

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Mauro Vieira de Lima**

**Medição de Ocupação Espectral e Estudo das  
Oportunidades de Espectro para Uso de Sistemas  
Rádio Cognitivo**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Elétrica da PUC-Rio como requisito parcial  
para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2013



**Mauro Vieira de Lima**

## **Medição de Ocupação Espectral e Estudo das Oportunidades de Espectro para Uso de Sistemas Rádio Cognitivo**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello**

Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

**Prof. Marco Antonio Grivet Mattoso Maia**

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

**Prof. Gláucio Lima Siqueira**

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

**Profa. Leni Joaquim de Matos**

UFF

**Prof. Rodolfo Saboia Lima de Souza**

INMETRO

**Profa. Marta Pudwell Chaves de Almeida**

INMETRO

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico

Rio de Janeiro, 20 de fevereiro de 2013

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador

## Mauro Vieira de Lima

Graduou-se em Engenharia Elétrica - ênfase Eletrônica, em Dezembro de 1994, na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Trabalhou nas empresas Embratel, Claro, Intelig e AsGa Sistemas como engenheiro de telecomunicações. Concluiu MBA executivo no IBMEC em 2001. Trabalha como pesquisador no Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro). Em Agosto de 2010, iniciou no Centro de Estudos em Telecomunicações da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro seu Mestrado na área de Eletromagnetismo Aplicado.

### Ficha Catalográfica

Lima, Mauro Vieira de

Medição de ocupação espectral e estudos das oportunidades de espectro para uso de sistemas rádio cognitivo / Mauro Vieira de Lima; orientador: Luiz Alencar Reis da Silva Mello – 2013.

131 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2013.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Sistemas rádio cognitivo. 3. Sensoriamento de espectro. 4. Acesso dinâmico do espectro. I. Mello, Luiz Alencar Reis da Silva. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

## **Agradecimentos**

Ao meu orientador Dr. Silva Mello.

À minha esposa Clarissa e família.

Aos amigos.

Aos colegas do INMETRO e CETUC-Rio.

Ao INMETRO e PUC-Rio.

## Resumo

Vieira de Lima, Mauro; Silva Mello, Luiz Alencar Reis da (Orientador). **Medição de Ocupação Espectral e Estudo das Oportunidades de Espectro para Uso de Sistemas Rádio Cognitivo**. Rio de Janeiro, 2013. 131p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Atualmente, a escassez espectral é um problema real que está sendo agravado pela alta demanda de sistemas de banda larga sem fio. A tecnologia do rádio cognitivo tem sido considerada uma solução promissora para esse problema. Muitas campanhas de medição de espectro, cobrindo uma larga faixa de frequências e outras em bandas específicas, têm sido desenvolvidas em diversos locais e cenários para determinar o grau de ocupação do espectro alocado em ambientes reais de sistemas de comunicação sem fio. Medições de ocupação do ambiente radioelétrico podem prover importantes informações sobre o uso atual do espectro. Estas informações são importantes para a definição adequada de políticas de uso dinâmico do espectro, seleção apropriada de faixas de frequências para implementação de futuras redes de rádios cognitivos e identificação de padrões de uso que podem ser explorados no desenvolvimento de modelos e técnicas de uso eficiente do espectro.

## Palavras-chave

Sistemas Rádio Cognitivo; Sensoriamento do Espectro; Acesso Dinâmico do Espectro.

## Abstract

Vieira de Lima, Mauro; Silva Mello, Luiz Alencar Reis da (Advisor). **Spectral Occupancy Measurement and Spectral Opportunities Analysis to Cognitive Radio Systems**. Rio de Janeiro, 2013. 131p. MSc Dissertation - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Currently, spectrum scarcity is a real problem that is being worsened by the high demand for wireless broadband systems. The technology of cognitive radio has been considered a promising solution to this problem. Many spectrum measurement campaigns, covering a wide band of frequencies, and also specific bands, have been developed in several locations and sceneries for determining the degree of occupation of the allocated spectrum in real environments of wireless communication systems. Occupation measurements of radio spectrum environment can provide important information about the current use of the spectrum. This information is important for suitable policies definition for dynamic use of the spectrum, for frequency bands selection to implement future cognitive radio networks and for patterns identification that can be exploited in the development of models and techniques for efficient use of spectrum."

## Keywords

Cognitive Radio Systems; Spectrum Sensing; Dynamic Spéctrum Access.

# Sumário

1	Introdução	12
1.1.	Objetivos do Trabalho	14
1.2.	Organização do Trabalho	14
2	Regulação, Tecnologias e Padrões	16
2.1.	Aspectos regulatórios	16
2.1.1.	Organização do espectro de frequências	16
2.1.2.	Gerenciamento do espectro de frequências	17
2.1.3.	Compartilhamento de Espectro	18
2.1.4.	Acesso Dinâmico do Espectro	19
2.1.5.	Atual estágio de regulação para ocupação oportunística do espectro	21
2.1.5.1.	FCC	21
2.1.5.2.	OFCOM	24
2.1.5.3.	CEPT	25
2.2.	Tecnologia Rádio Cognitivo	26
2.2.1.	Rádio Definido por “Software”	27
2.2.2.	Técnicas de detecção de “white spaces”	29
2.2.2.1.	Sensoriamento	29
2.2.2.1.1.	Detecção de Energia	32
2.2.2.1.2.	Detecção cicloestacionária	34
2.2.2.1.3.	Detecção por filtro casado	36
2.2.2.1.4.	Sensoriamento cooperativo	37
2.2.2.2.	Banco de Dados e Geolocalização	40
2.2.3.	Técnicas de alocação e gerenciamento de canais secundários	41
2.2.3.1.	Acesso a uma Rede de Rádios Cognitivos	41
2.2.3.2.	Acesso a uma Rede “Ad-hoc”:	41
2.2.3.3.	Acesso a uma Rede Primária:	42
2.3.	Padrões internacionais	44
2.3.1.	IEEE 802.22	45
2.3.2.	ETSI	52
2.3.2.1.	Arquitetura Funcional para Gerenciamento e Controle	53
2.3.2.2.	Canal Piloto Cognitivo (CPC)	55
2.3.3.	ECMA 392	55
3	Metodologia de Medição	56
3.1.	Introdução	56
3.2.	Descrição das medições de ocupação espectral	57
3.2.1.	Definição das bandas de frequências	57
3.2.2.	Caracterização do ambiente e período de teste	58
3.2.3.	Especificação do “setup” de medição	59
3.3.	Aspectos Metodológicos	61
3.3.1.	Abordagem estatística	61
3.3.2.	Aspectos relacionados à frequência	62
3.3.3.	Aspectos relacionados ao tempo	63
3.3.4.	Aspectos relacionados ao pós-processamento	65
4	Processo de Medição, Resultados e Simulação	68
4.1.	Fluxo do processo de medição e “softwares”	68
4.2.	Medição	68
4.3.	Processamento	69

4.4. Análise	70
4.4.1. Analisa Ocupação	70
4.4.2. Analisa Canal	74
4.4.3. Resultado Consolidado da Ocupação Espectral	75
4.5. Estratégias e Modelos	79
4.5.1. Simulação de Sistema Rádio Cognitivo	79
5 Estudo das Oportunidades de Espectro para Uso de Sistemas Rádio Cognitivo	85
5.1. Modelo de Ocupação do Usuário Primário	86
5.2. Modelo de Ocupação do Usuário Secundário	87
5.2.1. Esquemas de alocação de canal	88
5.2.1.1. Alocação aleatória	89
5.2.1.2. Alocação pela maior média de sequências OFF	89
5.2.1.3. Alocação pela maior probabilidade de estado OFF	90
5.2.1.4. Estudo da janela de tempo	91
5.2.1.5. Estudo comparativo	93
5.3. Avaliação das Faixas de Frequências pela Eficiência Espectral	96
5.4. Modelo Bi-dimensional de “White Spaces”	99
5.4.1. Esquema de Alocação Bi-dimensional de “White Spaces”	102
6 Conclusões	107
7 Referências Bibliográficas	111
Anexo A – Gráficos das Medições de Ocupação Espectral	115

## Lista de Figuras

Figura 2.1. Compartilhamento vertical e horizontal aplicáveis ao rádio cognitivo	18
Figura 2.2. Diagrama em blocos de um rádio digital	27
Figura 2.3. Desempenho do detector de energia	34
Figura 2.4. Interferência devido ao nó escondido	37
Figura 2.5. Múltiplos serviços primários que compartilham espectro com um serviço secundário	44
Figura 2.6. Algoritmo de classificação de canal do padrão 802.22	48
Figura 2.7. Diagrama de transição de estados do canal do padrão 802.22	49
Figura 2.8. Grupos de trabalho (WG) do ETSI TC RRS	52
Figura 2.9. Arquitetura Funcional proposta pelo ETSI TC RRS WG3	54
Figura 3.1. Antena e Ambiente da Medição	59
Figura 3.2. Diagrama do Sistema de medição	60
Figura 3.3. Número de amostras x ocupação. (exatidão relativa 10% - nível de confiança 95%)	62
Figura 3.4. Ocupação Média por Hora	64
Figura 4.1. Fluxo do Processo de Medição	68
Figura 4.2. “Signal, Noise Floor and Threshold”	71
Figura 4.3. “Max Hold”	71
Figura 4.4. “Waterfall”	72
Figura 4.5. “Duty Cycle”	72
Figura 4.6. “Waterfall” de potência	73
Figura 4.7. “Waterfall” Ocupação dos Canais	75
Figura 4.8. Ocupação do Espectro Radioelétrico Medido	77
Figura 4.9. “Waterfall” de Ocupação da Banda 614 a 698 MHz	79
Figura 4.10. Diagrama Simulador Radiobase Cognitiva	81
Figura 4.11. Parâmetros de Desempenho do Simulador	84
Figura 5.1. Segmentação do tempo para modelo discreto da cadeia de Markov.	86
Figura 5.2. Diagrama de transição de estados – modelo Gilbert-Elliot.	86
Figura 5.3. Avaliação de desempenho dos esquemas de alocação de canais.	89
Figura 5.4. Estudo da Janela de Tempo	92
Figura 5.5. Comparativo Esquemas de Alocação de Canais.	95

Figura 5.6. Ocupação x Eficiência Espectral	97
Figura 5.7. Gráficos “waterfall” de ocupação de canais das faixas 1930-1970 e 2025-2110 MHz	98
Figura 5.8. Perdas devido à canalização de um sistema rádio cognitivo.	99
Figura 5.9. Imagens Binárias de WS. (a) ênfase no tempo (b) ênfase na frequência	101
Figura 5.10. Densidade de “White Space”	102
Figura 5.11. Esquema de Alocação de “White Space”.	104
Figura 5.12. Esquemas de alocação de canais Bi-dim e Média de sequências OFF.	105

## Lista de Tabelas

Tabela 1.1. Espectro Brasileiro Atual e Previsão	13
Tabela 2.1. Separação mínima entre TVBD e contorno limite de serviço de TV	23
Tabela 2.2. Limiares de sensoriamento	23
Tabela 2.3. Parâmetros de RF para dispositivos fixos	24
Tabela 2.4. Parâmetros de RF para dispositivos portáteis	24
Tabela 2.5. Requisitos OFCOM para sensoriamento do espectro	25
Tabela 2.6. Requisitos OFCOM para geo-localização	25
Tabela 2.7. Requisitos de sensoriamento no padrão 802.22	32
Tabela 2.8. Durações e mensagens do padrão 802.22	51
Tabela 3.1 Faixas de Frequência de Medição	58
Tabela 3.2 Impacto do RBW na ocupação	63
Tabela 4.1 Serviços associados as 7 faixas de maior ocupação espectral	76
Tabela 4.2 Espectro associado aos canais de TV	78
Tabela 5.1. Dados da simulação “CCA with HO”	94
Tabela 5.2. Parâmetros da simulação	96
Tabela 5.3. Parâmetros das simulações 2º esquema e Bi-dim	105

# 1

## Introdução

A União Internacional de Telecomunicações (ITU), durante as periódicas Conferências Mundiais de Rádio (WRC), chancela recomendações sobre o uso do espectro radioelétrico. Tais documentos são frutos de discussões entre representantes de diversos países e costumam ser plenamente adotados pelos órgãos reguladores de cada país.

Em última análise, a organização do espectro radioelétrico é fruto de uma coordenação entre sistemas de comunicação que, no melhor conceito de engenharia, foi concebida para evitar interferências através da separação desses sistemas por faixas de frequências.

Uma vez definida a alocação do espectro para os sistemas, os órgãos reguladores de cada país definem o licenciamento das faixas de frequências. Tal licenciamento é realizado, na quase totalidade dos casos, pelo modelo “comando e controle”, no qual uma entidade é selecionada para utilizar aquela faixa do espectro.

O modelo “comando e controle”, tradicionalmente utilizado pelas agências regulatórias, evita as interferências através de restrições impostas no licenciamento quanto à localização do transmissor, quanto ao máximo nível de potência, entre outros.

Apesar de mitigar com sucesso a interferência entre os sistemas, este tipo de abordagem causa a subutilização do espectro, inflaciona o custo do acesso ao espectro e freia a inovação tecnológica.

A rápida proliferação dos sistemas de comunicação móveis e o crescimento do tráfego de dados dos dispositivos do tipo “smartphones” criaram uma enorme demanda por espectro [1] [2]. Entretanto, o atual cenário de regulação governamental indica a falta de espectro para satisfazer a previsão de crescimento da capacidade dos sistemas banda larga sem fio, como mostra a Tabela 1.1 [4].

Tabela 1.1. Espectro Brasileiro Atual e Previsão

Espectro Atual Redes Móveis	
Faixa (MHz)	Banda (MHz)
450	14
800/900	70
1800	150
1900/2100	135
2500	190
<b>Total</b>	<b>559</b>

Regulador/Ano	Previsão de Uso (MHz)
Anatel 2015	980
Anatel 2020	1060
ITU-R 2020 Min	1280
ITU-R 2020 Max	1720

O gerenciamento do espectro pelos órgãos reguladores é, basicamente, realizado através da concessão de licença para uma alocação fixa de frequências exclusivas para um único operador em uma grande área geográfica. Medições de ocupação espectral demonstram que essa forma de gerenciamento do espectro é ineficiente, visto que uma grande parte do espectro é subutilizada pelos operadores. [3]

O crescimento dos sistemas de banda larga sem fio depende da disponibilização de mais espectro ou do uso mais eficiente do espectro atual. Sendo a faixa útil do espectro radioelétrico para aplicações móveis um recurso natural limitado, a solução deve estar centrada no aumento da eficiência. Tais considerações têm motivado o estudo de novas tecnologias para contornar o problema da suposta escassez de espectro.

A tecnologia do rádio cognitivo tem sido pesquisada na última década e considerada como chave para utilização mais eficiente do espectro, pois permite a utilização do espectro subutilizado através de rádios reconfiguráveis com inteligência para entender e adaptar-se ao ambiente radioelétrico.

Diversas campanhas de medição de ocupação do espectro, cobrindo uma larga banda de frequências licenciadas, têm sido desenvolvidas em diversos locais e cenários, visando determinar o grau de ocupação das bandas do espectro em sistemas de comunicação sem fio.

As informações sobre a atual utilização do espectro radioelétrico, obtidas por meio das medições do ambiente rádio, são importantes na definição de políticas regulatórias adequadas para acesso dinâmico do espectro, na seleção das bandas de frequências mais apropriadas para as futuras redes de rádios

cognitivos e na identificação de padrões de utilização que podem ser explorados em modelos de utilização do espectro e em técnicas cognitivas mais eficientes.

## 1.1

### **Objetivos do Trabalho**

O trabalho desenvolvido nesta dissertação visa abordar medições de ocupação do espectro radioelétrico no contexto de sua utilização para sistemas rádio cognitivo.

O primeiro objetivo é desenvolver uma metodologia de medição na qual estejam contemplados não apenas as medições em si, mas todo o processo de análise e definição de estratégias e modelos para avaliação da ocupação espectral.

O segundo objetivo visa avaliar as faixas de frequência que foram medidas em termos de sua qualidade para ser utilizada por um sistema oportunístico. Busca-se uma avaliação direta através da simulação de um sistema rádio cognitivo e da determinação de seu desempenho em função das características da faixa de frequência.

