4.7)$$

em que $\|w\|_2$ é norma Euclidiana de $w[.]$ no intervalo $[0, N_w - 1]$, ou seja:

$$\|w\|_2 = (w^2[0] + w^2[1] + \dots + w^2[N_x - 1])^{1/2} \quad (4.8)$$

⁶ A resolução tempo frequência é definida em [8] como o produto conjunto dos raios da janela no domínio do tempo e da frequência

4.4.2 - Espectrograma.

Ao se calcular o quadrado da magnitude de uma distribuição STFT obtém-se o chamado Espectrograma da função, ou seja:

$$X_{Espectrograma}[m, k] = \left| \sum_{n=0}^{N_x-1} x[n]w[n-m]e^{-\frac{j2\pi kn}{N_x}} \right|^2 = |X_{STFT}[m, k]|^2, \quad (4.9)$$

Essa é uma importante função, uma vez representa a densidade de energia da STFT. A utilização do Espectrograma para o sensoriamento espectral apresenta a vantagem de fornecer parâmetros de comparação com métodos de sensoriamento mais comuns como o Detector de Energia.

4.4.2.1 - Relação Espectrograma x Detector de Energia.

O seguinte desenvolvimento foi obtido em [8] e será repetido, por conveniência neste trabalho. Sendo $x[n]$ um sinal discreto com período $N_w > 0$, $X_{STFT}[m, k]$ sua STFT, com janela de sensoriamento $w[n]$, temos:

$$\begin{aligned} \sum_{m=0}^{N_x-1} \sum_{k=0}^{N_x-1} |X_{STFT}[m, k]|^2 \\ = \sum_{m=0}^{N_x-1} \sum_{k=0}^{N_x-1} \left[\sum_{p=0}^{N_x-1} x[p]w[p-m]e^{-\frac{2\pi jkp}{N_x}} \right] \left[\sum_{q=0}^{N_x-1} \overline{x[q]}w[q-m]e^{\frac{2\pi jkq}{N_x}} \right], \end{aligned} \quad (4.10)$$

Reajustando os somatórios da parte da direita da equação (4.10), temos:

$$\sum_{m=0}^{N_x-1} \sum_{k=0}^{N_x-1} |X_{STFT}[m, k]|^2 = \sum_{p=0}^{N_x-1} \sum_{q=0}^{N_x-1} x[p]\overline{x[q]} \left[\sum_{m=0}^{N_x-1} w[p-m]w[q-m] \right] \left[\sum_{k=0}^{N_x-1} e^{\frac{2\pi jk(q-p)}{N_x}} \right], \quad (4.11)$$

O termo $\left[\sum_{k=0}^{N_x-1} e^{\frac{2\pi jk(q-p)}{N_x}} \right]$ é igual a N_x , se $p = q$, ou zero, caso contrário. Desta forma, como os termos para $p \neq q$ anulam a equação (4.11), podemos substituir o duplo somatório fazendo $n = p = q$. Portanto:

$$\sum_{m=0}^{N_x-1} \sum_{k=0}^{N_x-1} |X_{STFT}[m, k]|^2 = N_x \sum_{n=0}^{N_x-1} x[n] \overline{x[n]} \left[\sum_{m=0}^{N_x-1} w[n-m] w[n-m] \right], \quad (4.12)$$

Pode-se notar que o somatório $\left[\sum_{m=0}^{N_x-1} w[n-m] w[n-m] \right]$ nada mais é que $\|w\|_2^2$.

Assim, temos:

$$N_x \|w\|_2^2 \sum_{n=0}^{N_x-1} |x[n]|^2 = \sum_{m=0}^{N_x-1} \sum_{k=0}^{N_x-1} |X_{STFT}[m, k]|^2 = \sum_{m=0}^{N_x-1} \sum_{k=0}^{N_x-1} X_{Espectrograma}, \quad (4.13)$$

O termo $\sum_{m=0}^{N_x-1} \sum_{k=0}^{N_x-1} X_{Espectrograma}$ nada mais é que o somatório da energia de cada amostra do da STFT no domínio do tempo e da frequência. Portanto, é aqui utilizado como a medida de decisão do Espectrograma. Assim, a equação (4.13) define uma relação de proporcionalidade entre as medidas de detecção do Detector de Energia e do Espectrograma, o que permite uma comparação entre seus desempenhos. Tal relação será evidenciada na etapa de simulação.

4.4.2.2 - A janela de observação.

Assim como a STFT, o Espectrograma depende do correto ajuste da janela de observação para obter o melhor desempenho na determinação da utilização do canal pelo usuário primário, desta forma, um estudo sobre esse parâmetro mostra-se necessário.

Considerando $w[n]$ uma função janela, seu centro C_w e raio ρ_w são definidos como se segue:

$$C_w = \frac{1}{\|w\|_2^2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} n |w[n]|^2, \quad (4.14)$$

e

$$\rho_w = \left[\frac{1}{\|w\|_2^2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} (n - C_w) |w[n]|^2 \right]^{1/2}, \quad (4.15)$$

Como se pode notar, o raio ρ_w representa o desvio padrão da função janela e é, portanto, uma medida de dispersão dessa função. Assim, quanto mais concentrado é o sinal em torno de C_w , menor será seu raio ρ_w . Sendo $W[v] = \mathcal{F}[x][v]$ a TF de $w[n]$ e ρ_W o raio de $W[v]$, a extrapolação do princípio da incerteza de Heisenberg-Gabor garante que $\rho_w \rho_W \geq 1/2$ [27][28]. Através dessa inequação é possível perceber que a resolução tempo-frequência conjunta das Transformadas de Fourier em janelas possui um limite inferior. A função janela que atinge esse limite, proporcionando uma melhor resolução tempo frequência é a janela gaussiana [8]. Essa possui, portanto, as características ótimas para a aplicação em questão, e é definida, em seu caso discreto, por:

$$w_{gaussiana}[n] = e^{-\frac{1}{2}\left(\alpha \frac{n}{N/2}\right)^2}, \quad \text{com } -\frac{N}{2} \leq n \leq \frac{N}{2}, \quad (4.16)$$

onde α é proporcional ao inverso do desvio padrão (para as simulações do Capítulo 5, é considerado $\alpha = 2.5$) e N representa o tamanho da janela.

A etapa de simulação mostrará o efeito da janela de observação no desempenho do espectrograma.

4.4.3 - Distribuição de Wigner-Ville.

A Distribuição de Wigner-Ville é um método de representação de sinais no domínio tempo-frequência obtida, pela TF do produto do sinal por seu complexo conjugado, conforme se segue:

$$X_{WV}(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x\left(\tau + \frac{t}{2}\right) \overline{x\left(\tau - \frac{t}{2}\right)} e^{-j\omega t} dt, \quad (4.17)$$

onde $x(\cdot)$ corresponde ao sinal no tempo, $\overline{x(\cdot)}$ representa o complexo conjugado de $x(\cdot)$ e $X_{WV}(\tau, \omega)$ sua Distribuição de Wigner-Ville. Como é possível notar, essa distribuição apresenta a grande vantagem de não depender de uma função janela e, portanto, se desviar dos inconvenientes gerados por essa dependência.

Dentre as principais características da Distribuição de Wigner-Ville, definidas em [9] estão:

- Propriedade das Marginais: A partir da Distribuição de Wigner-Ville pode-se obter a Densidade Espectral de Energia e a Potência instantânea do sinal $x(t)$. Para isso,

basta integrar a função X_{WV} em relação ao tempo ou frequência, respectivamente, conforme mostra equação (4.18):

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} X_{WV}(\tau, \omega) d\tau &= |X(\omega)|^2, \\ \int_{-\infty}^{\infty} X_{WV}(\tau, \omega) d\omega &= 2\pi|x(t)|^2, \end{aligned} \quad (4.18)$$

onde $X(\omega)$ corresponde à TF do sinal $x(t)$.

- Valores Reais: A Distribuição de Wigner Ville, para o caso contínuo, é dada pela equação (4.17). Fazendo a mudança de variável de integração para $s = -t$, temos:

$$\begin{aligned} X_{WV}(\tau, \omega) &= - \int_{\infty}^{-\infty} x\left(\tau - \frac{s}{2}\right) \overline{x\left(\tau + \frac{s}{2}\right)} e^{j\omega s} ds \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} x\left(\tau - \frac{t}{2}\right) \overline{x\left(\tau + \frac{t}{2}\right)} e^{-j\omega t} dt = \overline{X_{WV}(\tau, \omega)}. \end{aligned} \quad (4.19)$$

Como a Distribuição de Wigner-Ville do sinal $x(t)$ e seu complexo conjugado são iguais, conclui-se que a distribuição é um valor real.

4.4.3.1 - Interferência dos Termos Cruzados.