Por fim, a dissertação tem como objetivo desenvolver um estudo sobre modelos que podem ser aplicados a um sistema rádio cognitivo para melhoria de seus parâmetros de desempenho, visando resolver problemas específicos encontrados nas faixas de frequências.

## 1.2

### **Organização do Trabalho**

Esta dissertação está dividida em seis capítulos. O capítulo 1 insere o leitor no contexto do trabalho e define os objetivos e a organização do mesmo.

O capítulo 2 introduz conceitos associados ao aspecto regulatório, em especial o conceito de acesso dinâmico do espectro (DSA – “Dynamic Spectrum Access”). Define rádio cognitivo e mostra aspectos associados a sua tecnologia. Além disso, fornece informações sobre padrões internacionais, tal como o padrão IEEE 802.22.

O capítulo 3 apresenta a metodologia de medição, sendo feita uma descrição das medições, justificada a abordagem estatística e discutidos os aspectos relacionados à frequência, ao tempo e ao pós-processamento.

No capítulo 4 o processo de medição é descrito, um fluxo do processo define as fases e para cada fase são detalhados os “softwares” desenvolvidos.

O capítulo 5 desenvolve um estudo sobre as oportunidades de espectro das faixas de frequências, buscando avaliar o desempenho para utilização de sistemas rádio cognitivo.

Por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões dos estudos e análises realizadas.

## 2

# Regulação, Tecnologias e Padrões

### 2.1

#### Aspectos regulatórios

##### 2.1.1

#### Organização do espectro de frequências

O espectro de frequências é organizado por meio de alocações e licenciamento.

Alocações determinam o tipo de uso e os respectivos parâmetros de transmissão. Alocações são específicas de cada país e na maioria das vezes seguem definições de acordos internacionais. Acordos internacionais podem ser bilaterais ou multilaterais, como as resoluções da União Internacional de Telecomunicações (ITU – International Telecommunication Union) estabelecidas durante as periódicas Conferências Mundiais de Rádio (WRC – World Radio Conference).

Licenciamentos são licenças individuais fornecidas sobre uma dada alocação. O licenciamento é realizado de acordo com o método de escolha do órgão regulador e, geralmente, abrange uma grande extensão territorial.

Existem 3 tipos básicos de licenciamento [9] aplicáveis ao Brasil:

- Comando e controle:

O licenciamento é dado pela seleção de uma entidade que é autorizada a utilizar uma faixa do espectro, atendendo aos objetivos da nação.

- Leilões:

O licenciamento do espectro é feito através de leilões.

- Protocolos e etiquetas:

Neste caso não existe o licenciamento de frequências específicas, a alocação permite que os dispositivos operem na faixa do espectro e a seleção de uma frequência particular é feita através de protocolos e etiquetas.

### 2.1.2

#### Gerenciamento do espectro de frequências

Atualmente, os métodos de gerenciamento do espectro de frequências são:

- Licenças de acesso ao espectro
- Dispositivos para faixas com dispensa de licenças

Licenças de acesso ao espectro são emitidas pela agência regulatória de um país. As licenças incluem uma banda, uma região geográfica e os parâmetros operacionais, tais como níveis máximo de transmissão dentro e fora da banda. Embora as licenças tenham uma duração finita, há uma expectativa de renovação das mesmas. Existe também um certo nível de proteção de interferência por outros sistemas acessando o espectro.

Dispositivos para faixas com dispensa de licenças são fabricados dentro de características de transmissão e bandas de frequências definidas pela agência reguladora de um país e não possuem proteção regulatória de interferências. Em geral, possuem níveis de transmissão bem mais baixos que as bandas de frequências com licenças de acesso.

Dispositivos para faixas com dispensa de licenças sempre operam na banda como usuários secundários, sendo permitida sua operação em uma base de não interferência. Não existe nenhuma proteção de qualquer interferência vinda de usuários primários ou de outros dispositivos para faixas com dispensa de licenças.

Os dispositivos para faixas com dispensa de licenças coordenam o acesso ao espectro através de protocolos e etiquetas.

Protocolos são interações explícitas para o acesso ao espectro como, por exemplo, as do IEEE 802.11 (WLAN).

Etiquetas são regras que são seguidas sem interação explícita entre os dispositivos. Etiquetas simples, tais como “ouvir antes de falar” ou Seleção Dinâmica de Frequência (DFS - dynamic frequency selection), têm sido desenvolvidas para as bandas de 5 GHz do IEEE 802.11a (IEEE 802.11h).

A Seleção Dinâmica de Frequência (DFS) adotada no padrão 802.11h é usada para prevenir um dispositivo de acessar um canal rádio que já está em uso. DFS é responsável por evitar interferência co-canal com outros dispositivos. [9]

### 2.1.3

#### Compartilhamento de Espectro

Compartilhamento de espectro é o uso simultâneo de uma banda de frequência específica, em certa área geográfica, por um número de entidades independentes.

Compartilhamento de Espectro Vertical pode ser entendido como a coexistência de usuários secundários e primários em uma banda licenciada, onde o usuário secundário possui baixa prioridade para acessar o espectro e deve cumprir com requisitos para não interferência com os usuários primários.

Compartilhamento de Espectro Horizontal pode ser entendido como a coexistência de usuários secundários na mesma banda de frequências, possuindo seus sistemas os mesmos direitos de acesso ao espectro.

Um possível exemplo futuro de compartilhamento de espectro com o rádio cognitivo é mostrado na Figura 2.1 [10].

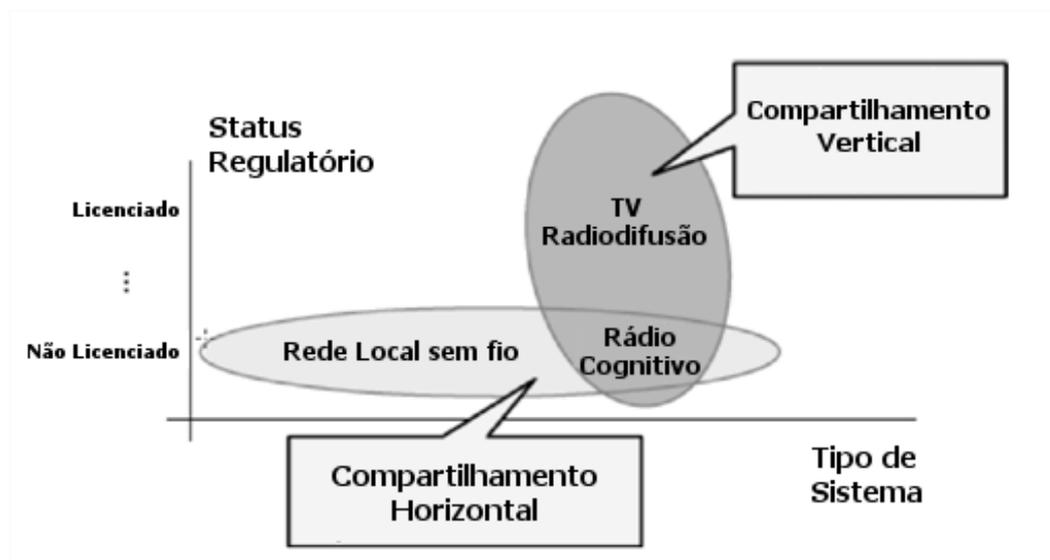


Figura 2.1. Compartilhamento vertical e horizontal aplicáveis ao rádio cognitivo

Uma preocupação primária é o impacto da mudança da estrutura do serviço. Atualmente, os serviços são integrados verticalmente, fazendo com que a responsabilidade pelo gerenciamento do espectro seja de um único operador,

tal como na telefonia celular. Assim, o operador tem sozinho a responsabilidade por problemas, interferências e qualquer questão técnica do serviço.

Uma mudança para uma estrutura de serviços integrados horizontalmente, como no caso de sistemas centrados em dispositivos, não haverá um ponto único de responsabilidade para os problemas e as interferências.

A probabilidade de comportamentos não determinísticos, devido a maior liberdade dos sistemas rádios cognitivos, força a necessidade de maior rigidez na adoção de padrões e nas homologações de equipamentos e “softwares” por parte dos reguladores. Um desafio para os reguladores será a avaliação dos “softwares” embarcados, de forma a assegurar a prevenção da quebra das regras e políticas e a rastreabilidade.

O desenvolvimento de uma política de habilitação de dispositivos poderia assegurar que os dispositivos teriam mecanismos à prova de falhas para prevenir operação em bandas não permitidas.

Uma das preocupações do setor de radiocomunicação da união Internacional de Radiocomunicações (ITU-R - International Telecommunication Union Radiocommunication Sector) tem sido o uso do Sistema Rádio Cognitivo (CRS - Cognitive Radio System) nas bandas de frequências de serviços que poderiam aumentar a indisponibilidade devido às interferências. A recomendação é que o uso de CRS seja excluído das bandas de:

- Serviços espaciais (Espaço-Terra);
- Serviços de radiolocalização;
- Radioastronomia;
- Serviços usando sensores passivos. [11]

#### 2.1.4

#### **Acesso Dinâmico do Espectro**

O modelo comando-e-controle, tradicionalmente, utilizado pelas agências regulatórias, evita as interferências por meio de restrições impostas no licenciamento quanto à localização do transmissor, ao máximo nível de potência, etc.

Apesar de mitigar com sucesso a interferência entre os sistemas, este tipo de abordagem causa a subutilização do espectro, inflaciona o custo do acesso ao espectro e refreia a inovação tecnológica.

Os benefícios de uma abordagem mais liberal têm sido demonstrados pela última década com o sucesso dos sistemas não licenciados nas faixas “Industrial, Scientific and Medical” (ISM), particularmente pelo padrão IEEE 802.11 para Wireless Local Area Networks (WLANs). [9]

Reconhecendo as restrições do atual modelo de gerenciamento de espectro, vários órgãos regulatórios, incluindo “Federal Communications Commission” (FCC) no EUA e “Office of Communications” (OfCom) na Inglaterra, iniciaram a exploração do potencial do modelo conhecido como Acesso Dinâmico do Espectro (DSA – Dynamic Spectrum Access).

A promessa das redes de rádio cognitivo é o aumento da utilização do espectro através do acesso dinâmico do espectro, provendo mais competição aos produtos e ao mercado. O desenvolvimento do CRS e a mudança para o acesso DSA têm demonstrado a necessidade de uma infra-estrutura que habilite a tecnologia dos sistemas rádio cognitivos.

Essa infra-estrutura deveria ser provida pelas agências reguladoras que são detentoras dos bancos de dados de frequências e geo-localização, entretanto, essa é uma tarefa difícil, pois atualmente as agências reguladoras não estão focadas em prover infra-estrutura de serviço.

Uma possível solução seria a concessão desse serviço a empresas ou operadoras existentes que viessem a implementar em suas faixas de frequência o acesso dinâmico do espectro (DSA) para usuários secundários.

A política regulatória de gerenciamento da interferência é, geralmente, definida por parâmetros de transmissão, tais como frequência central, largura de banda, ganho da antena e potência máxima, entre outros.

Sistemas de acesso dinâmico do espectro podem se mover no espectro, alterando seus parâmetros, o que pode tornar insuficiente a definição de parâmetros fixos. Uma nova métrica da interferência deve ser definida para assegurar que um dispositivo DSA não cause interferência prejudicial a outros sistemas.

A alta densidade de utilização do espectro de frequências em áreas de geometria complexa e uma grande quantidade de usuários, na maioria móveis, representam um desafio para um correto sensoriamento do espectro. Embora a tecnologia para uso de modelos de propagação em ambientes complexos esteja melhorando e pode prover resultados qualitativos para extrapolação, ainda é insuficiente para uma análise de interferência quantitativa.

Múltiplas medidas distribuídas em uma área operacional são necessárias para medir com exatidão a interferência. Um possível mecanismo poderia ser o

desenvolvimento de estações de monitoração tais como dispositivos de monitoração de poluição.

A necessidade de assegurar comunicações livres de interferência é um requerimento para as comunicações públicas. O mecanismo para obter e liberar espectro precisa ser altamente previsível. “Beaconing” [3] é um desses mecanismos, ou seja, um serviço que enviaria um sinal como um sinalizador (“beacon”), indicando se o espectro está sendo usado ou se o espectro está disponível para uso.

### **2.1.5**

#### **Atual estágio de regulação para ocupação oportunística do espectro**

As características de propagação sem linha de visada (NLOS), baixa reflexão ionosférica, antenas de tamanho razoáveis das bandas de frequências de TV em VHF e UHF são ideais para cobertura em grandes áreas e em ambientes de população rural.

Ainda existe um grande número de canais de TV não licenciados nessa faixa do espectro, comumente conhecidos como “TV White Spaces” (TVWS) ou apenas White Spaces (WS). As larguras de banda de 6, 7 ou 8 MHz dos canais, dependendo do país, permitem aplicações de acessos banda larga sem fio.

Não há dúvida que o foco da questão regulatória e das aplicações de rádio cognitivo está direcionado para a faixa do espectro licenciada para TV.

As maiores agências regulatórias envolvidas no desenvolvimento de regras para o uso dos TVWS são o FCC (“Federal Communication Commission” - EUA), Ofcom (“Office of Communications” – Reino Unido) e ECC/CEPT (“Electronic Communications Committee /Conference of European Post and Telecommunications” – Europa).

#### **2.1.5.1**

##### **FCC**

As publicações do Plano Nacional de Banda Larga em março de 2010 e Operações Não Licenciadas nas Bandas de Difusão de TV [25] são as mais importantes, no domínio regulatório, para acelerar o uso oportunístico do espectro.

O Plano Nacional de Banda Larga formula a política do espectro para facilitar o uso da banda larga nos próximos anos. Uma das principais recomendações é a liberação de até 500 MHz do espectro para uso da banda larga nos próximos 10 anos com 300 MHz disponibilizados para uso móvel nos próximos 5 anos. O plano força o FCC a iniciar novos procedimentos para acesso oportunístico do espectro, além dos procedimentos já emitidos para TV “White Spaces” (TVWS).

O primeiro “Report and Order” foi emitido em Outubro de 2006. Vários testes de campo e laboratórios de dispositivos de sensoriamento foram realizados entre 2007 e 2008 por várias empresas como Philips, Motorola, Microsoft, I2R e Adaptrum. O segundo “Report and Order” foi emitido em novembro de 2008 [6].

As regras finais para Operações Não Licenciadas nas Bandas de Difusão de TV foram emitidas em setembro de 2010 [8] e suas principais características são listadas a seguir.

- Os dispositivos são classificados em duas categorias funcionais:
  - Portáteis (“personal/portable”), geralmente de baixa potência;
  - Fixos (“fixed/access”), geralmente de alta potência, operados de um local fixo, podendo ser usado para serviços comerciais tais como acesso internet de banda larga sem fio.

Dispositivos Fixos empregam acesso a banco de dados de geolocalização e sensoriamento de espectro para determinar a disponibilidade dos canais de TV.

Dispositivos Portáteis são divididos em 2 classes:

- Modo I, controlado por dispositivos que empregam acesso a banco de dados de geolocalização;
  - Mode II empregam acesso direto a banco de dados de geolocalização.
- Distância de separação: Para prevenir interferências em usuários primários, os dispositivos cognitivos (“TV Band Devices” – TVBD) devem manter uma certa distância dos limites do serviço de TV, conforme tabela 2.1.

**Tabela 2.1. Separação mínima entre TVBD e contorno limite de serviço de TV**

Altura da Antena (m)	Separação (Km)	
	co-canal	canal adjacente
menor que 3	6.0	0.1
3 a 10	8.0	0.1
10 a 30	14.4	0.74

- **Sensoriamento:** Os dispositivos devem ser capazes de detectar sinais de TV digital (ATSC), analógica (NTSC) e microfone sem fio. Os requisitos de limiares de detecção são mostrados na tabela 2.2, referenciados para uma antena de recepção omnidirecional com ganho de 0 dBi.

**Tabela 2.2. Limiares de sensoriamento**

Tipo de Sinal	Potência do Sinal
ATSC	-114dBm, média sobre 6 MHz de largura de banda
NTSC	-114dBm, média sobre 100 KHz de largura de banda
Microfone sem fio	-114dBm, média sobre 200 KHz de largura de banda

- **Requisitos de acesso ao banco de dados e geo-localização:** O acesso ao banco de dados e geo-localização deve ser suportado para os dispositivos Fixos e Portáteis Modo II. A precisão da geo-localização deve ser de +/- 50m.

O FCC certificará a base de dados oficial e designará um ou mais administradores. Dispositivos fixos devem acessar na inicialização e diariamente a base de dados. A operação deve terminar imediatamente se um canal em uso não estiver mais disponível. Um dispositivo fixo sem conexão direta à internet pode se comunicar com outro dispositivo fixo conectado. Se dispositivos do modo II forem realocados, esses devem consultar a base de dados imediatamente.

- **Requisitos de RF para dispositivos não licenciados fixos** são mostrados na tabela 2.3 e para dispositivos portáteis na tabela 2.4.

**Tabela 2.3. Parâmetros de RF para dispositivos fixos**

Potência de Transmissão	Máximo de 1 W 40 mW se houver canal adjacente
EIRP	Máximo de 4 W
Controle de potência de transmissão	Requerido
Largura de banda	Não limitada

**Tabela 2.4. Parâmetros de RF para dispositivos portáteis**

EIRP	Máximo de 100 mW com geo-localização e sensoriamento Máximo de 50mW somente com sensoriamento
Controle de potência de transmissão	Requerido
Largura de banda	Não limitada

Bandas permitidas do espectro de TV nos EUA: É permitido a todos os dispositivos operar nos canais de TV de 21 a 36 (512-608 MHz) e 38 a 51 (614-698 MHz).

O uso do canal 37 não é permitido para proteger os serviços de radioastronomia e telemetria médica. Os canais 2 (54-60 MHz) e 5 a 20 (76-88, 174-216 e 470-512 MHz) são permitidos somente para dispositivos fixos.

O FCC emitiu uma ordem [8], em 14/01/2010, proibindo a distribuição e comercialização de dispositivos que operem na faixa entre 698-806 MHz. Os dispositivos que já estavam fazendo uso dessa faixa tiveram que sair da mesma dentro de um prazo de 6 meses.

### 2.1.5.2

#### OFCOM

No Reino Unido, uma largura de 368 MHz na banda de UHF (470-862 MHz) é usado para TV analógica e 256 MHz é reservado para TV digital (“Digital Terrestrial TV” – DTT) depois da migração digital (“Digital Switch Over” – DSO). Devido a DSO e outras realocações, haverá 128 MHz adicional disponível nas diferentes regiões.

Em fevereiro de 2009, a OFCOM emitiu uma proposta para permitir o acesso cognitivo não licenciado ao espectro [8]. Para o uso do espectro, os dispositivos cognitivos devem garantir que os usuários licenciados estão protegidos de interferências na utilização do serviço.

OFCOM sugere 3 abordagens para o acesso cognitivo: sensoriamento, geo-localização e sinalizadores (“beacons”). Recentemente, OFCOM manifestou

que “beacons” são menos efetivos se comparados com as outras abordagens e, portanto, não será considerado neste momento.

OFCOM informou parâmetros para sensoriamento e geo-localização. Estes são derivados de uma mistura de teoria e medições. Os mesmos são mostrados nas tabelas 2.5 e 2.6.

**Tabela 2.5. Requisitos OFCOM para sensoriamento do espectro**

Parâmetro Cognitivo	Valor
Sensibilidade (antena 0 dBi)	-114 dBm em um canal de 28 MHz (TV digital) -126 dBm em um canal de 200 KHz (microfone sem fio)
Potência de Transmissão	13 dBm (canal adjacente) até 20 dBm
Controle de potência de transmissão	Requerido
Largura de banda	Não limitada
Desempenho fora de banda	menor que -44 dBm
Tempo entre sensoriamento	menor que 1 segundo
Transmissão contínua máxima	400 ms
Pausa mínima após transmissão	100 ms

**Tabela 2.6. Requisitos OFCOM para geo-localização**

Parâmetro Cognitivo	Valor
Precisão da localização	100 metros
Frequência de acesso ao banco de dados	A ser determinada
Potência de transmissão	Como especificado pelo banco de dados
Controle de potência de transmissão	Requerido
Largura de banda	Não limitada
Desempenho fora de banda	menor que -44 dBm
Transmissão contínua máxima	400 ms
Pausa mínima após transmissão	100 ms

### 2.1.5.3

#### CEPT

A CEPT (“European Conference of Postal and Telecommunications Administrations”) emitiu um relatório (CEPT “Report” 24), em junho de 2008, intitulado “A preliminary assessment of the feasibility of fitting new/future applications/services into non-harmonised spectrum of the digital dividend (namely the so-called “white spaces” between allotments)”, no qual foram identificados os “White Spaces” (WS) como parte do espectro disponível para aplicações de radio comunicação em um dado tempo e área geográfica. A

utilização dos WS será em regime de não interferência e sem proteção em relação aos serviços primários e outros serviços com alta prioridade.

CEPT definiu WS na banda de UHF como qualquer segmento do espectro de 8 MHz entre estações ativas em uma dada área e em um dado tempo.

CEPT ainda não concluiu o estudo da viabilidade dos esquemas de compartilhamento do espectro com a tecnologia de rádio cognitivo para os WS. Mais estudos são recomendados para estabelecer a estrutura regulatória necessária para uso dos dispositivos cognitivos nos WS.

Atualmente, o grupo CEPT SE43 está definindo os requisitos técnicos e operacionais para operação dos sistemas rádio cognitivo nos WS da banda de radiodifusão de UHF (470-790 MHz) de tal forma que os serviços primários sejam protegidos. Este grupo, também, está investigando a quantidade de espectro potencialmente disponível como WS.

## 2.2

### **Tecnologia Rádio Cognitivo**

O termo rádio cognitivo foi definido pela primeira vez por Joseph Mitola. [5] De acordo com Mitola, a tecnologia de rádio cognitivo é a interseção entre a tecnologia de dispositivos pessoais sem fio e a inteligência computacional. Mitola definiu rádio cognitivo como “um rádio inteligente que possui autoconhecimento, conhecimento do ambiente de RF e conhecimento do usuário, incluindo linguagem e visão da máquina através da qual obtém alta-fidelidade no conhecimento do ambiente rádio”. [6]

Em outras palavras, rádio cognitivo é um rádio dinamicamente reconfigurável que pode adaptar seus parâmetros operacionais de acordo com o ambiente. Essa tecnologia tem se tornado viável devido a recentes avanços tais como os rádios definidos por “softwares” (SDR) e antenas inteligentes.

Dispositivos com tecnologia rádio cognitivo permitem o acesso flexível e ágil do espectro radioelétrico que pode melhorar significativamente a eficiência na utilização do espectro. De fato, essa tecnologia é considerada chave para resolver o problema de escassez do espectro que está previsto ocorrer em breve devido à expansão dos dispositivos banda larga sem fio e seu alto tráfego.

Medições recentes demonstram que as bandas de espectro licenciadas são severamente subutilizadas. Isto se deve, principalmente, a regulação do espectro do tipo “comando e controle” que tem prevalecido pelas últimas décadas. Tal política regulatória licencia uma parte do espectro para uma

entidade que terá direito de uso exclusivo sobre ele para um tipo específico de serviço e dispositivo rádio para qual aquela banda foi alocada.

A tecnologia rádio cognitivo pode reduzir o problema da escassez do espectro radioelétrico, através do acesso dinâmico do espectro (DSA) que permitiria dispositivos/usuários não licenciados identificar porções subutilizadas do espectro licenciado e utilizá-las de maneira oportunística sem causar interferências nas comunicações dos usuários licenciados.

As porções não usadas do espectro são chamadas “White Spaces” que podem existir no domínio do tempo, frequência e espaço e, no contexto da alocação dinâmica do espectro, os usuários licenciados são chamados usuários primários e os usuários que usam rádio cognitivo são chamados usuários secundários. [31] [32] [33] [34]

## 2.2.1

### Rádio Definido por “Software”

Uma visão dos principais módulos de um rádio digital é mostrada no diagrama de blocos da Figura 2.2.

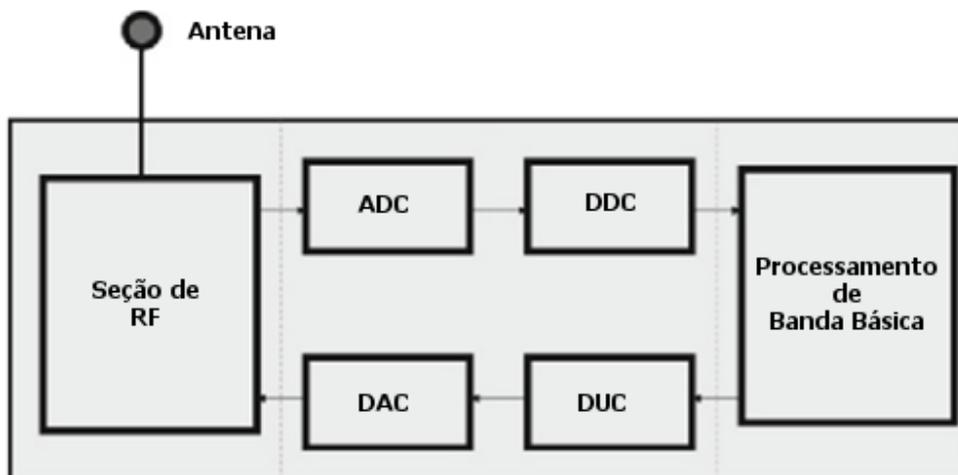


Figura 2.2. Diagrama em blocos de um rádio digital

- “Antena” recebe e transmite as informações codificadas em ondas de rádio.
- “Seção de RF” é responsável pela transmissão/recepção dos sinais de radio para/da “Antenna”, convertendo para uma frequência intermediária (IF).

- “ADC/DAC” (“Analog-Digital Conversion” e “Digital-Analog Conversion”) desenvolve as conversões analógico para digital e digital para analógico, respectivamente.
- “DDC/DUC” (“Digital Down-Conversion” e “Digital Up-Conversion”) desenvolve a demodulação e a modulação do sinal, respectivamente.
- “Processamento de Banda Básica” desenvolve operações como codificação/decodificação, equalização, correlação, entre vários outros, e implementa o protocolo de camada de enlace.

As operações das seções “DDC/DUC” e “Processamento de Banda Básica” requerem uma grande capacidade computacional e são implementadas em rádios digitais convencionas em um “hardware” dedicado utilizando circuitos integrados de aplicação específica (ASICs - Application-Specific Integrated Circuits).

Rádio Definido por “Software” (SDR – “Software Defined Radio”) se refere às tecnologias em que as funcionalidades de um rádio digital são desenvolvidas por módulos de “software”, rodando em “field programmable gate arrays” (FPGAs), “digital signal processors” (DSP), “general-purpose processors” (GPP) ou uma combinação destes. Assim as características do rádio (“waveform”) tais como modulação, codificação, frequências, potência, podem ser mudadas por “software”. [6]

Caso as conversões AD/DA pudessem ser incorporadas ao nível de radiofrequência do bloco “Seção de RF”, um SDR ideal poderia ser implementado, com isso todo o processamento de sinal poderia ser feito digitalmente e controlado por “software”. Um dos mais importantes desafios do SDR é levar a conversão AD/DA o mais próximo possível da antena, entretanto existem limitações técnicas da tecnologia atual que torna esse procedimento ainda inviável.

A digitalização de sinais de RF requer que o sinal seja amostrado a uma taxa, no mínimo, determinada pela frequência de Nyquist. Além disso, quanto mais alta a taxa de dados do sinal mais alta é a resolução requerida para capturar este sinal. Isto significa que altas frequências de RF e grandes larguras de banda exigem muito altas taxas de amostragem. Outro desafio é a necessidade de grande capacidade computacional que resulta em alto consumo de energia, reduzindo o tempo de uso das baterias.

A tecnologia SDR tem sido mais utilizada em estações rádio base e veículos, onde são menores as limitações de alta capacidade computacional e de consumo. Há uma demanda crescente para a entrada do SDR em dispositivos portáteis no futuro. De fato, o SDR possui habilidade de suportar múltiplos “waveforms” e poderia dar ao usuário uma grande quantidade de serviços. Uma vez que novas plataformas de processamento estão surgindo com capacidade de superar as limitações de consumo e tamanho, é possível que em pouco tempo a tecnologia do SDR chegue aos dispositivos portáteis. Muitos analistas de algumas indústrias prevêem que em 2015 inicie a transição entre as gerações atuais de “handsets” para SDR “handsets”.

## 2.2.2

### Técnicas de detecção de “white spaces”

As principais técnicas cognitivas para identificação do uso das bandas de frequências são:

- Sensoriamento
- Banco de dados e Geolocalização

#### 2.2.2.1

##### Sensoriamento

O sensoriamento é a técnica que permite a identificação de canais livres ou ocupados. A noção de canal livre pode estender, além da dimensão frequência, para a dimensão tempo e espaço. Assim, é possível avaliar canais como, por exemplo, “slots” de tempo dentro de um sistema como o GSM.

Algumas técnicas de sensoriamento são:

- Detector de energia
- Detector Ciclo-estacionário
- Filtro Casado
- Sensoriamento Cooperativo

O conceito de uma oportunidade de espectro é mais abrangente que o sensoriamento de “White Spaces” do espectro.

A oportunidade de espectro refere-se a um particular transmissor secundário e seu respectivo par receptor, ou seja, um canal é uma oportunidade

de espectro para um par de usuários secundários se eles podem se comunicar sem violação dos limites de interferência impostos pela rede primária e dentro da qualidade de serviço (“QoS”) desejada.

A existência de uma oportunidade de espectro é determinada por duas condições:

- A recepção do receptor secundário é viável e
- A transmissão do transmissor secundário está dentro dos limites de interferência

As oportunidades de espectro devem ser definidas em conjunto tanto na transmissão quanto na recepção, em função:

- (a) da potência de transmissão de ambos os nós primário e secundário,
- (b) das geo-localizações desses nós e
- (c) dos limites de interferência.

Atualmente, devido às limitações de “hardware” e ao consumo de energia, um usuário secundário não pode sensoriar todos os canais do espectro simultaneamente. Essa condição pode ser alterada em um futuro próximo, devido ao aumento do poder de processamento, conforme a lei de Moore que prevê que o poder de processamento dobra a cada vinte e quatro meses

Uma estratégia de sensoriamento é necessária para uma seleção inteligente dos canais para buscar as oportunidades de espectro. O propósito da estratégia de sensoriamento é:

- Achar canais vagos para acesso imediato e
- Obter informações estatísticas sobre a ocupação do espectro para melhorar a busca de oportunidades no futuro

Uma ótima estratégia de sensoriamento deve ser um compromisso entre esses dois objetivos conflitantes.

Assegurar a não interferência no receptor do usuário primário, apenas com o sensoriamento de um nó secundário, não é uma tarefa fácil, devido a possibilidade de nós primários ocultos, conforme Figura 2.4, múltiplas medidas distribuídas em uma área operacional são necessárias para medir com exatidão a interferência. Sensoriamento distribuído pode ser realizado através de sistemas centralizados ou colaborativos.

O sensoriamento realiza um teste de hipóteses binárias onde é decidido se o sinal primário está presente (hipótese H1) ou ausente (hipótese H0) em um

particular canal de observação. O canal está em livre na hipótese nulo ( $H_0$ ) e ocupado na hipótese complementar ( $H_1$ ): [6]

No cenário ausente, o sinal recebido é o ruído do ambiente de radio frequência, e no cenário ocupado o sinal recebido consiste do sinal do usuário primário somado ao ruído do ambiente, assim:

$$H_0: y(k) = w(k) \quad (2.1)$$

$$H_1: y(k) = s(k) + w(k) \quad (2.2)$$

Onde  $k$  é número das amostras recebidas, sendo para  $k=1\dots n$ ,  $w(k)$  é considerado o ruído ambiente e  $s(k)$  representa o sinal primário. É natural o conceito de que o sinal recebido terá mais energia quando o canal está ocupado. Este é o conceito atrás do detector de energia. Quando algumas características do sinal primário são conhecidas, elas podem ser usadas na detecção, como no caso do detector cicloestacionário. Quando o sinal primário é totalmente conhecido pode-se utilizar o detector filtro casado.