Uma das principais dificuldades encontradas na utilização da Distribuição de Wigner-Ville se encontra na interferência gerada pelos termos cruzados. Como será demonstrado a seguir, caso se deseje aplicar a Distribuição de Wigner-Ville sobre um sinal que é, na verdade, a soma de dois outros sinais, ocorre o aparecimento de Termos Cruzados que deturpam a visualização no domínio Tempo-Frequência desse sinal. Para mostrar a influência desses elementos, considera-se o que segue:

Sendo $s(t)$ a soma dos sinais analógicos $x_1(t)$ e $x_2(t)$:

$$s(t) = x_1(t) + x_2(t), \quad (4.20)$$

a Distribuição de Wigner-Ville de $s(t)$ é igual a:

$$S_{WV} = \int_{-\infty}^{\infty} \left[x_1 \left(\tau + \frac{t}{2} \right) + x_2 \left(\tau + \frac{t}{2} \right) \right] \overline{\left[x_1 \left(\tau - \frac{t}{2} \right) + x_2 \left(\tau - \frac{t}{2} \right) \right]} e^{-j\omega t} dt, \quad (4.21)$$

desenvolvendo (4.21) temos:

$$\begin{aligned} S_{WV} = & \int_{-\infty}^{\infty} x_1 \left(\tau + \frac{t}{2} \right) \overline{x_1 \left(\tau - \frac{t}{2} \right)} e^{-j\omega t} dt + \\ & \int_{-\infty}^{\infty} x_2 \left(\tau + \frac{t}{2} \right) \overline{x_2 \left(\tau - \frac{t}{2} \right)} e^{-j\omega t} dt + \\ & \int_{-\infty}^{\infty} x_1 \left(\tau + \frac{t}{2} \right) \overline{x_2 \left(\tau - \frac{t}{2} \right)} e^{-j\omega t} dt + \\ & \int_{-\infty}^{\infty} x_2 \left(\tau + \frac{t}{2} \right) \overline{x_1 \left(\tau - \frac{t}{2} \right)} e^{-j\omega t} dt \end{aligned}, \quad (4.22)$$

o que equivale a:

$$S_{WV} = X_{WV1} + X_{WV2} + X_{WV12} + X_{WV21}. \quad (4.23)$$

Como definido em [9], a soma dos dois últimos elementos da equação (4.23) é igual a duas vezes a parte real da transformada de uma delas, portanto:

$$S_{WV} = X_{WV1} + X_{WV2} + 2\Re\{X_{WV12}\}. \quad (4.24)$$

O termo $2\Re\{X_{WV12}\}$ da equação (4.24) insere uma distorção crítica à Distribuição de Wigner-Ville levando essa transformada a falhar no critério da superposição. Esse fator dificulta a utilização dessa distribuição para verificar a utilização de vários canais, simultaneamente, por usuários primários, já que, nesse caso, o sinal transmitido é justamente a soma do sinal modulado de cada um dos usuários.

4.5 - CONCLUSÃO

Como se viu até aqui, o Detector de Energia e o Detector Cicloestacionário, não permitem a verificação de utilização do canal no tempo e na frequência simultaneamente, portanto, não são os focos das simulações do Capítulo 5. Uma ferramenta para a verificação desejada é a Análise Tempo-Frequência (ATF). Para definir qual mecanismo de sensoriamento, dentre as ATFs disponíveis, decidiu-se pela verificação de três delas: a

Transformada de Fourier de Tempo-Curto (STFT), o Espectrograma e a Distribuição de Wigner-Ville. A STFT e o Espectrograma possuem uma grande proximidade, uma vez que o Espectrograma é a medida da energia da STFT. Dessa forma, o Espectrograma possui a vantagem de apresentar apenas valores positivos. Um das principais dificuldades para a utilização desses métodos é a dependência da janela de observação. Entretanto, como o sistema a qual se deseja sensoriar é conhecido, pode-se determinar empiricamente a melhor resolução de janela de observação. Como visto, a janela que com melhor resolução tempo-frequência é a janela gaussiana, uma vez que esta janela atinge o limite inferior de resolução definido pelo “princípio da incerteza de Heisenberg-Gabor”. A Distribuição de Wigner-Ville apresenta como critério positivo o fato de independe da janela de transmissão, apresentar valores reais e de, diferentemente do Espectrograma, sempre respeitar as marginais (conforme exposto no subitem 4.4.3), entretanto, esse método não respeita o critério da superposição de sinais, apresentando uma falha grave para sinais com múltiplas componentes: a presença de termos cruzados. Por todo o exposto, decidiu-se, no Capítulo 5, pela análise por simulação do Espectrograma.

5 - VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO DA DISTRIBUIÇÃO TEMPO FREQUÊNCIA (DTF) ESPECTROGRAMA POR SIMULAÇÕES

5.1 - INTRODUÇÃO

O sensoriamento de espectro é basicamente um teste de hipóteses no qual temos de escolher entre duas possibilidades: a hipótese H_0 considera que apenas o ruído está presente no canal e a hipótese H_1 considera a situação em que também existe um sinal sendo transmitido por um usuário primário.

Em ambas as hipóteses, considerando-se um canal com desvanecimento não seletivo em frequência, o sinal passa-banda recebido pode ser representado como o seguinte [29]:

$$r(t) = \begin{cases} \Re\{[h(t)S_{LP}(t) + n_{LP}(t)]e^{j2\pi f_c t}\}, & H_1 \\ \Re\{n_{LP}(t)e^{j2\pi f_c t}\}, & H_0' \end{cases} \quad (5.1)$$

Onde $\Re\{\cdot\}$ denota a operação da parte real, $h(t)$ representa o ganho de canal variante no tempo, incluindo o desvanecimento, S_{LP} e n_{LP} são o equivalente ao sinal passa-baixo do usuário primário e o ruído gaussiano branco, respectivamente, e f_c é a frequência central da banda ocupada.

Podemos particularizar (5.1) para uma situação em que duas ou mais portadoras moduladas devem ser investigadas, como no caso de sistemas FDMA, em que o sinal transmitido consiste na soma das vários sinais com portadoras individuais. No caso da hipótese H_1 , o sinal recebido é:

$$r(t) = \Re \left\{ \left[\left(\sum_{l=1}^{N_c} S_{LP,l}(t) e^{j2\pi l \Delta f t} \right) h(t) + n_{LP}(t) \right] e^{j2\pi f_c t} \right\}, \quad (5.2)$$

em que l indica o índice de portadora, S_{LP} representa o sinal transmitido na l -ésima portadora, Δf é o espaçamento entre portadoras, e N_c é o número total de portadoras disponíveis no sistema.

Dois critérios para a verificação do desempenho do sensoriamento espectral são a probabilidade de falso alarme (P_{FA}) e a probabilidade de não detecção (P_{ND}). A probabilidade de falso alarme representa a chance de o mecanismo de sensoriamento do

espectro do usuário secundário detectar, de maneira equivocada, uma portadora de usuário primário em um canal desocupado. Já a probabilidade de não detecção verifica a probabilidade de o receptor falhar na detecção de um usuário primário.

Considerando-se uma única portadora, a fim de calcular a probabilidade de falso alarme (P_{FA}) e a probabilidade de não detecção (P_{ND}) para um *time slot*, observa-se o sinal recebido durante o intervalo de um *time slot* do sinal, isto é, observa-se:

$$r_T(t) = \begin{cases} r(t) & , t = 0 < t \leq T \\ 0 & , \text{ caso contrário} \end{cases} \quad (5.3)$$

em que T é o período do *time slot*. Assim obtém-se uma medida de detecção $M = f(r_T(t))$, com $f(\cdot)$ sendo uma função dependente da técnica de detecção. A medida de detecção é então comparada com um limiar λ , e as probabilidades de falso alarme e não detecção são, portanto, definidas por:

$$\begin{aligned} P_{ND} &= P(M < \lambda | H_1) \\ P_{FA} &= P(M > \lambda | H_0) \end{aligned} \quad (5.4)$$

5.2 - DETECTOR DE ENERGIA E A ANÁLISE TEMPO-FREQUÊNCIA CONHECIDA COMO ESPECTROGRAMA

5.2.1 - Detector de Energia.

A abordagem de detecção de energia é talvez o método de sensoriamento espectral não paramétrico⁷ mais comum, por ser simples e possuir baixa complexidade computacional [22][29][30]. A medida de decisão para este detector pode ser escrita como:

$$M = \sum_{n=0}^{N-1} |r[n]|^2, \quad (5.5)$$

Em que N é o número de amostras, no domínio do tempo, do vector de observação, e $r[n] = r(nT_a)$ é a representação discreta do sinal recebido $r(t)$, com intervalo de amostragem T_a .

⁷ Métodos paramétricos são aqueles que exigem a modelagem do processo estocástico de interesse, em contrapartida, processos não paramétricos evitam a necessidade da modelagem desses processos [31].

Em um ambiente em que apenas um ruído branco aditivo gaussiano (AWGN) está presente no canal, P_{FA} pode ser determinada como [29]:

$$P_{FA} = \frac{\Gamma\left(N/2, \frac{\lambda}{2\sigma^2}\right)}{\Gamma(N/2)}, \quad (5.6)$$

em que $\Gamma(\cdot)$ e $\Gamma(\cdot, \cdot)$ representam a função gama e a função gama incompleta, respectivamente, e σ^2 é a variância do ruído. Em [29] uma aproximação de P_{ND} é também obtida:

$$P_{MD} = 1 - Q_{N/2}\left(\sqrt{\frac{2SNR}{\sigma^2}}, \sqrt{\frac{\lambda}{\sigma^2}}\right). \quad (5.7)$$

Onde $Q_{N/2}(\cdot, \cdot)$ é a função Marcum-Q generalizada. Observe que, com a detecção de energia, podemos perceber a presença de um sinal, mas não somos capazes de identificar qual dos diferentes canais FDMA estão sendo usados dentro do sinal analisado.