É evidente que a probabilidade dos quatro casos é fortemente dependente do limiar de decisão.

Independentemente do modelo ou detector utilizado, erros de sensoriamento são inevitáveis devido ao ruído aditivo, ao número limitado de amostras e a aleatoriedade dos sinais observados. Falsos Alarmes ocorrem se um canal livre é detectado como ocupado e Detecção Errada ocorre quando o canal ocupado é detectado como livre. Falsos alarmes representam a perda de uma oportunidade. Detecção errada pode gerar colisões desperdiçando a transmissão do usuário secundário e primário.

A proteção para o usuário primário está em ter um limite máximo para a probabilidade de detecção errada ( $P_{MD}$ ). Então, o problema é minimizar a probabilidade de falso alarme ( $P_{FA}$ ) sob a restrição do limite máximo para a probabilidade de detecção errada. É possível usar a formulação clássica do teste de hipóteses binárias de Neyman-Pearson.

$$P_{FA} = \text{Prob} \{ \text{Decide } H_1 | H_0 \} \quad (2.3)$$

$$P_{MD} = \text{Prob} \{ \text{Decide } H_0 | H_1 \} \quad (2.4)$$

Para ilustrar a importância dos limites dessas probabilidades de erro de detecção, na Tabela 2.7 estão listados os requisitos para o “draft” do padrão 802.22.

**Tabela 2.7. Requisitos de sensoriamento no padrão 802.22**

Parâmetro	TV Digital	Microfone sem Fio
Tempo de detecção do canal	≤ 2s	≤ 2s
Tempo de mudança de canal	2s	2s
Límiar de detecção (sensitividade requerida para)	-116 dBm (6 MHz)	-107 dBm (200 KHz)
Probabilidade de detecção	0.9	
Probabilidade de falso alarme	0.1	
Relação sinal-ruído	-21 dB	-12 dB

### 2.2.2.1.1

#### Detecção de Energia

Na maioria dos casos, o sinal primário não é conhecido e pode ter diferentes modulações e formatações do pulso de transmissão. Nesses casos, o sinal  $s(k)$  pode ser modelado como um processo estacionário gaussiano branco de média zero e variância  $\sigma_s$ , independente do ruído observado que também é modelado como Gaussiano branco. Nessa situação, o detector de energia é ótimo no uso de Neyman-Pearson.[12][6]

Considerando a formulação de  $H_1$  e  $H_0$  anterior e utilizando  $w(k)$  e  $s(k)$  como variáveis aleatórias gaussianas com média zero e variâncias  $\sigma_w^2$  e  $\sigma_s^2$ . Sendo o vetor com  $n$  amostras  $y = [y(1)...,y(n)]$ ,  $\sigma_0^2 = \sigma_w^2$  e  $\sigma_1^2 = \sigma_s^2 + \sigma_w^2$ . O detector Neyman-Pearson é um detector de razão de verossimilhança, representado pelo logaritmo da taxa de verossimilhança (LLR) dado por:

$$\text{LLR} = \log \left( \frac{p(\mathbf{y}|\mathcal{H}_1)}{p(\mathbf{y}|\mathcal{H}_0)} \right) \geq \tau', \quad (2.5)$$

Onde  $\tau'$  é um limiar escolhido adequadamente. Utilizando uma premissa idêntica e independente, o detector pode ser escrito em sua forma equivalente para decisão de  $H_1$  como:

$$z = \frac{1}{2n\sigma_0^2} \sum_{k=1}^n |y(k)|^2 > \tau. \quad (2.6)$$

Esta formulação representa o detector de energia. A estatística  $z$  é uma versão reduzida de uma variável aleatória padrão com  $2n$  graus de liberdade. Como  $z$  possui a mesma função distribuição de probabilidade (pdf) dessa variável aleatória, pode-se utilizar a função gama superior incompleta abaixo:

$$\Gamma_u(a, n) = \frac{1}{\Gamma(n)} \int_a^{\infty} x^{n-1} e^{-x} dx \quad (2.7)$$

E sendo as probabilidades  $P_{FA}$  e  $P_{MD}$  obtidas como:

$$P_{FA} = \Gamma_u(n\tau, n) \quad (2.8)$$

$$P_{MD} = 1 - \Gamma_u\left(\frac{n\tau}{1 + \text{snr}}, n\right) \quad (2.9)$$

O desempenho do detector de energia ( $P_{MD} \times P_{FA}$ ) é mostrado na Figura 2.3, considerando uma relação sinal-ruído (SNR) igual a -21 dB e três números de amostras ( $N$ ) diferentes. Percebe-se que o desempenho do detector aumenta monotonicamente com incremento de  $N$ .

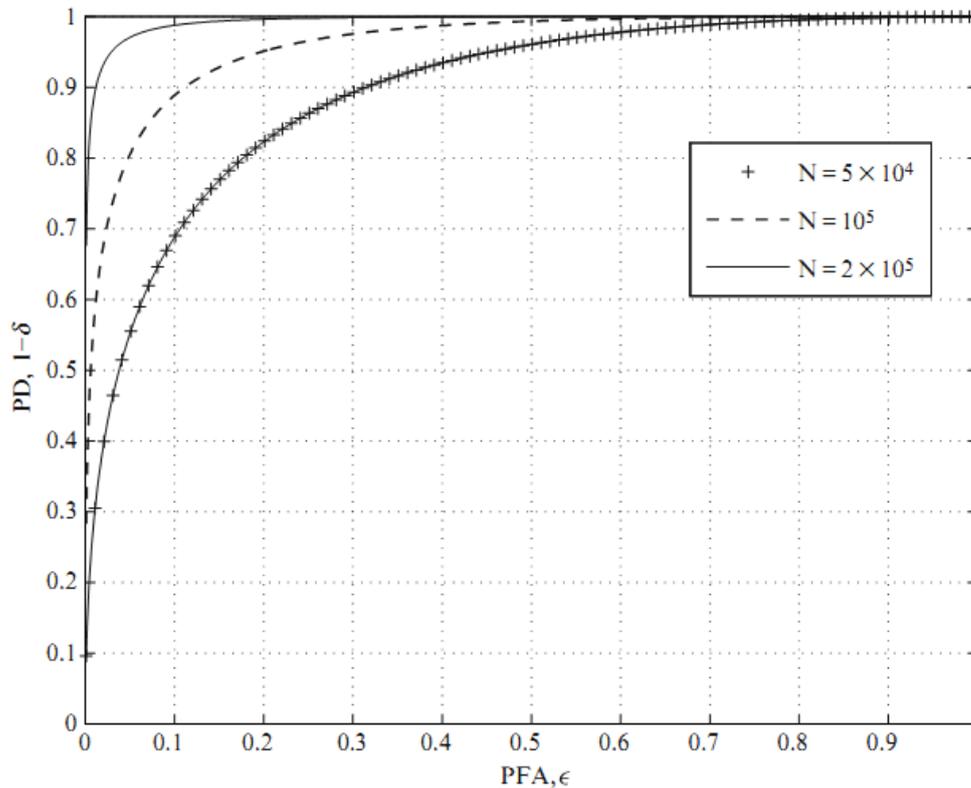


Figura 2.3. Desempenho do detector de energia

A vantagem do detector de energia é não necessitar de conhecimento do sinal a ser detectado, o que é conveniente quando vários sistemas compartilham a mesma banda. Uma desvantagem do detector é que para baixos valores de relação sinal-ruído (SNR) o número de amostras para encontrar um desempenho específico é proporcional a  $1/\text{SNR}^2$ .

### 2.2.2.1.2

#### Detecção cicloestacionária

Informações sobre a estrutura do sinal primário são, eventualmente, conhecidas. Sinais modulados digitalmente possuem características periódicas que podem ser implícitas ou explícitas. Portadoras senoidais, taxa de símbolos, códigos de espalhamento, prefixos cíclicos, etc. Em alguns padrões as redes possuem um sinal piloto que pode ser explorado pelo usuário secundário. As médias e correlações estatísticas de tais sinais exibem periodicidade e por isso são chamados de sinais cicloestacionários.

Sinais cicloestacionários exibem correlação entre componentes espectrais separadas devido à redundância espectral causada pela periodicidade [13]. O

ruído é um processo estacionário sem correlação, o detector cicloestacionário permite diferenciar o ruído de um sinal modulado através de um teste de presença da característica de cicloestacionariedade do sinal.

Um processo aleatório de média nula é cicloestacionário se apresentar uma autocorrelação ( $R_x$ ) com periodicidade da forma  $R_x(t, \tau) = E[x(t)x(\tau + t)] = R_x(t + T, \tau)$ , sendo  $T$  o período cíclico. Considerando que a autocorrelação  $R_x(t, \tau)$  é periódica em  $T$ , podemos expandi-la em uma série de Fourier como na equação 2.10, sendo conhecida como autocorrelação cíclica.

$$R_x(\alpha, \tau) = \frac{1}{T} \int_0^T R_x(t, \tau) e^{-2\pi j \alpha t} dt \quad (2.10)$$

Um sinal cicloestacionário com período  $T$  apresentará uma função  $R_x(\alpha, \tau)$  diferente de zero quando a frequência cíclica  $\alpha = 1/T$ . Para um sinal estacionário como o ruído, a função  $R_x(\alpha, \tau)$  será igual a zero para todo  $\alpha \neq 0$ .

O teste estatístico de um detector cicloestacionário pode ser facilmente desenvolvido no domínio da frequência através da transformada rápida de Fourier (FFT) onde a função  $R_x(\alpha, \tau)$  se tornaria: [6]

$$S(f; \tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y(n)y(n + \tau) e^{-j2\pi f n}. \quad (2.11)$$

Se escrevermos  $y(n) = \sum_1^k s_k(n) \exp(j2\pi f_k n) + w(n)$ , onde  $s_k(n)$  é um processo estacionário amplo de média zero e mutuamente independente, independente da sequência de ruído branco  $w(n)$ , então para valores grandes de  $N$  e  $R_k(\tau) = E\{s_k(t) s_k(t + \tau)\}$ , temos:

$$S(f; \tau) \approx \sum_k R_k(\tau) e^{j2\pi f_k \tau} \delta(f - 2f_k), \quad (2.12)$$

O detector cicloestacionário não requer conhecimento sobre o ruído ou a definição de um limiar, assim ele não sofre do problema de limitação devido a SNR como no caso do detector de energia. Entretanto, o desempenho se degrada na presença de "jitter", "wander" e não linearidades de RF. [35] [36]

Sua robustez ao ruído e características do teste de cicloestacionariedade determina um bom desempenho para detectar sinais espalhados na frequência como sinais DSSS e FHSS. Possui a desvantagem de um processamento mais complexo quando comparado ao detector de energia e assim não possui uma boa velocidade de sensoriamento. Uma vez que é necessário um conhecimento a priori do sinal (parâmetro cíclico) esse método de detecção não pode ser aplicado para sinais desconhecidos.

### 2.2.2.1.3

#### Detecção por filtro casado

Em alguns casos os sinais piloto e sequências de sincronização usadas na rede primária são conhecidos pelos usuários secundários. Por exemplo, o padrão 802.22 especifica essas sequências. Sendo  $s(n)$ ,  $n=1\dots N$ , uma conhecida sequência de piloto, assumindo uma perfeita sincronização, o sinal recebido pelo usuário secundário pode ser escrito como  $y(n) = hs(n) + w(n)$ , sendo  $w(n)$  o ruído aditivo branco gaussiano (AWGN) e  $h$  o ganho do canal desconhecido.

Para este ruído AWGN o detector ótimo é o filtro casado [12]. O teste estatístico é:

$$z = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y(n)s^*(n). \quad (2.13)$$

O desempenho do detector pode ser avaliado por:

$$Q^{-1}(P_{FA}) - Q^{-1}(P_D) = \sqrt{N \text{snr}}, \quad (2.14)$$

Onde a relação sinal ruído é definida como  $\text{snr} = |h|^2 \sum_{n=1}^N |s(n)|^2 / N$ .  $P_{FA}$  e  $P_D$  podem ser definidos na equação 2.15 para  $\varepsilon = N.A$ , onde  $A$  é energia da soma do símbolo de  $s(n)$  e  $\tau$  é o limiar.

$$P_{FA} = Q\left(\frac{\tau}{\sqrt{\sigma^2 \varepsilon}}\right) \quad \text{e} \quad P_D = Q\left(\frac{\tau - \varepsilon}{\sqrt{\sigma^2 \varepsilon}}\right) \quad (2.15)$$

Para baixas SNR, o detector por filtro casado, necessita de um número de amostras da ordem de  $1/\text{snr}$ , comparado com  $1/\text{snr}^2$  amostras requeridas pelo detector de energia, existindo uma vantagem significativa neste método de detecção. Entretanto, o desempenho é degradado na presença de “offset” de frequências ou tempo, bem como desvanecimento, quando o ganho  $|h|^2$  é aleatório, e “delay spread”.

Uma das desvantagens do detector por filtro casado é a necessidade de um receptor dedicado para cada sinal que deve ser detectado. Conseqüentemente, o filtro casado raramente é usado no caso de detecção de múltiplas formas de onda.

#### 2.2.2.1.4

### Sensoriamento cooperativo

Problemas gerados por desvanecimento multipercurso, sombreamento e nó escondido (“hidden node”) podem comprometer o desempenho do sensoriamento. Tais problemas são comuns no ambiente rádio e podem ser responsáveis por erros de detecção, causando interferências entre usuários secundários e primários.

Um exemplo de interferência devido ao nó escondido é mostrado na Figura 2.4, onde um usuário secundário que realiza o sensoriamento não é capaz de detectar o transmissor primário por estar fora da área de cobertura do mesmo. Tomando a frequência desse transmissor primário como um “White Space” o transmissor secundário começa a transmitir nessa frequência e interfere em um receptor primário localizado próximo a borda da área de cobertura.

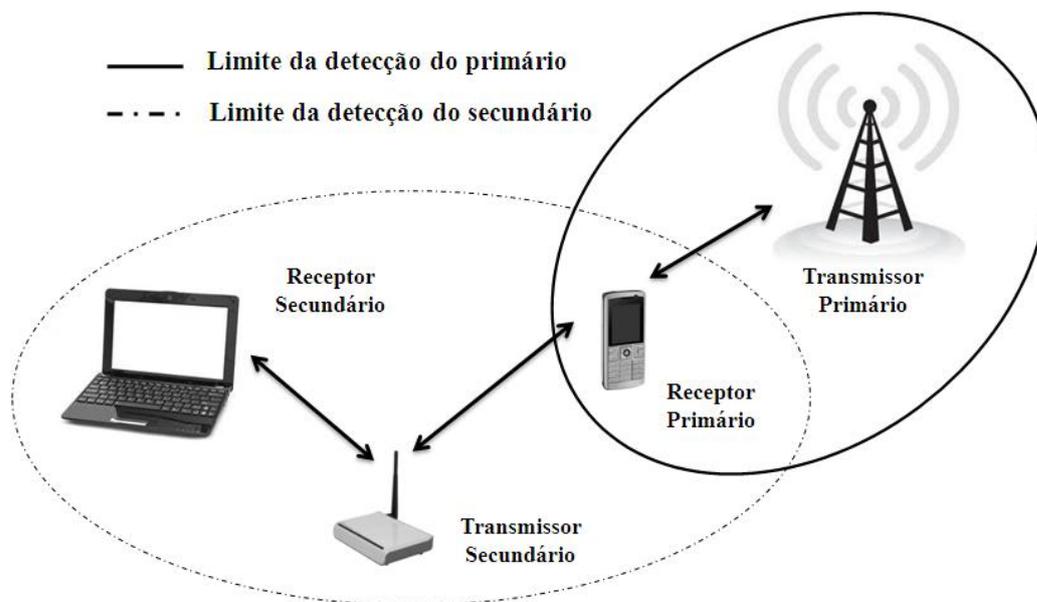


Figura 2.4. Interferência devido ao nó escondido

Caso usuários secundários possam compartilhar entre si os resultados dos seus próprios sensoriamentos, a decisão combinada derivada das observações coletadas espacialmente pode superar a deficiência das observações individuais de cada rádio cognitivo. Assim, o desempenho da detecção pode ser significativamente melhorado.