5.2.2 - Espectrograma.

Como foi mencionado no Capítulo 4, a Distribuição de Wigner-Ville não possui bom desempenho para sinais multicomponente devido aos termos cruzados gerados por esta distribuição. Dessa forma, essa abordagem é desaconselhável para esse tipo de sinal. Como o foco deste trabalho é a verificação de um sinal multicomponente, em que diferentes faixas de frequência e *time slots* podem ser ocupadas por diferentes usuários, vamos nos concentrar na ATF conhecida como Espectrograma.

Relembrando os conceitos expostos no Capítulo 4, o Espectrograma é uma Transformada de Fourier em Janela, em outras palavras, ele utiliza uma janela $w[n]$ para obter um espectro localizado do sinal [10]. A equação (5.8) o descreve (já com a notação utilizada nesse capítulo para retratar o sinal $r[\cdot]$ no receptor):

$$S[m, k] = \left| \sum_{n=0}^{N_w-1} r[n]w[n-m]e^{-\frac{j2\pi kn}{N_w}} \right|^2, \quad (5.8)$$

em que N_w é o comprimento da janela $w[n]$. A equação (5.8) descreve a representação tempo-frequência do sinal como o quadrado da magnitude da soma de Transformadas de Fourier Instantâneas deste sinal, com m representando o domínio do tempo e k o domínio da frequência. Repare que o termo $\sum_{m=0}^{N_w-1} r[n]w[n-m]e^{-\frac{j2\pi kn}{N_w}}$ é a representação matemática da STFT, e que, portanto, o espectrograma é a magnitude quadrada da STFT. Como apresentado anteriormente, foi escolhido como medida de decisão para o Espectrograma o somatório da energia de cada amostra da STFT no tempo e na frequência, portanto, a medida de decisão M do Espectrograma é:

$$M = \sum_{n=1}^{N_{STD}} \sum_{k=1}^{N_{SFD}} S[n, k], \quad (5.9)$$

onde N_{STD} e N_{SFD} são, respectivamente, o número de amostras do *time slot* no domínio do tempo e a largura do canal no domínio da frequência. Para a detecção de um *time slot* específico, é necessário adicionar-se todas as amostras de tempo e frequência correspondentes na saída da Análise de Tempo-Frequência. Em outras palavras, a medida é a energia contida em um *time slot* de um canal de frequência, e a ATF é, portanto, semelhante à detecção de energia, mas aplicadas a um canal TDMA/FDMA.

Uma limitação do espectrograma é a dependência entre a janela de observação e a resolução do tempo ou da frequência. Uma janela de tempo longo, em comparação com o intervalo de símbolo do sinal modulado, retorna uma baixa resolução na frequência. Por outro lado, a fim de maximizar a resolução na frequência, uma janela de tempo curto é necessária, o que resulta em pouca informação sobre o sinal no domínio do tempo. Esta relação de compromisso entre as resoluções no tempo e na frequência segue a extrapolação do já referenciado "princípio da incerteza de Heisenberg-Gabor".

5.2.3 - Comparação entre o Detector de Energia e o Espectrograma.

Para estimar o desempenho da análise por Espectrograma, foram realizadas simulações nas quais uma ocupação arbitrária de canal de um sistema TETRA foi gerada, usando uma modulação $\pi/4$ -DQPSK e dois canais de frequências adjacentes⁸, com quatro *time slots* cada. Na frequência do canal 1, os *time slots* 1 e 3 estão ocupados, e na frequência do canal 2, só o *time slot* 4 é ocupado.

⁸ As simulações consideraram apenas dois canais de frequência adjacentes a fim de simplificar a análise, mas a abordagem pode ser facilmente extrapolada para um número maior de canais de frequência, com o custo de maior complexidade.

Um canal AWGN foi inicialmente simulado e o sinal recebido foi submetido ao algoritmo de espectrograma, a fim de obter a sua Distribuição Tempo Freqüência e ilustrar a sua aplicação. Foi selecionada aqui uma janela gaussiana com $N_W = \frac{4N_{STD}}{25}$, pois as simulações demonstram que uma resolução de tempo-freqüência aceitável pode ser obtida com este comprimento, para o caso em questão, como será demonstrado posteriormente. A fim de ilustrar o sinal simulado com uma boa resolução.

A Figura 5.1 mostra a Distribuição Tempo Freqüência com 30 símbolos modulados ($N_{\text{symp}} = 30$) e 10 dB de Razão Sinal Ruído (RSR). Cada *time slot* possui 250 amostras no domínio do tempo e cada canal 125 amostras. Assim, no domínio do tempo temos: amostras de 1 a 250 representam o *time slot* 1; amostras de 251 a 500 representam o *time slot* 2; amostras de 501 a 750 representam o *time slot* 3; e amostras de 751 a 1000 representam o *time slot* 4. Já no domínio da freqüência: amostras de 1 a 125 representam o canal 1 e amostras de 126 a 500 representam o canal 2. É importante notar que o Espectrograma representa um pseudo espectro, portanto não apresenta a magnitude real.

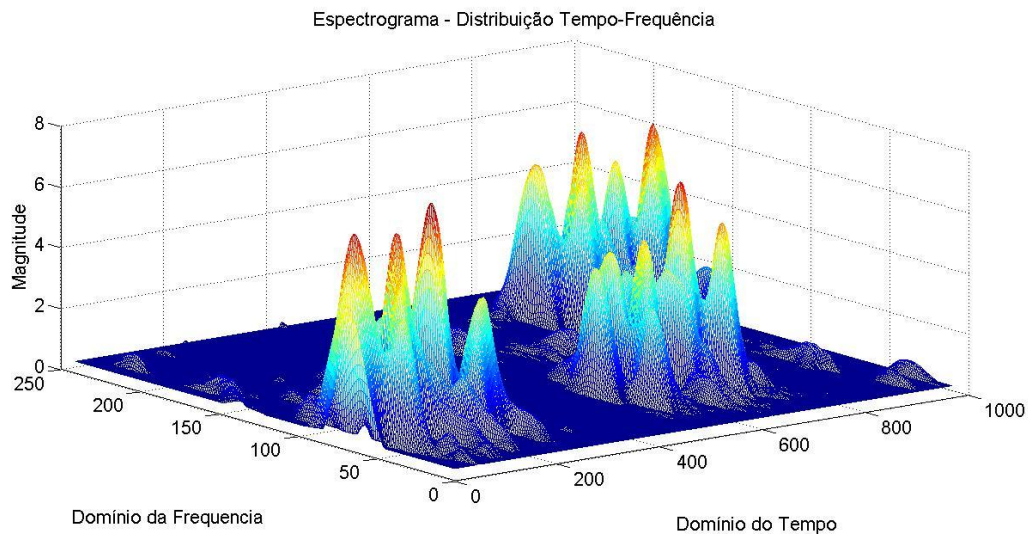


Figura 5.1 – Distribuição Tempo Freqüência do sinal simulado com 10 dB de RSR e $N_{\text{symp}} = 30$.

A Figura 5.2 ilustra o mesmo sinal, mas agora num ambiente altamente ruidoso, com uma RSR de -3 dB. Como mencionado na introdução, esta é, sem dúvida, a situação de maior interesse, a medida que devemos ser capazes de detectar a utilização do canal por usuários primários mesmo que esses estejam distantes do sensor. Nesta situação, os canais ocupados já não são facilmente identificáveis por uma inspeção visual, mas, como veremos a seguir, podem ser identificados com a medida de detecção descrita em (5.9).

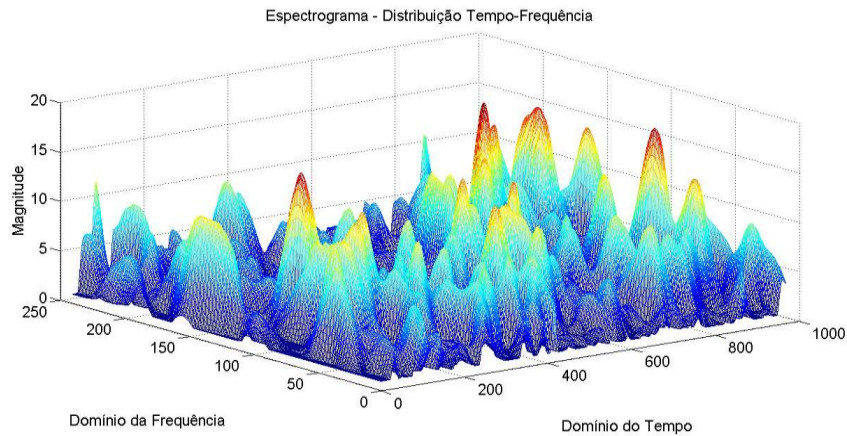


Figura 5.2 - DTF do sinal simulado com -3dB de RSR e $N_{\text{symb}} = 30$.

A partir de (5.8) pode-se notar que o espectrograma calcula a componente de energia em cada elemento de tempo e frequência da STFT discreta. Somando a energia de todos os elementos de frequência para cada elemento temporal, devemos obter a energia para cada *time slot*. Portanto, deve-se esperar que o desempenho simulado do espectrograma seja próximo ao da análise teórica de detecção de energia com o mesmo tamanho de vetor de observação. Como um exemplo, a curva simulada para o Espectrograma com $N_{\text{symb}} = 5$ deve ser próxima à curva teórica do Detector de Energia com $N = 5$.

Para validar os resultados obtidos pelas simulações do Espectrograma, esses foram comparados com as curvas teóricas do detector de energia. Inicialmente, seis curvas $P_{\text{FA}} \times P_{\text{ND}}$ foram geradas para o Detector de Energia, utilizando (5.6) e (5.7), e variando o nível de limiar de detecção λ . Cada curva representa um vetor de observação de comprimento diferente ($N = 5, 10, 15, 20, 25$ e 30). Em seguida, valendo-se das características do sinal descritas no tópico 5.2.2 - , simulações foram executadas de modo a contemplar sinais com N_{symb} (número de símbolos modulados) igual a 5, 10, 15, 20, 25 e 30.

Os resultados da simulação referem-se ao primeiro *time slot* (utilizado para o cálculo da P_{ND}) e ao segundo *time slot* (utilizado para o cálculo da P_{FA}) do canal 1. Quinhentas medições foram realizadas para cada nível de limiar.

A Figura 5.3 mostra a comparação entre as curvas teóricas $P_{\text{FA}} \times P_{\text{ND}}$ do Detector de Energia e os resultados simulados utilizando o Espectrograma:

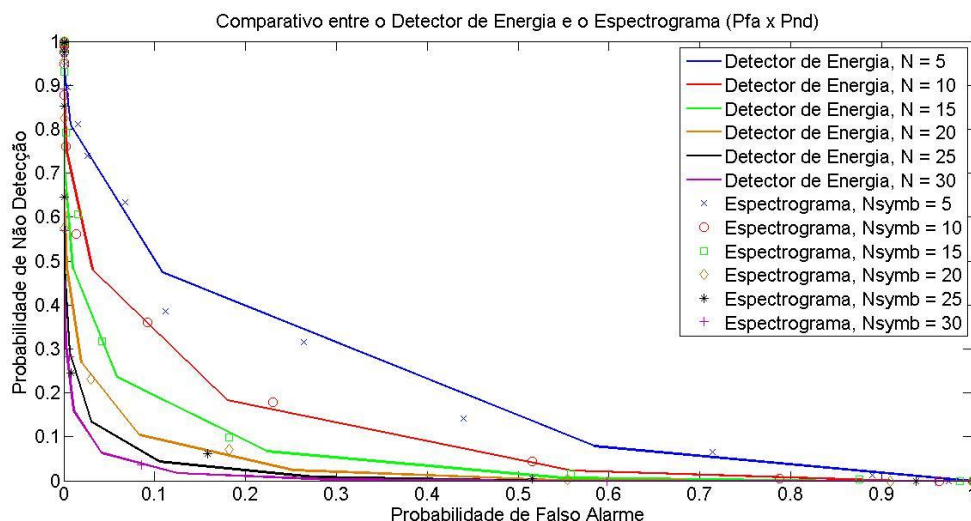


Figura 5.3 - Comparação entre as curvas teóricas $P_{FA} \times P_{ND}$ do Sensoriamento Espectral por Detector de Energia e os pontos simulados do Espectrograma (RSR = -3dB).

É evidente, a partir da Figura 5.3, que, como esperado, existe uma relação estreita entre a P_{FA} e a P_{ND} do Espectrograma em relação ao Detector de Energia. No entanto, o espectrograma, como mencionado anteriormente, produz uma distribuição mutuamente localizada no domínio do tempo e da frequência, de modo que é possível a determinação dos *time slots* utilizados em cada canal, o que não é possível na detecção de energia (realizada exclusivamente no domínio do tempo). As curvas do Detector de Energia ficariam mais suaves com um número maior de pontos simulados. Para os pontos do Espectrograma, seriam mais próximas às curvas do Detector de Energia caso fossem realizadas mais repetições na simulação.

5.3 - DEMAIS RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Nesta seção, simulou-se o desempenho do espectrograma para diferentes níveis de RSR, limites de detecção, janelas de observação, número de amostras de informação e ambientes de desvanecimento.

5.3.1 - Curvas de $P_{FA} \times P_{ND}$ para diferentes RSRs.

Para verificar os efeitos da RSR nas curvas de $P_{FA} \times P_{ND}$, simulou-se a P_{FA} e a P_{ND} (variando o limiar de detecção) para valores de RSR entre -10dB e 0dB. Estas simulações foram realizadas com um sinal com as mesmas características da simulação do tópico 5.2.3 - , mas com um número fixo de símbolos modulados ($N_{\text{symb}} = 30$). A Figura 5.4 mostra os

resultados e, como esperado, as curvas de $P_{FA} \times P_{ND}$ apresentam melhores desempenhos para o Espectrograma com o aumento da RSR. É usual definir a probabilidade de falso alarme desejada a uma taxa específica, geralmente de 10%. Dessa forma, podemos notar que, para essa probabilidade de falsos alarmes, o Espectrograma nos permite identificar os canais utilizados com uma probabilidade não detectada abaixo de 10% para uma RSR de -4dB.

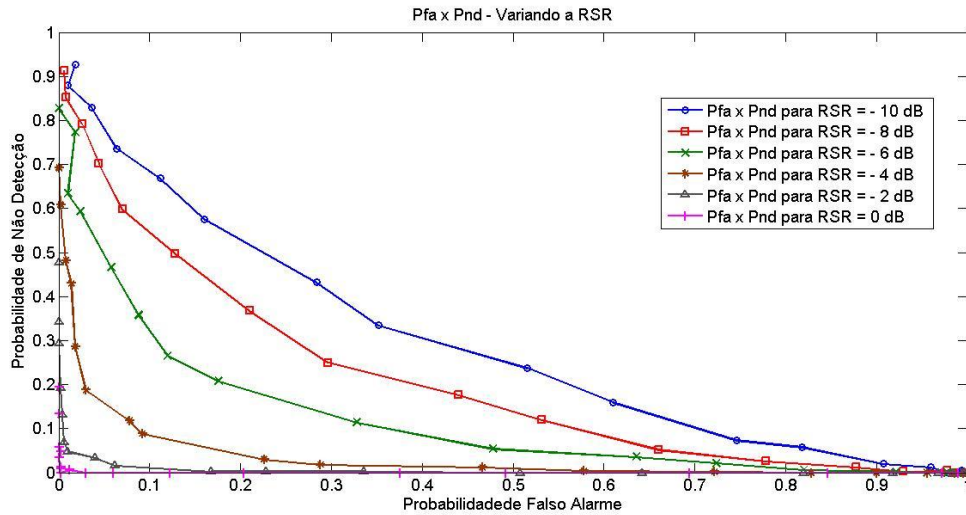


Figura 5.4 - Curvas de $P_{FA} \times P_{ND}$ para diferentes cenários de RSR (variando de -10 dB e 0 dB), $N_{\text{symb}} = 30$.

5.3.2 - Curvas de $P_{FA} \times P_{ND}$ para diferentes Comprimentos de Janelas de Observação.

Os resultados de simulação deste tópico mostram os efeitos do Comprimento da Janela de Observação no desempenho do algoritmo de detecção Espectrograma. Escolhendo os mesmos parâmetros das simulações anteriores, com RSR igual a 10 dB, as Figuras

Figura 5.5,

Figura 5.6 e

Figura 5.7 foram obtidas como se segue:

- Figura 5.5: $N_w =$ Número de amostras de sinal (1000 amostras)
- Figura 5.6: $N_w =$ (Número de amostras do sinal) / 25
- Figura 5.7: $N_w = 4$ amostras

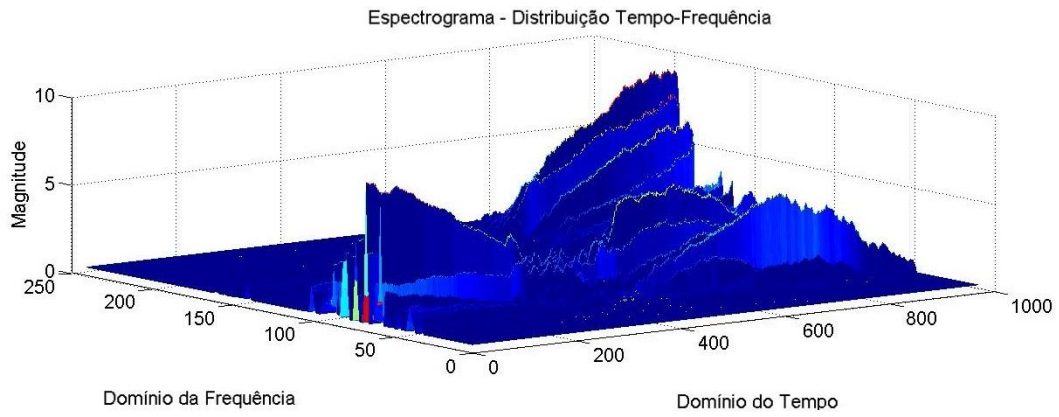


Figura 5.5 - Distribuição Espectrograma com uma N_w igual ao número de amostras de sinal, RSR = 10dB e Nsymb = 30.