O sensoriamento cooperativo é uma abordagem efetiva no combate ao desvanecimento multipercurso, sombreamento e no problema de “hidden node”. [14] O sensoriamento cooperativo melhora o desempenho do sensoriamento

através da diversidade espacial das detecções realizados pelos usuários cognitivos da rede. Eles compartilham suas informações de sensoriamento, de modo a implementar uma decisão combinada mais precisa do que as decisões individuais.

A melhoria do desempenho devido à diversidade espacial é chamada de ganho cooperativo. Devido ao desvanecimento multipercurso e somreamento, a SNR do sinal recebido pode ser muito baixa e a detecção torna-se difícil. Utilizando-se, apenas, um sensoriamento individual, um requerimento de sensibilidade rigorosa deverá ser imposto ao receptor, aumentando a complexidade e o custo de implementação. [15].

Os requisitos de sensibilidade e as limitações de “hardware” podem ser consideravelmente aliviadas pelo sensoriamento cooperativo [16]. O desempenho de detecção do sensoriamento cooperativo, com incerteza de ruído, melhora significativamente com o aumento do número de usuários cooperativo.

O ganho cooperativo não está limitado à melhora do desempenho de detecção e ao requerimento relaxado de sensibilidade. Caso o período de sensoriamento possa ser menor devido à cooperação, os rádios cognitivos terão mais tempo para transmissão de dados, melhorando assim a vazão (“throughput”) do sistema. Neste caso o aumento da vazão também é parte do ganho de cooperação. Um mecanismo de sensoriamento cooperativo bem planejado pode contribuir significativamente para uma variedade de ganhos cooperativos.

O ganho cooperativo estará limitado por alguns fatores como no caso de rádios cognitivos que sofrem somreamento pelo mesmo obstáculo, dessa forma, suas detecções são correlatadas. Quanto mais espacialmente correlatados estiverem os rádios cognitivos que fazem parte de um sensoriamento cooperativo, pior será o desempenho da detecção [17]. Nesse caso, uma solução poderia ser a seleção do usuário que participará do sensoriamento cooperativo.

Um cabeçalho (“overhead”) considerável pode ser requerido para transmitir todas as informações de sensoriamento cooperativo. Dessa forma, há interesse em desenvolver a detecção localmente e enviar apenas as variáveis de decisão binárias para um centro de difusão que seria o responsável por tratá-las e enviá-las aos demais.

A topologia do sensoriamento cooperativo pode ser desenvolvida de forma centralizada, distribuída ou retransmissão assistida (“relay-assisted”). [18] [19] [20] [21]

No sensoriamento cooperativo centralizado uma central identificada como centro de difusão (“fusion Center” - FC) controla o processo de cooperação. Primeiramente, o FC seleciona o canal ou largura de banda de interesse para o sensoriamento e instrui todos os rádios cognitivos cooperativos a individualmente fazer o sensoriamento local. Em segundo lugar, todos os rádios cognitivos cooperativos reportam seus resultados dos sensoriamentos via um canal de controle. Então o FC combina as informações recebidas de sensoriamento local, e determina a presença ou não de usuários primários, difundindo a decisão para os rádios cognitivos cooperativos.

Na cooperação distribuída, o FC não é usado para fazer uma decisão cooperativa. Depois de fazer os sensoriamentos locais, os rádios cognitivos compartilham as informações de sensoriamento com outros usuários dentro das suas regiões de cobertura. Baseado em um algoritmo distribuído cada rádio cognitivo envia seu próprio dados de sensoriamento, combinam seus dados de sensoriamento com dados recebidos e decide se um usuário primário está presente ou não usando um critério local. Se o critério não é satisfeito, os rádios cognitivos enviam seus resultados combinados para outros usuários novamente e repete-se este processo até o algoritmo convergir e a decisão ser alcançada.

A cooperação “relay-assisted” é aplicada devido às imperfeições dos canais de sensoriamento e controle, assim, um rádio cognitivo observando um canal de sensoriamento fraco e um canal de controle forte, pode complementar e cooperar com outro para melhorar o desempenho do sensoriamento, ou seja, rádios cognitivos podem servir como retransmissores (“relays”) de outros rádios cujo canal de controle não possui condições de alcançar o FC (modelo centralizado) ou outros rádios cognitivos (modelo distribuído).

### 2.2.2.2

#### Banco de Dados e Geolocalização

Uma alternativa ao sensoriamento de um dispositivo cognitivo seria:

- Conhecer sua localização e
- Ter acesso a uma base de dados de frequências de uso permitido naquela localização

Bancos de dados com geolocalização podem reduzir o “overhead” do sistema associado ao sensoriamento do espectro. Caso um canal esteja ocupado em uma dada área, por exemplo, por uma estação de TV, e esta informação esteja acessível através do banco de dados, o gerenciador de espectro do rádio cognitivo pode decidir reduzir a faixa de frequência que será sensoriada. [6]

A eficiência dos bancos de dados é reduzida para sistemas primários dinâmicos, por isso, para faixas de TV, o banco de dados é a principal ferramenta de cognição do espectro.

Uma das questões que envolvem os bancos de dados georeferenciados está ligada ao seu custo de manutenção. O custo de manutenção de um banco de dados de um grande número de dispositivos de baixa potência pode ser proibitivo.

Apesar da existência de banco de dados mantidos pelos reguladores, muitos requisitos de acessibilidade, protocolos, atualização de dados e informações inexistentes fazem com que esses bancos não estejam prontos para servir, em tempo real, acessos de sistemas rádio cognitivos. Provedores de serviços ou operadores da rede primária podem ser uma opção para a manutenção desses bancos de dados.

O acesso a banco de dados georeferenciados é implementado por protocolos de camadas superiores, sendo muitas vezes colocados fora do escopo dos padrões, como é o exemplo do padrão WRAN IEEE 802.22.

Uma vantagem interessante dos bancos de dados para as agências reguladoras seria controlar os dispositivos que trabalham nas faixas de frequências. Por exemplo, para uma agência reguladora que queira remover todos os dispositivos de uma banda em uma determinada região, basta alterar todas as frequências daquela banda no banco de dados para “Ocupado”.

### 2.2.3

#### Técnicas de alocação e gerenciamento de canais secundários

Um sistema rádio cognitivo (CRS) poderia acessar uma rede através de:  
[10]

- **Acesso a uma Rede de Rádios Cognitivos:**

O usuário CRS pode acessar uma estação base (BS) da própria rede de rádios cognitivos.

- **Acesso a uma Rede “Ad-hoc”:**

O usuário CRS pode se comunicar com outros usuário CRS através de uma conexão “ad-hoc”.

- **Acesso a uma Rede Primária:**

O usuário CRS pode acessar uma estação base (BS) de uma operadora em uma banda licenciada, neste caso o usuário CRS será capaz de fazer “roaming” sobre múltiplas redes primárias com diferentes tecnologias de acesso rádio (RAT).

#### 2.2.3.1

##### Acesso a uma Rede de Rádios Cognitivos

O melhor exemplo do primeiro caso é o padrão WRAN IEEE 802.22, desenvolvido para melhor eficiência na alocação e gerenciamento de canais secundários. Esse padrão e as características dos aspectos mencionados são tratados no item 2.3.1.

#### 2.2.3.2

##### Acesso a uma Rede “Ad-hoc”

A dinâmica do espectro e a natureza distribuída das operações requeridas para uma rede “ad-hoc” de rádios cognitivos criam a necessidade do desenvolvimento de novos algoritmos de roteamento e de alocação de recursos que levem em conta o conhecimento do espectro.

Considerando que a ocupação do espectro é dependente da localização, a disponibilidade de espectro para um circuito com múltiplos enlaces rádio poderá

ser diferente para cada um dos nós repetidores. Assim sendo, para se conseguir uma comunicação confiável fim-a-fim é de fundamental importância controlar as relações entre roteamento e as funcionalidades de gerenciamento do espectro e endereçamento. [23]

Ferramentas e testes de campo (“testbeds”) estão em desenvolvimento para suportar habilidades de sensoriamento no bloco de “RF Front End” para espectros de banda larga, incorporação de processamento reconfigurável através de programação FPGA, protótipos que usem ferramentas gráficas e considerações de escalabilidade e criticidade no projeto dos dispositivos, entre outros importantes aspectos.

Toda essa avaliação experimental é complexa, sem dúvida, especialmente para cenários de redes de rádios cognitivos “ad-hoc” altamente dinâmicos. Há uma necessidade que “testbeds” bem sucedidos demonstrem, convincentemente, novas idéias nesta nascente área de pesquisa. [23]

### **2.2.3.3**

#### **Acesso a uma Rede Primária**

Analisando o 3º caso, podemos concluir que o operador da rede primária exigiria algum incentivo para permitir a utilização do seu espectro licenciado. Para um eficiente compartilhamento dinâmico de espectro (DSA), um modelo econômico será requerido para que operadores e usuários primários tenham incentivos para o compartilhamento e usuários secundários tenham satisfação na utilização do espectro.

Podemos identificar 3 partes envolvidas: operadores, usuários primários e usuários secundários. Operadores como proprietários do espectro e usuários primários e secundários como usuários do espectro, sendo a prioridade do usuário primário maior que a do usuário secundário, dependendo da política do operador.

Agências Reguladoras representariam o interesse público na maximização da utilização do espectro e minimização do custo do usuário. Os reguladores seriam a 4ª parte envolvida e seu interesse na precificação seria de igual importância dos demais envolvidos.

Precificação e alocação de recursos estão estreitamente relacionadas, uma vez que um operador quer maximizar seu retorno financeiro, enquanto um usuário quer maximizar sua satisfação em termos de qualidade de serviço (QoS), ou seja, recursos, além do preço.

Existem diferentes funções de utilidade para cada uma das 3 partes envolvidas. Quando houver bandas de espectro não alocadas, os operadores podem alocar e vender as bandas para usuários secundários em um modelo oportunístico. Usuários primários e secundários querem obter o melhor serviço, ou seja, mais banda e melhor qualidade de canal, além de pagar menos. Usuários primários podem receber incentivos como redução de custos pela redução de seu QoS devido à entrada de usuários secundários.

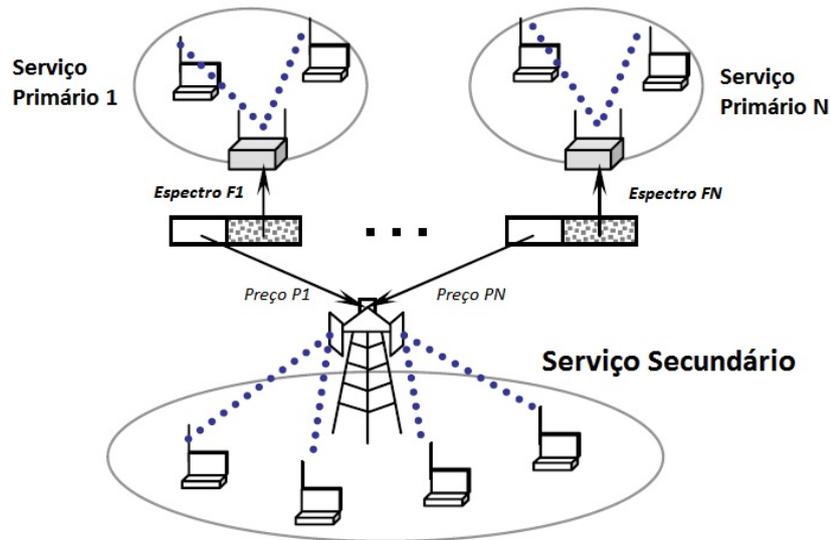
Como as partes possuem sua própria função de utilidade, elas podem competir e/ou cooperar umas com as outras para ganhar mais. Por exemplo, quando um usuário secundário quiser obter um melhor QoS, ele pode, conseqüentemente, reduzir o QoS de um usuário primário, para um dado espectro fixo.

Podemos definir, de forma simplificada, as funções utilidade de cada parte como seguem:

- $Utilidade(\text{operador}) = Receita(\text{primário}) + Receita(\text{secundário}) - \text{Custo}(\text{licença, infra, etc})$
- $Utilidade(\text{primário}) = \text{Valor}(\text{banda do espectro, QoS}) - \text{Custo}(\text{pagamento})$
- $Utilidade(\text{secundário}) = \text{Valor}(\text{banda do espectro, QoS}) - \text{Custo}(\text{pagamento})$

Um esquema de precificação do espectro em uma rede de rádios cognitivos, onde múltiplos provedores de serviços (operadores) competem para oferecer acesso para usuários secundários, pode ser formulado como um mercado oligopolista, consistindo de poucas firmas (operadores) que oferecem serviços para consumidores (usuários secundários). Para tal cenário, pode-se utilizar um modelo da teoria de jogos, como o modelo de jogos de Bertrand, conforme descrito em [22].

O modelo de jogos de Bertrand para competição pode ser aplicado para analisar o esquema de preço e obter o equilíbrio em um sistema rádio cognitivo, consistindo de múltiplos serviços primários que compartilham seu espectro para um serviço secundário, conforme mostrado na Figura 2.5. Um estudo mais aprofundado sobre precificação está fora do escopo do presente trabalho.



**Figura 2.5. Múltiplos serviços primários que compartilham espectro com um serviço secundário**

## 2.3

### Padrões internacionais

Para que redes de rádio cognitivo se tornem realidade, é fundamental o desenvolvimento de vários aspectos. Entretanto, dois aspectos são fundamentais para o sucesso dessa tecnologia e estão intimamente ligados. São eles: Regulação e Padrões.

A regulação do uso do espectro deve ser mudada, novas regras e diretrizes são necessárias e determinantes para a aplicação da tecnologia de rádio cognitivo, tendo em vista que a política regulatória atual não prevê a ocupação oportunística do espectro, bem como os novos parâmetros resultantes dessa forma de uso secundário do espectro.

Padrões internacionais, como o padrão IEEE 802.22 [24], que coordenem as aplicações e o acesso dinâmico do espectro são fundamentais para expansão da tecnologia, sobretudo na redução de custos e na segurança de que o padrão pode ser utilizado sem causar interferências que prejudiquem as comunicações das aplicações existentes.

### 2.3.1

#### IEEE 802.22

O primeiro padrão internacional baseado na tecnologia de radio cognitivo é o IEEE 802.22, também conhecido como “Wireless Regional Area Networks” (WRAN), idealizado para prover acesso em banda larga sem fio em áreas rurais, utilizando canais de TV não utilizados (TVWS – “TV White Spaces”). [7] [26]

Em 2004, a agência reguladora de telecomunicações dos Estados Unidos, Federal Communication Commission (FCC), sinalizou para a utilização de acessos de banda larga sem fio fixo nos canais de TV não utilizados nas bandas de VHF e UHF.

O padrão 802.22 WRAN especifica as funcionalidades das camadas físicas (PHY) e de controle de acesso ao meio (MAC) em uma infra-estrutura de rede de acesso banda larga sem fio, onde uma estação base (BS) controla a comunicação com um equipamento de propriedade do usuário (CPE- “consumer premises equipment”). A principal funcionalidade cognitiva neste padrão está no gerenciamento dinâmico do canal. De fato, a política de gerenciamento do canal é uma das funções chaves de qualquer sistema radio cognitivo.

Em redes convencionais como “Ad-hoc” e WLAN, o gerenciamento do canal trata de 2 pontos importantes: 1) utilização de recursos e 2) provimento da qualidade de serviço (QoS), mas em uma rede de rádio cognitivo, o gerenciamento do canal adiciona a proteção aos usuários primários, ou seja, a monitoração dos usuários primários é um parâmetro chave no gerenciamento do canal.

O gerenciamento do canal nos sistemas 802.22 coleta informações sobre os canais disponíveis, avaliando o estado da ocupação que pode ser obtido de um banco de dados geolocalizado e/ou de um sensoriamento de espectro. Os canais disponíveis são classificados em diferentes classes. Essa classificação é utilizada tanto para o gerenciamento quanto para o sensoriamento do canal, através da priorização dos canais baseado no seu estado. [24]

A menor porção do espectro de frequência no sistema 802.22 é um canal de TV, cuja largura de banda é de 6, 7 ou 8 MHz de acordo com o país de operação. Canais de TV consecutivos podem ser combinados para obter uma largura de banda maior.