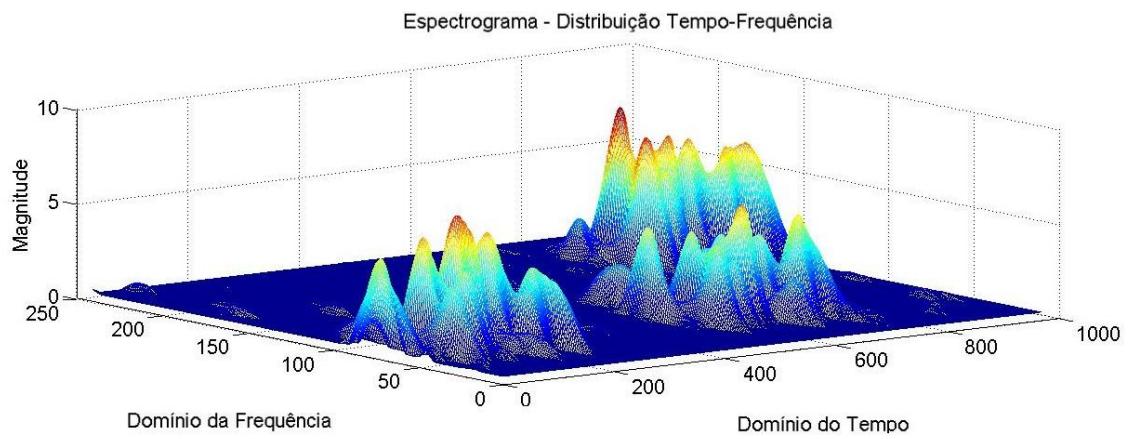


Figura 5.6 - Distribuição Espectrograma usando um N_w é igual ao $\frac{N^\circ \text{ de amostras}}{25}$, RSR = 10dB e Nsymb = 30.

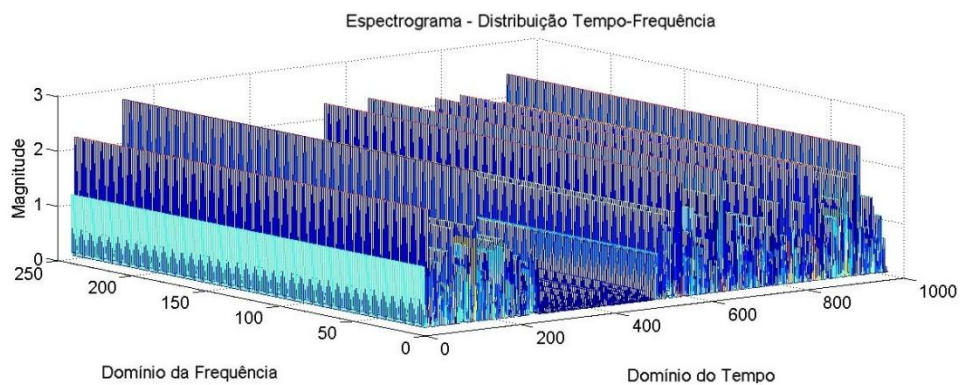


Figura 5.7 - Distribuição Espectrograma usando um N_w é igual 4 amostras, RSR = 10dB e Nsymb = 30.

A partir das Figuras 5.5, 5.6 e 5.7, podemos notar que para valores elevados de N_w a distribuição tem uma baixa resolução em frequência e o sinal se espalha no tempo. O inverso ocorre quando o N_w é demasiado pequeno, o sinal se espalha no domínio da frequência e tem baixa resolução no domínio do tempo. Uma janela intermediária é necessária para obter uma boa resolução tempo-frequência, como na Figura 5.6. Isso ilustra o "princípio da incerteza".

A Figura 5.8 mostra a distorção causada por uma escolha errada do N_w , onde podemos verificar que o desempenho da detecção se degrada substancialmente se um valor de comprimento de janela de observação inadequado é utilizado, o que ocorre devido ao espelhamento das amostras no domínio com menor precisão.

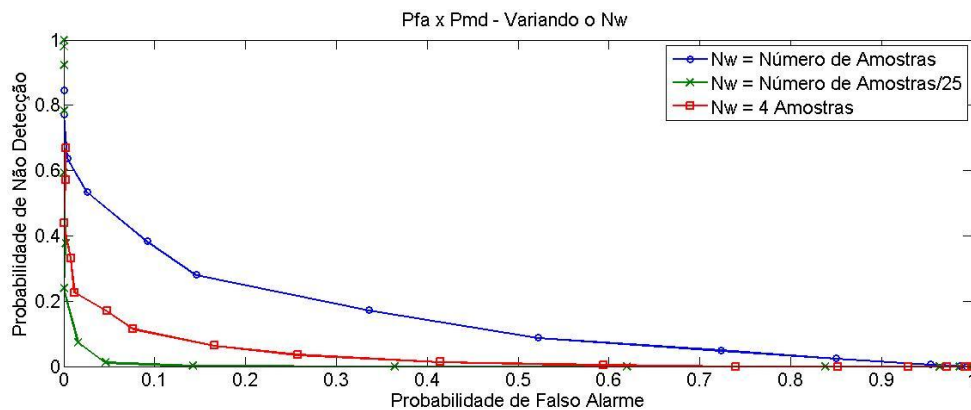


Figura 5.8 - Curvas de $P_{FA} \times P_{ND}$ para diferentes N_w , RSR = -3 dB e Nsymb = 30.

5.3.3 - Desempenho do método de detecção espectral, na presença de desvanecimentos de multipercurso do tipo Rice e Rayleigh.

Até agora, todas as simulações realizadas levaram em consideração que o sinal estava sobre a influência apenas de um canal AWGN e variante no tempo. Entretanto, é de interesse verificar o desempenho do Espectrograma em canais com desvanecimento seletivo em frequência, uma vez que, para esse tipo de canal, determinadas frequências podem sofrer alta degradação em alguns instantes. Para obter o desempenho do espectrograma de um sinal na situação supracitada, foram realizadas simulações com canais do tipo Rice e Rayleigh. Como o desvanecimento seletivo do sinal varia com o tempo, é de se esperar que esse não ocorra em todos os Quadros TDMA de determinado canal durante um intervalo de tempo específico. Buscando aproveitar essa característica, foram realizadas simulações sensoriando um, dois e três Quadros TDMA consecutivos, com o intuito de verificar uma melhora no desempenho do Espectrograma com o aumento

de quadros sensoriados. A medida de decisão para esse caso é igual à média das medidas de decisão de cada um dos Quadros TDMA sensoriados.

Os seguintes modelos foram produzidos, considerando as mesmas características do sinal do tópico 5.3.1 - :

5.3.3.1 - Modelo Rice

Foi gerado um canal com desvanecimento seletivo em frequência com um desvio Doppler máximo de 63,15 Hz (correspondente a um móvel se deslocando a 80 km/h). O modelo gerado possui, ainda, uma componente com linha de visada entre transmissor e receptor (componente *Line of Sight* – LOS) correspondente ao processo de desvanecimento de Rice e outras quatro componentes sem linha de visada (componentes *Non Line of Sight* – NLOS), correspondendo a processos de desvanecimento Rayleigh independentes. A potência da componente LOS foi ajustada para 1 dB acima das componentes NLOS. Os atrasos de caminho foram gerados por um algoritmo pseudoaleatório de forma a se manterem entre 10 e 50 microssegundos.

5.3.3.2 - Modelo Rayleigh

Esse modelo foi gerado, basicamente, com os mesmos parâmetros do modelo do tópico 5.3.3.1 - . A diferença se encontra no fato de que nesse canal não existe a componente com linha de visada do processo de tipo Rice. São modelados, unicamente, caminhos gerados a partir de processos independentes de desvanecimento do tipo Rayleigh.

5.3.3.3 - Resultados Simulados

As Figuras 5.9 e 5.10 mostram o comportamento do método de sensoriamento espectral Espectrograma em cenários de desvanecimento Rice e Rayleigh, respectivamente. Uma RSR de -3 dB foi considerada, com $N_{\text{symb}} = 30$, $N_w = \frac{\text{Nº de amostras do sinal}}{25}$, modulação $\pi/4$ -DQPSK e 100 repetições.

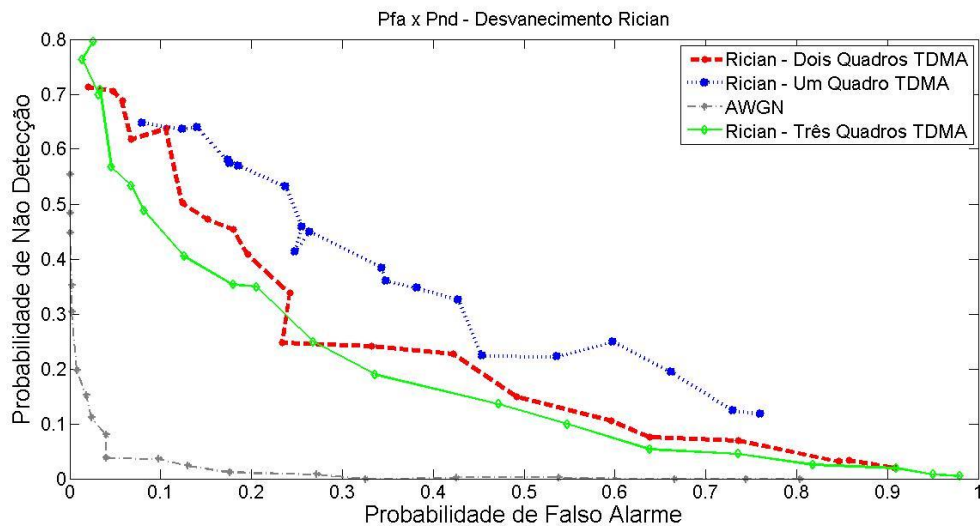


Figura 5.9 - Curvas de P_{FA} x P_{ND} para canal Rice e detecção de um, dois e três quadros TDMA continuamente e uma comparação com o desempenho do sensoriamento em um cenário AWGN.

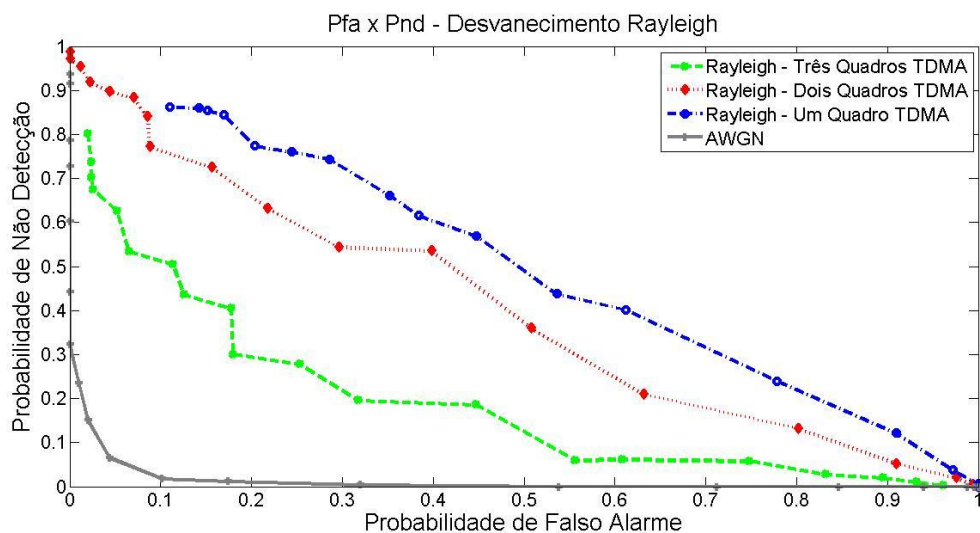


Figura 5.10 - Curvas de P_{FA} x P_{ND} para canal Rayleigh e detecção de um, dois e três quadros TDMA continuamente e uma comparação com o desempenho do sensoriamento em um cenário AWGN.

Caso fosse aplicado um número maior de repetições para a obtenção das probabilidades, as curvas das Figuras 5.9 e 5.10, apresentariam maior suavidade, entretanto, não houve tempo hábil para tal simulação.

É evidente, a partir dos resultados das simulações, que o desempenho da técnica de sensoriamento espectral decai na presença de cenários de desvanecimento, como esperado. Entretanto, com o sensoriamento de mais Quadros TDMA continuamente, melhores resultados podem ser obtidos. Também é importante notar que, considerando a mesma P_{FA} ,

a P_{ND} é maior para o modelo Rayleigh, em comparação à do modelo Rice. Isso se deve ao fato de que, para o modelo Rayleigh, não existe uma componente com linha de visada.

5.3.4 - Sincronização para detecção do Quadro TDMA utilizando o Espectrograma.

Uma das principais dificuldades relacionadas à utilização do Espectrograma para o sensoriamento espectral em sistemas TDMA se encontra na necessidade de saber, com certo grau de precisão, quando se inicia a transmissão de um Quadro TDMA. Isso se deve, principalmente, pelo fato de estarmos trabalhando sobre um cenário extremamente ruidoso e sem acesso ao canal de controle ou qualquer outra informação que nos permita a sincronização necessária. Em situações onde se deseja verificar apenas a utilização do canal, mas não é necessária informação relativa aos instantes do tempo em que essa utilização ocorre, o citado sincronismo não é uma variável crítica. Entretanto, para o caso em estudo, essa informação é vital para uma detecção confiável da utilização dos *time slots* dos canais por usuário primários. Como aspecto positivo, deve-se salientar que o sistema em questão é conhecido e, portanto, possuímos informações relevantes como período correspondente a um *time slot* e a um Quadro TDMA, além do período de guarda existente entre *time slots* consecutivos.

Em um esforço para superar o problema mencionado, considerou-se a situação de transmissão de dois usuários primários em *time slots* consecutivos. Inicialmente o sinal foi submetido a um canal AWGN com RSR de -10 dB. Conforme verificado no Capítulo 2, o período de guarda da transmissão do enlace de subida de um sistema TETRA corresponde a 24 símbolos modulados e, para uma modulação de fase, um *time slot* corresponde a 255 símbolos modulados. Dessa forma, conclui-se que o período de guarda equivale a aproximadamente 9% do período total do *time slot*. Assim, as seguintes etapas foram aplicadas à Análise Tempo-Frequência obtida pelo Espectrograma:

1. Realizar o sensoriamento do espectro por um período T_{sens} equivalente ao de um Quadro TDMA, ou seja, aproximadamente 56.67ms;
2. A partir do início do sensoriamento, ajustar uma janela com período T_{ts} equivalente ao de um *time slot* (14.167 ms), calcular a medida de decisão “ M ” para esse período e comparar com aquela definida anteriormente como limiar de detecção λ (para o caso onde se há o sincronismo);
3. Deslocar a janela de um período inferior ao período de guarda;

4. Repetir o procedimento até o final do tempo sensoriado (o número total de deslocamentos deve respeitar o tamanho máximo de T_{sens} , de modo a não permitir que a janela ultrapasse esse limite);
5. Verificar as posições onde a medida de decisão calculada foi igual ou superior ao limiar de detecção do caso síncrono e separar aquela com o maior “ M ”, além do próprio valor de “ M ”;
6. Repetir os passos anteriores por determinado número de vezes, consecutivamente;
7. Obter, dentre as posições guardadas pelos passos 5 e 6, qual foi a moda (caso ocorra) e qual apresentou maior medida de decisão. Para aumentar a probabilidade de se obter uma moda, o número de repetições do passo 6 deve ser ímpar;
8. Definir a posição do passo 7 como o início do Quadro TDMA de acordo com o que segue:
 - Maior prioridade: Posição referente à moda;
 - Menor prioridade: Posição referente à maior medida.

A Figura 5.11 ilustra o procedimento:

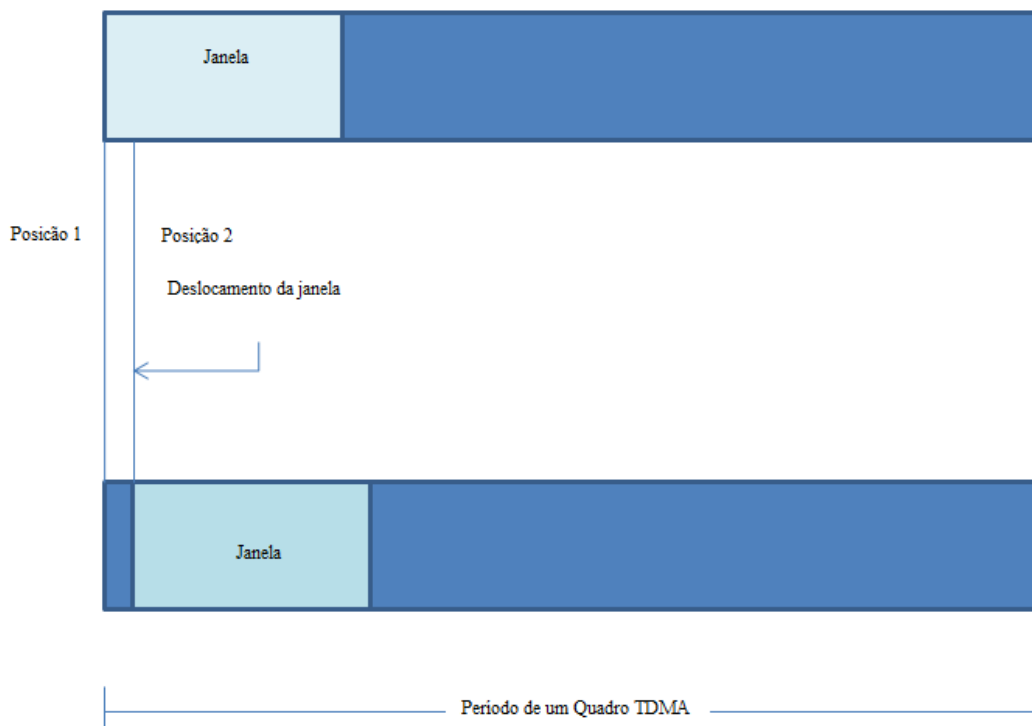


Figura 5.11 - Processo de deslocamento da janela de sincronização para determinação da posição inicial do Quadro TDMA.

O procedimento acima descrito pode ser repetido periodicamente para possibilitar um melhor desempenho na escolha do ponto de partida para o sensoriamento e combater a perda de sincronismo.