O padrão 802.22 provê acesso banda larga sem fio para uma área rural, tipicamente com 17 a 30 km de raio de uma BS, até um máximo de 100 km de raio, e serve até 255 unidades fixas CPE. Opera em modo “half-duplex” entre

CPE e BS usando múltiplo acesso por divisão no tempo (TDMA - “time division multiple acces”). A vazão (“throughput”) desejada entre BS e CPE é de 1.5 Mb/s no “downstream” e 384 Kb/s no “upstream”.

Além da informação de ocupação de um TVWS por um usuário primário, o sistema 802.22 deverá saber que tipo de usuário primário está ocupando o canal, pois os requisitos de proteção podem ser diferentes de acordo com o usuário.

A localização geográfica da BS e CPE deve ser conhecida para determinar os canais possíveis em uma dada localidade. Assim sendo, todo dispositivo de um sistema 802.22 tem que ser capaz de achar sua localização por alguma técnica, tal como a “Global Positioning System” (GPS).

O banco de dados é mantido pelo órgão regulatório que guarda as licenças de operação de TV em uma dada área geográfica. Esse banco de dados poderá ser acessado por qualquer dispositivo rádio cognitivo sem custo operacional e proverá a lista de canais de TV disponíveis na localidade, incluindo a máxima potência radiada (EIRP “effective isotropic radiated power”) que o CPE poderá transmitir sem causar interferências danosas ao usuário primário.

BS e CPE são capazes de sensoriamento do espectro de forma independente. O sensoriamento do espectro deve ser realizado em todos os canais de TV, incluindo o canal em operação do sistema 802.11. O sensoriamento do canal em operação é realizado usando períodos de silêncio.

A função de sensoriamento do espectro (SSF) tem seu próprio rádio e pode sintonizar qualquer canal de TV em VHF ou UHF e detectar a presença de usuários primários. O resultado do sensoriamento dos CPEs é enviado para o gerenciador do espectro (“Spectrum Manager” - SM) na BS quando o CPE detecta um usuário primário no canal.

Não há uma técnica de sensoriamento de espectro específica definida pelo padrão. Qualquer técnica de sensoriamento do espectro que atenda as especificações do padrão pode ser usada.

A principal função do SM é tomar decisões de gerenciamento do canal, isto é feito em 2 passos:

(1) o SM recebe as disponibilidades dos canais de um banco de dados externo e considera as atividades dos usuários primários e os requisitos regulatórios.

(2) o SM classifica os canais de TV como disponível ou indisponível baseado nos resultados do sensoriamento do espectro. Caso não exista

um banco de dados de usuários primários, todos os canais serão considerados como disponíveis.

Os canais disponíveis são classificados como:

- Protegido (“Protected”): canais em que foi detectado atividade de usuários primários ou outro sistema 802.22
- Não Classificado (“Unclassified”): canais ainda não sensoriados, na inicialização ou devido a atraso no sensoriamento.
- Não Permitido (“Disallowed”): canais proibidos devido a questões operacionais ou regulatórias.
- Operacional (“Operating”): o canal em operação para comunicação entre BS e CPE na célula 802.22.
- Reserva (“Backup”): canais que podem se tornar o canal Operacional, caso seja necessário trocar de canal.
- Candidato (“Candidate”): canais que são candidatos a se tornar um canal Reserva.

O SM define o estado dos canais combinando as informações do banco de dados de usuários primários e os resultados do sensoriamento de espectro. O algoritmo de classificação de canal da Figura 2.5 é geral e pode ser usado em qualquer regime regulatório.

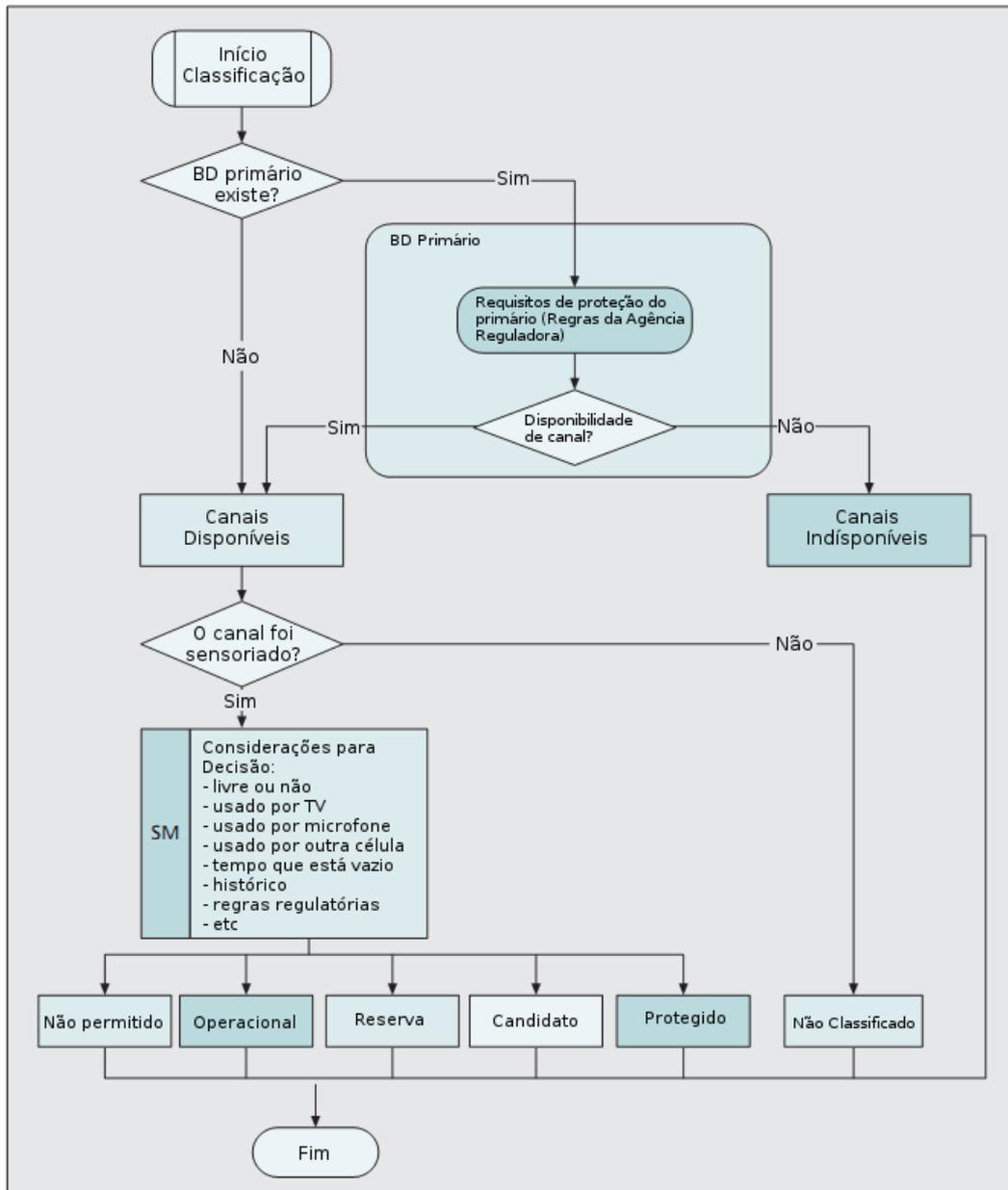


Figura 2.6. Algoritmo de classificação de canal do padrão 802.22

O padrão 802.22 não especifica prioridades ou critérios para a classificação dos canais, porém, existem vários fatores que poderiam ser utilizados, incluindo requisitos de tráfego, localização e coexistência com outros sistemas vizinhos 802.22.

O principal objetivo da classificação é facilitar o gerenciamento do sensoriamento do canal. O tempo requerido para repetir o sensoriamento do canal é diferente para cada classe. Por exemplo:

- Operacional; a cada 2 segundos
- Reserva: máximo de 6 segundos

- Candidato: mínimo de 6 e máximo de 30 segundos
- Protegido: mínimo de 6 e máximo de 30 segundos

Dependendo da atividade do usuário primário e da qualidade do canal, são possíveis 9 transições entre os estados conforme mostra a figura 2.7.

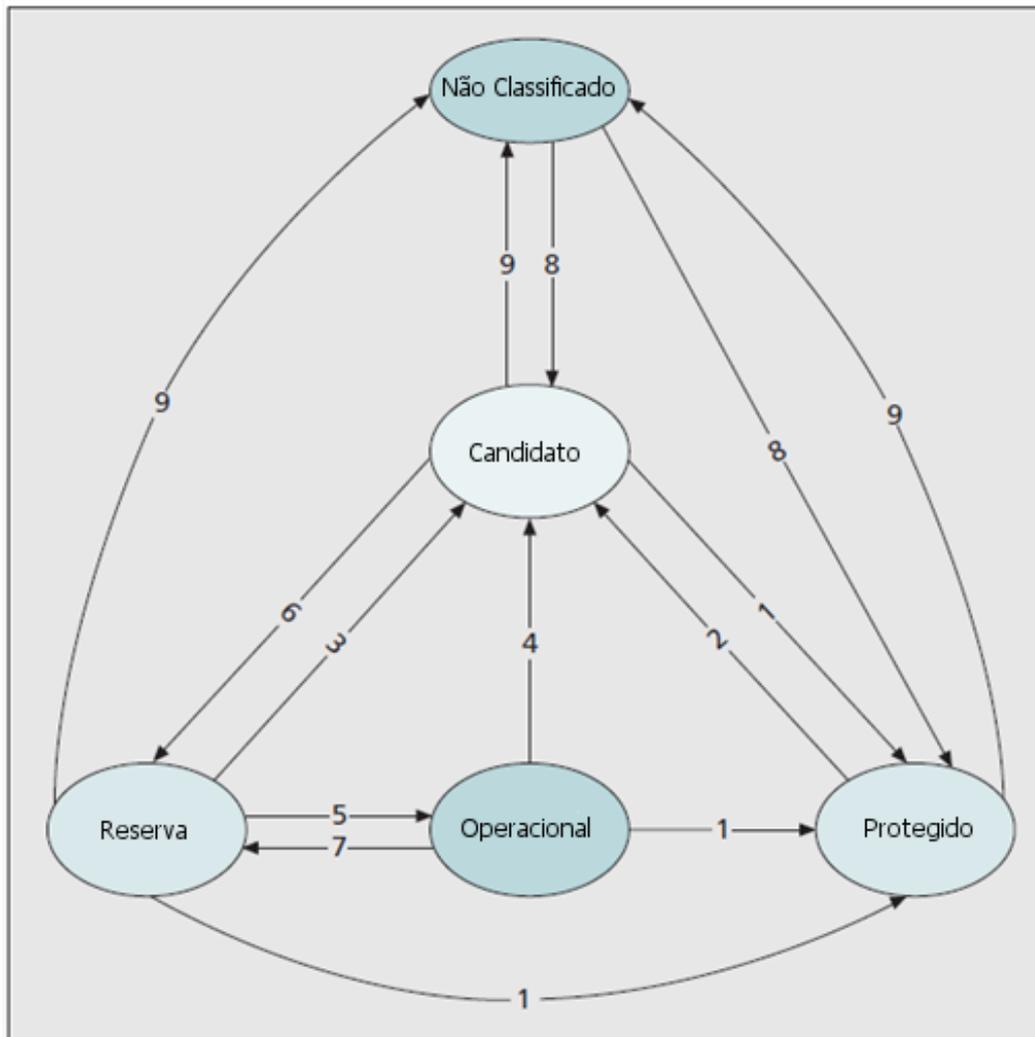


Figura 2.7. Diagrama de transição de estados do canal do padrão 802.22

- 1) Quando um usuário primário entrar em um canal Operacional, Reserva ou Candidato, este se torna um canal Protegido.
- 2) Quando um usuário primário sai de um canal Protegido, este se torna um canal Candidato.
- 3) Quando um canal Reserva é o pior da lista de Reserva, ele pode se tornar um canal Candidato, se o mesmo tiver qualidade pior que um novo

membro da lista de Reserva ou se um usuário primário aparecer no canal nos últimos 30 segundos.

- 4) Quando o sistema 802.22 termina a operação em um canal Operacional, ele pode se tornar Candidato se tiver qualidade pior que os membros da lista de Reserva.
- 5) Quando há uma nova alocação do sistema 802.22, um canal Reserva se torna um canal Operacional.
- 6) Quando um canal Candidato é melhor que um membro da lista de Reserva e um usuário primário não apareceu no canal nos últimos 30 segundos, ele se torna um canal Reserva.
- 7) Quando o sistema 802.22 termina a operação em um canal Operacional, ele pode se tornar Reserva se tiver qualidade similar aos membros da lista de Reserva.
- 8) Quando um canal Não Classificado é sensoriado, ele é reclassificado como Protegido ou Candidato dependendo do resultado do sensoriamento. Obs.: Somente após o sensoriamento de todos os CPEs é que a BS muda a classificação do canal para Candidato.
- 9) Quando um canal não é sensoriado durante um tempo pré-definido, este canal se torna Não Classificado.

BS e CPE em uma célula 802.22 mantêm a mesma lista de Reserva, atualizando-a no intervalo de duração do quadro de 10ms, usando mensagens explícitas.

Assim, se um usuário primário iniciar operação no canal Operacional, causando interferência destrutiva e impossibilitando a comunicação entre BS e CPEs, o protocolo MAC dos dispositivos, aguardará um tempo pré-definido de “timeout” sem recebimento de mensagem explícita de mudança de canal (CHS-REQ/RES) e fará uma comutação implícita do canal para o primeiro canal Reserva da última lista atualizada.

A sincronização da lista de Reserva e a comutação implícita do canal são requisitos básicos para a proteção dos usuários primários do sistema radio cognitivo.

Para a coexistência de sistemas 802.22, os mesmos devem trocar suas informações de lista de canais disponíveis na BS. Para isso, existem 2 modos de gerenciamento do canal:

- modo “Embedded”, uma mensagem “downstream channel descriptor” (DCD) com as informações das listas de canais Operacional, Reserva e Candidato é enviada em todos os quadros do CPE.
- modo “Explicit”, neste modo a BS gerencia, dinamicamente, a operação dos canais usando as mensagens de gerenciamento MAC como:
  - “channel terminate request response” (CHT-REQ/RSP),
  - “channel switch request/response” (CHS-REQ/RSP),
  - “channel quiet request/response” (CHQ-REQ/RSP),
  - “channel occupancy update” (CHO-UPD)

A camada MAC também suporta a troca de informações dos canais entre as BS 802.22, usando o protocolo “Coexistence Beacon Protocol” (CBP).

A duração do intervalo das atualizações das listas de canais é diferente tanto para as listas (Operacional, Reserva,...) como para BS e CPE. Por exemplo, no lado do CPE a lista Operacional é atualizada a cada recepção do “superframe control header” (SCH), as listas Reserva e Candidato são atualizadas na recepção da mensagem DCD e a lista Protegido é atualizada pela mensagem CHO-UPD. A Tabela 2.8 mostra algumas durações e mensagens. [27]

**Tabela 2.8. Durações e mensagens do padrão 802.22**

Mensagem	Informação trocada no canal	Duração da Atualização
SCH	Canal operacional	Todo super-frame (160 ms)
DCD	Canal operacional número de canais backup/candidato lista dos canais backup/candidato	Todo frame (10 ms)
CHO-UPD	Canais protegidos	Agendado
CBP	Número de canais backup lista de canais backup para células de origem e adjacentes	Agendado

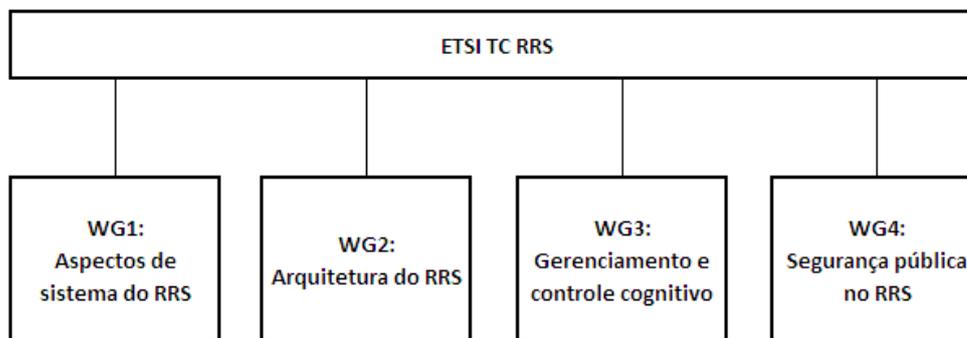
### 2.3.2

#### ETSI

Os princípios do rádio cognitivo no ETSI TC RRS (“Technical Committee Reconfigurable Radio Systems”) estão concentrados em dois aspectos [28] [30]:

- Canal Piloto Cognitivo (“Cognitive Pilot Channel” -CPC)
- Arquitetura Funcional para Gerenciamento e Controle do RRS

Foram definidos quatro grupos de trabalho (WG - “Working Groups”) conforme Figura 2.8.