Para testar o método de sincronismo proposto, são realizadas simulações para uma Razão-Sinal-Ruído de: -10 dB. Um sinal com transmissão de usuários primários em dois *time slots* consecutivos foi analisada para verificar a Porcentagem de Acertos (PA) das posições de início de qualquer um desses *time slots*. Durante as simulações, considera-se acerto quando o sincronizador determina que a posição de início do Quadro TDMA se encontra entre um período de guarda anterior ou posterior a real posição de início de qualquer um dos *time slots* utilizados pelos usuários primários. Para verificar a otimização da PA, foram consideradas as situações de sensoriamento de: 5, 7, 15, 19, 21 e 23 Quadros TDMA consecutivos. Devido ao tempo demandado para as simulações, cada uma dessas situações foi repetida apenas 50 vezes para obtenção da PA. Para obter maior confiabilidade, seria preferível um número maior de repetições. A Figura 5.12 mostra os resultados dessa simulação:

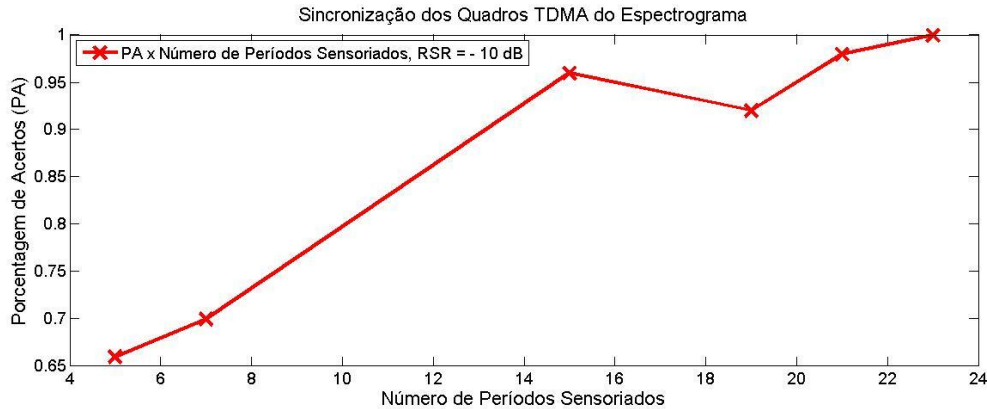


Figura 5.12 – Porcentagem de Acertos (PA) x Número de Períodos Sensoriados para RSR igual a -10 dB

Como se pode notar, apesar de a PA apresentar uma queda, das simulações de 15 para 19 Quadros TDMA sensorizados (resultado do número pequeno repetições na simulação), a tendência é que a PA aumente com o acréscimo de quadros consecutivos, chegando a 100% de acerto com 23 Quadros TDMA sensorizados.

O processo de sincronização possui um alto custo de tempo e complexidade computacional em sua operação, entretanto, uma vez sincronizado, não há a necessidade de se repetir o

procedimento com grande frequência. Em contrapartida, se resolve um dos principais entraves para a utilização do Espectrograma no sensoriamento de sistemas TDMA/FDMA.

5.4 - CONCLUSÃO

Este capítulo propõe uma nova abordagem para a detecção de espectro, utilizando a Análise Tempo-Frequência conhecida como espectrograma, para determinar os *time slots* ocioso em cada canal de um sistema TDMA/FDMA. Na detecção de energia, tal como na maior parte das técnicas de detecção do espectro, as representações do sinal no domínio do tempo ou no da frequência são mutuamente exclusivos. Por outro lado, o espectrograma fornece uma distribuição localizada em ambos os domínios (tempo e frequência), com as mesmas características $P_{FA} \times P_{ND}$ do Detector de Energia.

O espectrograma foi aplicado, por meio de simulações, a um sistema TETRA, que é um sistema baseado em uma multiplexação do tipo TDMA/FDMA amplamente utilizado em agências públicas de todo o mundo. Os resultados mostraram que com o Espectrograma podemos identificar os *time slots* e os canais de frequência disponíveis, com o mesmo desempenho obtido pelo Detector de Energia, com a vantagem da exata determinação da das posições no tempo utilizadas, para cada um dos canais de frequência.

Para uma melhor compreensão do comportamento de ATF Espectrograma, foram feitas simulações para diferentes cenários de nível de ruído e janelas de observação. Como esperado, as curvas de $P_{FA} \times P_{ND}$ melhoram seu desempenho com o aumento da RSR. Simulações foram feitas com diferentes comprimentos de janelas de sensoriamento para demonstrar os efeitos da extrapolação do "princípio da incerteza" sobre o desempenho do sensoriamento espectral baseado no Espectrograma.

Constatou-se, ainda, que o desempenho do Espectrograma decai quando o sinal está em presença de desvanecimentos seletivos em frequência do tipo Rice ou Rayleigh. Entretanto, como a transmissão do sinal se mantém no mesmo *time slot* por vários quadros, o problema pode ser minimizado mediante a combinação de alguns Quadros TDMA consecutivos.

Por fim, o capítulo demonstrou o tratamento de uma das principais dificuldades de se sensoriar o espectro em situações de baixíssima RSR, a falta de informações para se sincronizar o sensor com o sinal transmitido.

6 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho tomou como objetivo a busca de um mecanismo de sensoriamento espectral, para aplicação em rádios cognitivos, que permitisse não só a verificação da utilização de determinado canal de um sistema TDMA/FDMA por um usuário primário, mas também que determinasse em quais *time slots* essa ocupação ocorre.

Buscou-se trazer ao leitor as motivações para o desenvolvimento do tema. Para tanto, foi comentado o fato de que o Brasil se encontra em foco por advento dos grandes eventos internacionais que ocorrem no período de 2012 a 2016 (começando com a Rio+20 e encerrando com os jogos olímpicos de 2016). Salientou-se que, nesse contexto, a segurança pública será um fator ainda mais crítico e que o espectro disponível para esse tipo de atividade ainda é escasso. Dessa forma, as entidades de segurança pública federais, estaduais e municipais terão que compartilhar esse espectro e, portanto, terão que se organizar para evitar que haja interferência entre elas em sua radiocomunicação. Um dos principais protocolos de radiocomunicação digital para aplicação em segurança pública é o protocolo TETRA [7], portanto, esse foi escolhido para embasar o estudo.

O trabalho buscou trazer os principais conceitos envolvendo o protocolo de radiocomunicação digital troncalizado TETRA, de forma a subsidiar as etapas de simulação. Por apresentar maior degradação e, portanto, maiores dificuldades para o bom desempenho do sensoriamento espectral, foi escolhido o enlace de subida como objeto de estudo. Dessa forma, esse foram disponibilizadas informações como a estrutura de quadros desse sistema, tempo de guarda entre quadros consecutivos, esquema de multiplexação (TDMA/FDMA), tipo de codificação, modos de operação, entre outros aspectos.

Buscou-se, ainda, subsidiar o leitor com um arcabouço regulatório, trazendo um quadro trazendo da atual atribuição, destinação e distribuição das faixas de radiofrequência no Brasil [16]. Além disso, foram disponibilizados conceitos da Lei Geral de Telecomunicações [11] e outros regulamentos expedidos pela Anatel. Vários aspectos foram levantados, do ponto vista regulatório, para demonstrar que a legislação brasileira possui conceitos favoráveis a implementação de tecnologias de radio cognitivo, mas que seriam necessárias algumas modificações para sua implementação. Por fim, trouxe as definições da Resolução n.º 557/2010 [1] que destina a faixa de 380 MHz para utilização em segurança pública e traz a necessidade de compartilhamento dessa faixa entre as diversas autoridades, de todas as esferas, que atuam nesse tipo de atividade.

O trabalho trouxe, também, conceitos relacionados ao rádio cognitivo e, dentre eles, o processo de sensoriamento espectral. Buscou-se avaliar alguns dos diversos métodos de

sensoriamento disponíveis na literatura com o intuito de escolher aquele que melhor se adequa-se ao problema da detecção de *time slots* ociosos em vários canais de frequência simultaneamente. Para isso, era necessária uma visão da ocupação tanto no tempo quanto na frequência dos canais. Como o Detector de Energia e o Detector Cicloestacionário, não permitem a verificação de utilização do canal no tempo e na frequência simultaneamente, escolheu-se uma ferramenta chamada Análise Tempo-Frequência. Trata-se na verdade de um conjunto de distribuições que permitem a visualização do canal nos dois domínios de forma simultânea. Portanto, foi necessário verificar, dentre essas distribuições, qual melhor se aplicava à proposta desse trabalho. Três métodos foram avaliados: a Transformada de Fourier de Tempo-Curto (STFT), o Espectrograma e a Distribuição de Wigner-Ville. Após a análise de prós e contras desses três métodos, optou-se pela utilização do Espectrograma para as simulações.

Foi realizada a verificação, por meio de simulações, do desempenho da Análise Tempo-Frequência escolhida para tratar do problema proposto, o Espectrograma. O desempenho do método foi comparado ao de outro amplamente conhecido, o Detector de Energia. Mostrou-se que o desempenho dos dois métodos é similar ao comparar as curvas de probabilidade de falso alarme x probabilidade de não detecção. Entretanto, o Espectrograma consegue fornecer uma visualização simultânea dos domínios do tempo e da frequência. Em seguida foram realizados testes para verificar o desempenho do Espectrograma em diferentes cenários de RSR, além de aplica-lo a sinais submetidos a canais variantes no tempo com desvanecimento seletivo em frequência. Foi observado o comportamento do método ao se escolher diferentes comprimentos de janelas de observação, de forma a notar a influência do princípio da incerteza em transformadas dependentes de janelas de sensoriamento. Por fim, foi proposto um método para sincronizar o sensor espectral com o quadro TDMA do protocolo TETRA, uma vez que todas as simulações consideraram que essa situação ocorria. O próprio Espectrograma foi utilizado para essa finalidade e, apesar do alto custo computacional envolvido, os resultados foram satisfatórios.

Por todo o exposto, considerou-se que o objetivo principal do trabalho, a detecção de *time slots* ociosos em vários canais de frequência simultaneamente, em sistemas com multiplexação do tipo TDMA/FDMA, é possível através da utilização da Análise Tempo-Frequência conhecida como Espectrograma.

Como continuidade desse trabalho, recomenda-se a verificação do desempenho do Espectrograma para o método de modulação QAM do protocolo TETRA, além de sua aplicação em outros protocolos de comunicação, como os que envolvem a quarta geração

de telefonia móvel 4G. Podem ser propostos outros mecanismos de Análise Tempo Freqüência e realizada uma comparação dos resultados com os propostos nesse trabalho. O sensoriamento cooperativo pode ser estudado com o intuito de diminuir a banda necessária para o sensoriamento. Outro estudo de interesse é a comparação da Análise Tempo Freqüência com outros métodos, como vários Detectores de Energia sensoriando cada faixa de uma só vez, a fim de verificar qual é o método mais vantajoso. Pode ser realizada, também, uma análise mais aprofundada da complexidade de cada método de sensoriamento citado nesse trabalho. Por fim, pode ser proposto outro método para sincronização que exija menor esforço computacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BRASIL, Resolução n.º 557/2010-ANATEL, de 20 de dezembro de 2010. “Aprova o regulamento sobre canalização e condições de uso de radiofrequências na faixa de 380 MHz a 400 MHz”. Diário Oficial da União de 24 de dezembro de 2010.
- [2] *RADIOCOMMUNICATION STUDY GROUPS*. “*Definition of Software Defined Radio and Cognitive Radio Systems*”. Documento 5A. Emirados Árabes Unidos. Maio de 2009
- [3] BRASIL, Resolução n.º 259/2001-ANATEL, de 19 de abril de 2001. “Aprova o regulamento de uso do espectro de radiofrequências. Diário Oficial da União de 20 de abril de 2001”.
- [4] Report ITU-R SM.2152, “*Definitions of Software Defined Radio (SDR) and Cognitive Radio System (CRS)*”. Setembro de 2009.
- [5] RODRÍGUEZ, CARLOS. “Rádio Cognitivo: Conceito”. Anatel. Seminário de Rádio Cognitivo realizado na Anatel, Novembro de 2011.
- [6] ALMEIDA, E.P. L. “Desenvolvimento de Técnica de Sensoriamento de Espectro Embasada em Detecção de Energia para Aplicações em Sistemas de Rádio Cognitivos”. UNB, 2010
- [7] ETSI EN 300 392-2 (V3.2.1): “*Terrestrial Trunked Radio (TETRA); Voice plus Data (V+D); Part 2: Air Interface (AI)*”, 2007.
- [8] ALLEN, R. L.; MILLS, D. W. *Signal Analysis – Time, Frequency, Scale and Structure*. [S.l.]: IEEE Press, 2004
- [9] COHEN, L. “*Time-Frequency analysis.*” [S.l.]: Prentice Hall *Signal Processing Series*, 1995
- [10] B. BOASHASH, “Time Frequency Signal Analysis and Processing: A Comprehensive Reference,” ELSEVIER, 2003
- [11] KROESE, D. P.; TAIMRE, T.; BOTEV, Z.I. “*Handbook of Monte Carlo Methods*”. Nova Iorque: John Wiley & Sons. p. 772. ISBN 0-470-17793-4, 2011.

- [12] ETSI, “*Guide to the R&TTE Directive 1999/5/EC*”. Versão de 20 de abril de 2009
- [13] SILVA, EDUARDO GONÇALVES, Padrões de Radiocomunicação Digital, artigo publicado pela Coordenação de Projetos da Universidade Federal de Santa Catarina, 2004. Disponível em:
http://projetos.inf.ufsc.br/arquivos_projetos/projeto_18/artigo.pdf . Acesso em: 28 jul. 2010.
- [14] FRANCESCO PASQUALI, Selex *Communications*, “*The power of TETRA— Direct Mode Operation*”, Tetra, Outubro. 2002, pp. 1-29
- [15] BRASIL, Lei n.º 9.472, de 16 de julho de 1997. “Lei Geral de Telecomunicações - Dispõe sobre a organização dos serviços de telecomunicações, a criação e funcionamento de um órgão regulador e outros aspectos institucionais, nos termos da Emenda Constitucional n.º 8, de 1995”. Diário Oficial da União de 17 de julho de 1997.
- [16] Quadro de Atribuição de Faixas de Freqüências no Brasil. Disponível em:
<http://www.anatel.gov.br/Portal/exibirPortalRedireciona.do?codigoDocumento=98580&caminhoRel=In%EDcio-Radiofreq%FC%EAnCIA-Apresenta%E7%E3o>. Acesso em: 19 de outubro de 2012
- [17] BRASIL, Resolução n.º 404/2005-ANATEL , de 05 de maio de 2005. “Aprova Alterações no Regulamento do Serviço Móvel Especializado – SME”. Diário Oficial da União de 16 de maio de 2005.
- [18] BRASIL, Norma n.º 13/1997-MC, de 19 de setembro de 1997. “Estabelece condições aplicáveis à outorga de autorização e de permissão para exploração de Serviço Limitado, bem como disciplina o relacionamento entre outorgante e outorgado, dispondo sobre as condições de execução e de exploração do Serviço”. Diário Oficial de União de 23 de setembro de 1997.
- [19] BRASIL, Norma n.º 002/1997-MC, de 17 de fevereiro de 1997. “Estabelece a canalização e as condições de uso das faixas 460-462 MHz e 465-467 MHz, 806-821 MHz e 851-866 MHz, 821-824 MHz e 866-869 MHz, 896-901 MHz e 935-940 MHz, atribuídas ao Serviço Móvel, destinadas ao Serviço Limitado de Radiocomunicação, nas modalidades Móvel Privativo (SMP) e Móvel Especializado (SME), por sistemas analógicos ou digitais. Substituída pela

- Resolução nº 455, de 18/12/2006”. Diário Oficial de União de 23 de setembro de 1997.
- [20] BRASIL, Resolução n.º 455/2006-ANATEL , de 18 de dezembro de 2006. "Aprova o Regulamento sobre Canalização e Condições de Uso de Radiofrequências nas Faixas de 460 MHz, 800 MHz e 900 MHz para o Serviço Limitado Móvel Privativo (SLMP) e Serviço Móvel Especializado (SME)”. Diário Oficial da União de 27 de dezembro de 2006.
- [21] BRASIL, Resolução n.º 303/2002-ANATEL , de 02 de julho de 2002. "Aprova o Regulamento sobre Limitação da Exposição a Campos Elétricos, Magnéticos e Eletromagnéticos na Faixa de Radiofrequências entre 9 kHz e 300 GHz”. Diário Oficial da União de 10 de julho de 2002.
- [22] YüCEK, H. A. T. “A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications”. IEEE *In Communications Surveys Tutorials*, v. 11, n. 1, p. 116–130, 2009.
- [23] V. PRITHIVIRAJ, B. SARANKUMAR, A. KALAIYARASAN, P. PRAVEEN CHANDRU, N. NANDAKUMAR SINGH. “Cyclostationary Analysis Method of Spectrum Sensing for Cognitive Radio”, IEEE 2011.
- [24] ONER, M.; JONDRAL, F. “Cyclostationarity based air interface recognition for software radio systems”. Em: 2004 IEEE *Radio and Wireless Conference*. [S.l.: s.n.], 2004. p. 263–266.
- [25] LI TONG; TANG YINHUI; LV JUN , "Parameter estimation of FH signals based on STFT and music algorithm" *Computer Application and System Modeling (ICCASM)*, 2010 *International Conference on* , vol.5, no., pp.V5-232-V5-236, 22-24 de outubro de 2010.
- [26] D. GABOR. “Theory of communication” J.IEE, vol.93(III), pp 429-457, Novembro, 1946.
- [27] S. G. MALLAT AND J. FROMENT. “Second generation compact image coding with wavelets, in C. K. Chui, ed., *Wavelets: A Tutorial in Theory and Applications*”, San Diego, CA: Academic Press, 1992.

- [28] D. SINHA, AND A. H. TEWFIK. “*Low bit rate transparent audio compression using adapted wavelets*”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 41, no. 12, pp. 3463–3479, Dezembro de 1993.
- [29] F. F. DIGHAM, M. S. ALOUINI, AND M. K. SIMON, “*On the energy detection of unknown signals over fading channels*”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 55, no. 1, pp. 21–24, 2007.
- [30] HARRY URKOWITZ, “*Energy Detection of Unknown Deterministic Signals*”, *Preparativos para o IEEE*, vol.55, 1967.
- [31] S. HAYKIN, D. J. THOMSON, AND J. H. REED, “*Spectrum sensing for cognitive radio*,” *Preparativos para o IEEE*, vol. 97, no. 5, pp. 849–877, Maio de 2009.
- [32] JAVED, FARRUKH MAHMOOD, ASAD, “*The use of time frequency analysis for spectrum sensing in cognitive radios*”. , Em *2010 4th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS)*, Gold Coast, Austrália, Dezembro de 2010.