**Figura 2.8. Grupos de trabalho (WG) do ETSI TC RRS**

- WG1 foca nos aspectos do sistema para garantir coerência entre os diferentes grupos WGs e evitar sobreposição e buracos nas atividades relacionadas.
- WG2 foca na tecnologia SDR em especial na arquitetura do equipamento rádio, buscando uma arquitetura de referência.
- WG3 concentra-se no gerenciamento e controle cognitivo, desenvolvendo uma arquitetura funcional para o gerenciamento e controle dos sistemas rádio reconfiguráveis, bem como na adoção do “Cognitive Pilot Chanel” (CPC) como suporte ao gerenciamento do RRS.
- WG4 concentra-se na segurança pública, definindo aspectos do sistema para o RRS na segurança pública e defesa.

ETSI RRS assume um papel fundamental na estrutura regulatória da Europa com foco, entre outros, nos seguintes aspectos:

- O regime adotado na Europa é baseado em “Declaração de Conformidade” e não inclui aprovação ou registro de equipamento. Esta auto-declaração é escolhida como referência para a harmonização do padrão a ser desenvolvido pelo ETSI RRS.
- A proteção das bandas de TV na Europa com o padrão “Digital Video Broadcast – Television” (DVB-T) se diferencia por não apresentar uma portadora residual como no caso do “Advanced Television System Committee” (ATSC) americano que permite a detecção do sinal abaixo do nível de ruído, isto é até -114 dBm. Uma adaptação, para padrões baseados em sensoreamento, é necessária no caso europeu.
- Licenciamento de estações de radiodifusão e microfones “wireless” são gerenciados a nível de país. Qualquer esquema de compartilhamento baseado em banco de dados irá requerer algum nível de integração dos dados de cada nação.

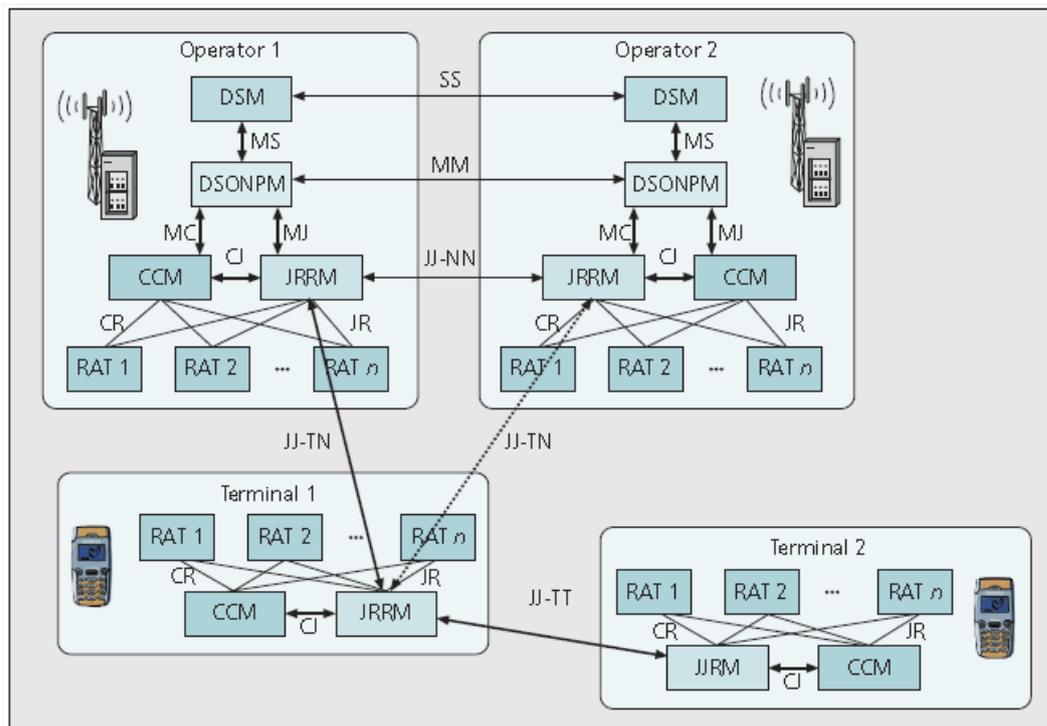
De forma a tratar esses e outros aspectos regulatórios o “Electronic Communications Committee” (ECC) junto ao “European Conference of Postal and Telecommunications Administrations” (CEPT) criaram o grupo de trabalho SE43 sobre “Technical and Operational Requirements for the Operation of Cognitive Radio Systems in the White Spaces” na banda de frequências de 470-790 MHz. ETSI RRS é o centro competente para implementar esses requisitos regulatórios.

### **2.3.2.1**

#### **Arquitetura Funcional para Gerenciamento e Controle**

O ETSI WG3 conduz estudos sobre a arquitetura funcional (“Functional Architecture” – FA) para o gerenciamento do RRS. Esse grupo, também, conduz estudos sobre o “Cognitive Pilot Channel” (CPC) que foi proposto para facilitar a colaboração entre redes e terminais em ambientes rádio heterogêneos.

A arquitetura funcional (FA) para gerenciamento e controle é mostrada na Figura 2.9.



**Figura 2.9. Arquitetura Funcional proposta pelo ETSI TC RRS WG3**

O “Dynamic Spectrum Management” (DSM) é responsável pelo gerenciamento técnico e econômico do espectro, incorporando funcionalidades como prover informações de licenciamento do espectro, avaliação da ocupação do espectro e decisão sobre compartilhamento e aluguel do espectro.

O “Dynamic Self-Organizing Planning and Management” (DSONPM) trata do gerenciamento no nível da reconfiguração do segmento de rede quando incorpora várias estações radio-bases. Esse bloco provê decisões sobre as alocações de Qualidade de Serviço (QoS), distribuição de tráfego, otimização do desempenho da rede, ativação de RAT, configuração de parâmetros rádio, etc.

O “Joint Radio Resources Management” (JRRM) gerencia a união dos recursos radio possivelmente de RATs heterogêneos. Suas funcionalidades incluem seleção de acesso rádio, prover informações da vizinhança, alocação e admissão de banda e QoS, entre outras.

O “Configuration Control Module” (CCM) é responsável por reforçar as decisões de reconfigurações, tipicamente, feitas pelo DSONPM e JRRM.

### 2.3.2.2

#### Canal Piloto Cognitivo (CPC)

CPC é definido como um canal que possui os elementos de informação necessários para facilitar a operação dos sistemas rádio cognitivo (“Cognitive Radio System” - CRS). O CPC provê informações para o acesso rádio em uma certa área geográfica, tais como informações do operador, tipo de tecnologia rádio (“Radio Access Technology” – RAT), frequências usadas, entre outras. Alguns cenários de utilização do CPC seriam:

- Suporte a um terminal durante a fase de inicialização em um ambiente onde o terminal não sabe os RATs disponíveis e as frequências em uso.
- Troca de informações entre terminais e estação radiobase, visando desenvolver o sensoriamento colaborativo e facilitar a procura de “White Spaces” (WS) para iniciar a comunicação.
- Comunicação entre terminal e rede para suporte ao gerenciamento de recursos e procedimentos de otimização.

O CPC pode ser empregado:

- Fora da banda, onde seria um canal rádio fora do sistema RAT, assim o CPC usaria uma nova interface rádio ou uma adaptação da tecnologia legada com características apropriadas para suas funções.
- Dentro da banda, onde seria um canal lógico com a tecnologia do ambiente rádio heterogêneo.

### 2.3.3

#### ECMA 392

A padronização do sistema rádio cognitivo (CRS) no ECMA (“European Association for Standardizing Information and Communication Systems”) é desenvolvida pelo “Task Group” 1 do “Technical Committee” 48 (TC-48). [28]

O padrão ECMA-392, “MAC and PHY for Operation in TV White Space,” foi publicado em dezembro de 2009 [29].

Este padrão especifica as camadas MAC e PHY para redes sem fio cognitivas pessoais operando nas bandas de TV e, também, dispõe sobre mecanismos de proteção que podem ser usados para atender os requisitos regulatórios.

## 3

### Metodologia de Medição

#### 3.1

##### Introdução

Diversas campanhas de medição, cobrindo uma banda larga de frequências licenciadas como em [40] [41] [42] [43] [44] [45], têm sido desenvolvidas em diversos locais e cenários, visando determinar o grau de ocupação das bandas do espectro em sistemas de comunicação sem fio.

Medições do ambiente rádio podem fornecer valiosas informações sobre a atual utilização do espectro radioelétrico. Essas informações são importantes na definição de políticas regulatórias adequadas para acesso dinâmico do espectro (“DSA”), na seleção das bandas de frequências mais apropriadas para as futuras redes de rádios cognitivos e na identificação de padrões de utilização que podem ser explorados em modelos de utilização do espectro e em técnicas cognitivas mais eficientes. [46]

Vários aspectos metodológicos devem ser levados em consideração quando se executa uma medição de ocupação do espectro, entre eles citamos os parâmetros estatísticos que determinarão a exatidão e o nível de confiança da avaliação, as configurações de tempo e frequência, as configurações de equipamentos e “softwares”, a definição do limiar e o pós-processamento.

O presente trabalho apresenta o estudo dos aspectos metodológicos aplicados à campanha de medição de ocupação espectral em andamento no Rio de Janeiro. A campanha visa caracterizar a ocupação espectral, varrendo faixas de frequência de interesse que informarão sobre as condições do espectro de uma grande cidade brasileira.

## 3.2

### Descrição das medições de ocupação espectral

#### 3.2.1

##### Definição das bandas de frequências

A faixa de frequências definida para a medição inicia em 144 MHz e termina em 2690 MHz. Essa faixa foi escolhida pelo interesse de uso em serviços móveis com tecnologia de rádios cognitivos. A separação da faixa de frequências em bandas de análise foi realizada, utilizando as informações da referência [37] proveniente do site da Anatel.

Todas as bandas superiores a 100 MHz foram divididas para redução do tempo de revisita, isso será mais bem detalhado na seção 3.3.1. A frequência de quebra seguiu critério de não quebrar uma subfaixa ao meio, para isso, as quebras foram realizadas seguindo as informações das subfaixas de [37].

O plano de frequências brasileiro é constituído por um conjunto de documentos denominados portarias, instruções, resoluções, decretos, etc. Muitos desses documentos são antigos e quase inacessíveis, havendo muitas superposições de serviços e revogações, total e parcial, o que torna qualquer análise difícil e com possibilidade de erro. Devido a isso a definição das bandas de análise é passível de revisão a qualquer tempo.

Algumas subfaixas de frequências foram excluídas. O critério utilizado para essas exclusões está referenciado no documento ITU-R, da referência [38], que recomenda não utilizar sistemas cognitivos nas bandas de frequências cujos serviços possuem níveis de recepção muito baixos, o que poderia aumentar a indisponibilidade devido às interferências. Devido a essa recomendação, foram excluídas as bandas de:

- Serviços espaciais (Espaço-Terra);
- Serviços de radiolocalização por satélite;
- Serviços de radioastronomia e
- Serviços utilizando sensores passivos.

A definição das faixas de frequências pode ser vista na Tabela 3.1, cujas observações indicam as bandas excluídas.

Tabela 3.1 Faixas de Frequência de Medição

Freq. Inicial	Freq. Final	BW	Observações
144	174	30	Exclui 108-144 radionav./satélite E-T
174	216	42	
216	225	9	
225	322	97	Exclui 322-335,4 – radioastron./radionav.
335,4	400,05	64,65	Exclui 400.05-403 - satélite E-T
403	406	3	
406	470	64	
470	512	42	
512	608	96	Exclui 608-614 - radioastronomia
614	698	84	
698	746	48	
746	806	60	
806	902	96	
902	928	26	
928	960	32	Exclui 960-1427 – radionav./radioastron.
1427	1518	91	Exclui 1518-1626,5 –satélite E-T/radionav.
1626,5	1660	33,5	Exclui 1660-1710 –radioastron./satélite E-T
1710	1785	75	
1785	1850	65	
1850	1930	80	
1930	1970	40	
1970	2025	55	
2025	2110	85	
2110	2200	90	
2200	2290	90	
2290	2300	10	
2300	2400	100	
2400	2450	50	
2450	2500	50	
2500	2520	20	
2520	2570	50	
2570	2655	85	Exclui 2655-3100 – radioastron./radionav.

### 3.2.2

#### Caracterização do ambiente e período de teste

A campanha de medição foi realizada no prédio 2 do campus do Inmetro em Duque de Caxias – RJ, coordenadas [-22° 35' 12,5"; -43° 17' 1,3"]. Essa localização é caracterizada por um ambiente afastado de grandes centros urbanos e com construções esparsas e de baixa altura, sendo, por isso, classificada como um ambiente rural. A Figura 3.1 mostra a antena e o ambiente onde foram realizadas as medições. A medição foi desenvolvida nos meses de março, abril e maio de 2012.

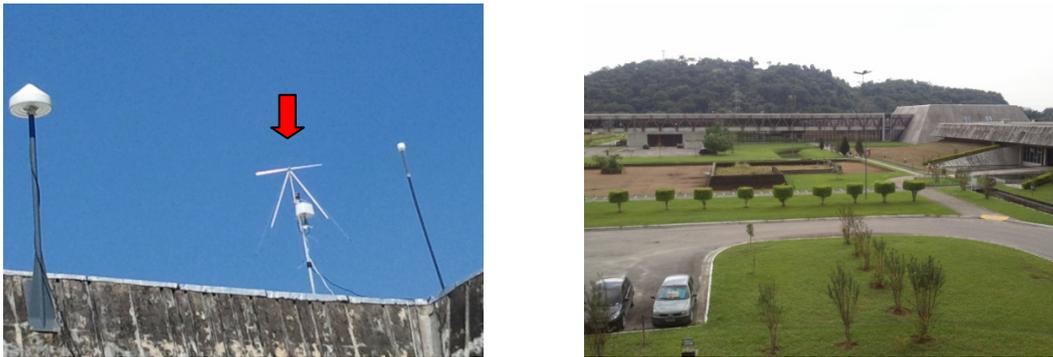


Figura 3.1. Antena e Ambiente da Medição

### 3.2.3

#### Especificação do “setup” de medição

O “setup” de medição empregado na avaliação de ocupação espectral deve ser desenhado levando em conta fatores como frequência (“span”, resolução), antena (direção, polarização), tempo (amostragem, período de medição), amplitude (LNA, pré-amplificadores). O mesmo deve ser capaz de detectar, dentro de uma faixa larga de frequências, um grande número de transmissores de natureza diversa, desde sistemas faixa estreita a faixa larga, desde sinais de recepção fracos, próximos do piso de ruído, até sinais fortes que podem sobrecarregar o sistema de recepção. Dependendo dos propósitos do estudo, diferentes configurações podem ser usadas. A definição de uma configuração determina um compromisso entre complexidade e capacidade de medição.

A definição da faixa larga de frequência da medição determinou a escolha de uma antena banda larga. Uma vez que é desejada a detecção de sinal primário oriundo de qualquer direção, adotou-se uma antena omnidirecional, verticalmente polarizada. A necessidade de detecção de baixa relação sinal-ruído determinou a escolha por utilizar um amplificador de baixo ruído (LNA).

Importante notar que escolher um LNA com o mais alto ganho possível não é sempre a melhor opção em uma medição de ocupação espectral de banda larga onde diferentes níveis de sinal podem estar presentes. Existe um compromisso entre a sensibilidade e a faixa dinâmica que deve ser levado em conta. Um critério razoável é garantir que o sinal recebido permaneça dentro da faixa dinâmica sem espúrios (“Spurious-Free Dynamic Range”=SFDR) que é

definida como a diferença entre um limiar no qual o sinal pode ser detectado sem excessiva interferência do ruído e o nível de entrada que produz espúrios em um nível igual ao da potência de ruído [48]. Caso o nível máximo seja excedido, algum espúrio pode ficar acima do piso de ruído e poderia ser detectado como uma transmissão em um canal de frequência não ocupado.

O sistema de medição foi montado com uma antena banda larga discônica omnidirecional Icom AH-8000, conectada a um amplificador de baixo ruído (“Low Noise Amplifier” – LNA) ZX60-33LN+ e este a um analisador de espectro Anritsu MS8901A. O Analisador de espectro e LNA são conectados através de um cabo RGC-213, de 15 m de comprimento. Uma fonte DC fornece 5 V através de um cabo, também, de 15m que alimenta o LNA. Um “laptop” rodando um programa em Matlab executa o controle do analisador e a captura dos dados das medições. O “laptop” possui acesso internet, permitindo “download” dos dados gravados e disparo das medições, remotamente, através do “software” Teamviewer. A Figura 3.2 ilustra o “setup” de medição utilizado.

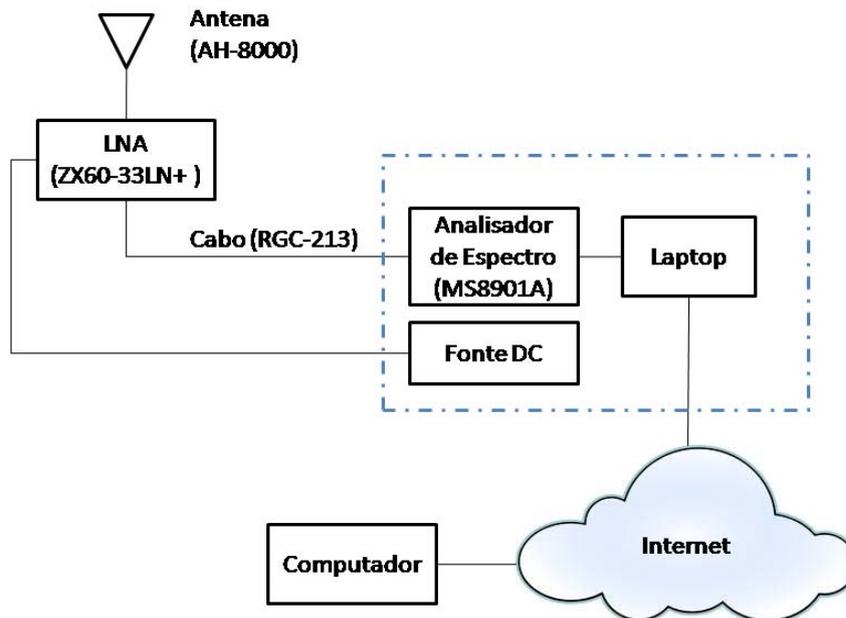


Figura 3.2. Diagrama do Sistema de medição

A antena AH-8000 cobre as frequências de 100 a 3300 MHz com ganho máximo de 3 dBi. O LNA ZX60-33LN+ cobre frequências de 50 a 3000 MHz com ganho típico variando de 21.9 a 11.9 dB. O analisador de espectro MS-8901A

cobre frequências de 9 KHz a 3000 MHz, aceitando uma potência de entrada de RF máxima de 30 dBm com pré-amplificador desligado.

### 3.3

#### Aspectos Metodológicos

##### 3.3.1

##### Abordagem estatística

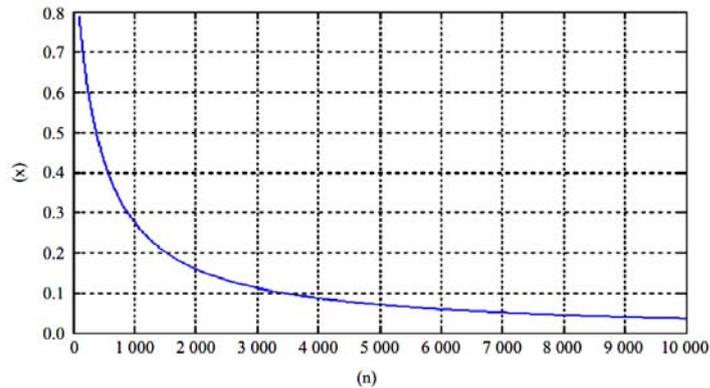
Um parâmetro importante para a medição é o tempo de revisita de um canal de frequência específico, calculado esse tempo como o produto do tempo de amostragem de um canal pelo número de canais da faixa, acrescentando a este produto o tempo de processamento do “software” de captura.

Um sistema de medição de ocupação espectral precisa varrer a faixa de frequência com uma velocidade aceitável para detectar transmissões de curta duração. Assim, a medição pode ser efetuada de duas formas distintas:

- Reduzindo o tempo de revisita para a metade do menor período de transmissão da faixa de frequência. Neste caso, as medições podem ser de curta duração, pois a exatidão é independente do tempo de medição, ou seja, qualquer transmissão será detectada.
- Aumentando a duração da medição para uma avaliação estatística. Neste caso, o tempo de medição é grande o suficiente para obter uma quantidade de amostras que permitirá obter a ocupação mesmo com tempos de revisitas longos.

A medição realizada adotou a segunda forma citada. Nesta abordagem estatística, a duração da medição depende da exatidão desejada para a avaliação da ocupação e das características das transmissões e do sistema de medição. Quando as características das transmissões são desconhecidas, utiliza-se uma duração mínima de 24 h ou múltipla de 24 h.

Quanto menor for a ocupação de um canal de frequência, maior será o número de amostras necessárias para um nível de confiança desejado. Na Figura 3.3, podemos visualizar o número de amostras necessárias versus a ocupação espectral, considerando uma exatidão relativa de 10% e um nível de confiança de 95% [39].



**Figura 3.3. Número de amostras x ocupação. (exatidão relativa 10% - nível de confiança 95%)**

Visando obter um número adequado de amostras para um nível de ocupação inferior a 5%, limitamos o controle da largura de frequência (“span”) de todas as faixas a no máximo 100 MHz para um RBW de 10 KHz. Com isso obtivemos tempos de revisita inferiores a 4 segundos e número total de amostras de um canal específico superior a 10000.

### 3.3.2

#### Aspectos relacionados à frequência

A medição de ocupação de uma banda larga de frequência requer dividir essa banda em blocos e desenvolver as medições sobre esses blocos de frequências. Essa divisão é necessária devido à relação entre a largura de banda do sinal transmitido e a resolução de frequência do analisador de espectro. Existe um número fixo de pontos de frequência por varredura e a separação entre dois pontos de frequências consecutivos (“frequency bin”) aumenta à medida que o “span” se torna maior.

Verifica-se que quanto maior o “frequency bin” maior será a taxa de ocupação [46]. Um exemplo pode esclarecer essa relação: caso seja usado um “frequency bin” de 1000 KHz e exista na banda uma transmissão que usa um canal de 200 KHz então será identificada uma ocupação de 1000 KHz ao invés de 200 KHz. Assim, “frequency bin” bem maiores do que a largura das transmissões leva a uma superestimação da ocupação do espectro em bandas com níveis de atividade moderada. Estimativas de ocupação serão razoavelmente precisas quando a largura do “frequency bin” permanecer menor do que a largura das transmissões na banda.

Outro importante aspecto relacionado à frequência é a resolução de largura de banda (“Resolution BandWidth” – RBW) que controla a resolução de frequência do eixo de frequências. Diminuir o RBW aumenta a capacidade do sistema de detectar transmissões e reduz o piso de ruído [49], entretanto, a melhoria na capacidade de detectar sinais fracos apresenta um custo que é aumentar o tempo de medição.

Quando em uma mesma faixa existem diversas transmissões de larguras de banda diferentes, deve-se escolher um valor de RBW que represente a melhor opção entre detecção e tempo de medição. Na tabela 2, são mostrados diversos valores de RBW e seu respectivos “duty cycle” e “sweep time”, esta medição foi feita na banda de frequência entre 146 e 235 MHz onde existem diversos tipos de transmissões, desde 12.5 KHz até 1.54 MHz.

**Tabela 3.2 Impacto do RBW na ocupação**

RBW [KHz]	Ocupação "Duty Cycle" [%]	Tempo de Varredura "Sweep Time" [s]
3	58.04	7.49
10	56.08	2.81
30	50.84	1.85
100	43.30	0.92
300	40.36	0.79

Um compromisso entre capacidade de detecção e tempo de medição pode ser adotar um RBW de 10 KHz, pois para este valor verifica-se uma perda de apenas 3% da ocupação em relação ao RBW de 3 KHz, entretanto, é possível capturar 2.67 vezes mais amostras no mesmo período de tempo, como mostra a relação entre os tempos de varredura [46].

### 3.3.3

#### Aspectos relacionados ao tempo

Entre os aspectos relacionados ao tempo, o período de medição é o que necessita ser melhor avaliado em relação aos objetivos de uma campanha de medição de ocupação espectral. Diferentes períodos de medição foram utilizados em medições de ocupação, tais como 30 minutos [41], 48 horas [42], 7 dias [50].

Utilizando a abordagem estatística descrita na seção 3.2, torna-se necessário avaliar um tempo suficientemente longo para obter uma estimativa representativa do uso do espectro na banda de interesse. Medições efetuadas em um período de 24 h, com a ocupação média calculada a cada 1 h em uma faixa de frequência de “downlink” de um sistema móvel DCS, permitem verificar a evolução da ocupação ao longo do dia, conforme mostrado na Figura 3.4.

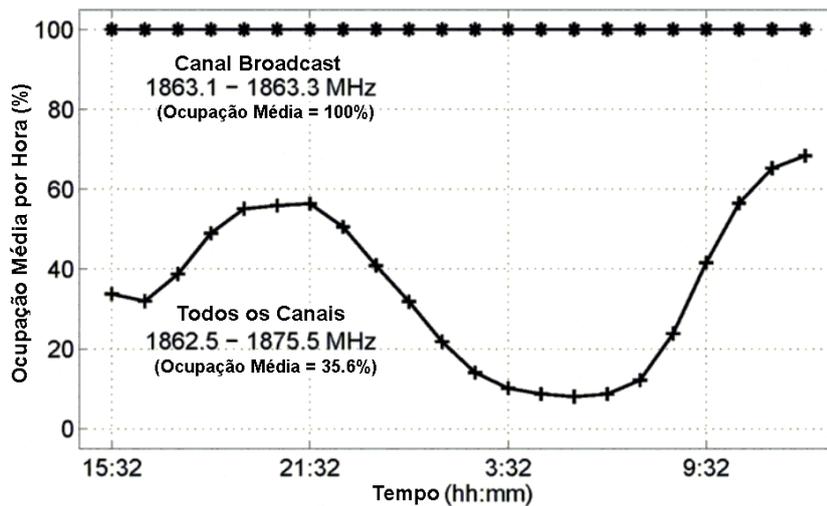


Figura 3.4. Ocupação Média por Hora

Excluindo os canais de “broadcast”, que permanecem ativos 100% do tempo, podemos observar um padrão de oscilação ao longo do tempo para os demais canais da banda. Os valores de ocupação são bem diferentes do valor médio de 24 h obtido, assim uma ocupação média de 68%, próxima às 12h, é subestimada pelos 35% do valor médio de 24 h, da mesma forma que o valor de 10% próximo às 4 h é superestimado.

Considerando a modulação horária existente em diversas faixas de frequência com serviços de usuários, uma avaliação representativa, desprovida de informações adicionais sobre a banda que será medida, deveria considerar um período de 24 horas de medição, pelo menos, para que não ocorra uma subestimação ou superestimação da ocupação dentro do padrão temporal de ocupação.

Períodos de medições maiores proporcionam melhores estimativas. Períodos de 7 dias incluiriam potenciais diferenças entre o padrão de utilização dos dias da semana e dos dias de final de semana. Períodos muito longos mostrariam potenciais diferenças de padrões associadas a eventos como feriados, férias escolares, estações do ano, etc, entretanto, deve-se considerar

que uma campanha realizará medições em várias subfaixas de frequências. Assim sendo, a escolha do período de medição terá um impacto multiplicativo no tempo total da campanha de medição.

Um período de 24 h de medição pode ser considerado um razoável compromisso entre confiabilidade dos resultados e o tempo total requerido para completar a campanha de medição.

### 3.3.4

#### **Aspectos relacionados ao pós-processamento**

Declarar um canal de frequência como ocupado ou não ocupado é o primeiro passo de um pós-processamento. Para detectar se uma frequência está ou não sendo utilizada, foram propostos diferentes métodos de sensoriamento, os quais apresentam diferentes compromissos entre tempo de sensoriamento, complexidade e capacidade de detecção.

Os métodos de sensoriamento possuem diferentes desempenhos, dependendo de quanta informação se dispõe sobre as transmissões de uma banda, entretanto, considerando o caso genérico em que nenhuma informação está disponível, o método de detecção de energia é o único possível. Devido a essa capacidade de tratar de forma genérica as transmissões de uma banda, este método tem sido preferencialmente utilizado em estudos de ocupação.

O método de detecção de energia compara a potência recebida em certo canal de frequência com um limiar pré-definido (“threshold”). Caso essa potência esteja acima do limiar o canal é declarado ocupado, caso contrário é considerado livre.

O limiar de decisão é um parâmetro crítico no pós-processamento, uma vez que seu valor tem alto impacto nas estatísticas de ocupação. Valores altos de limiar resultam em subestimação da ocupação, devido a não detecção de transmissões com potência de recepção menor. Por outro lado, valores baixos de limiar resultam em superestimação da ocupação, devido a sinais de ruído que ultrapassam o limiar.

O limiar representa um valor de potência estabelecido a partir da medida do piso de ruído, acrescido de uma margem, utilizada para absorver as variações instantâneas de potência do ruído devidas à propagação do sinal radioelétrico. Essa margem deve ser escolhida para reduzir a probabilidade de falso alarme, ou seja, a probabilidade de considerar um canal como ocupado

quando ele está livre. Caso seja adotada uma margem pequena, será maior a probabilidade de falso alarme e ocorrerá uma superestimação da ocupação.

Por outro lado, a margem adotada não pode ser muito grande, senão aumentará a probabilidade de erros de detecção, ou seja, a probabilidade de considerar um canal como livre quando ele possui transmissões. Caso seja adotada uma margem grande, será maior a probabilidade de erros de detecção e ocorrerá uma subestimação do espectro.

A ocupação de bandas com transmissões de potência alta apresenta menor sensibilidade ao limiar do que bandas com baixos níveis de transmissão. Nestas últimas, pequenas alterações no valor do limiar podem ter alto impacto na ocupação calculada. Tendo em vista o exposto, uma relação de compromisso deve ser estabelecida na escolha do limiar. Investigando alguns critérios descritos nos parágrafos seguintes, foi definido um método para a determinação do limiar.

Um método simples de determinar o limiar é através de uma análise empírica onde as medidas coletadas são visualizadas e um valor de threshold é manualmente definido entre ruído e sinal. A principal desvantagem desse método é a subjetividade e a dificuldade em ser implementado de forma automática.

Métodos mais rigorosos utilizam medições de ruído realizadas com carga casada, em vez da antena, e selecionam o valor máximo de ruído medido em cada frequência para ser comparado com o nível medido. A principal desvantagem é que amostras de baixa potência podem ficar abaixo do ruído máximo e subestimar a ocupação.

O critério de fixar o limiar  $m$  dB acima do nível médio de ruído é utilizado em vários estudos. A principal preocupação em relação a esse método é que tanto a variância quanto o valor máximo do ruído variam de uma banda para outra, sendo necessário recalculá-lo para cada banda avaliada.

Um critério chamado de probabilidade de falso alarme (PFA), utiliza uma medição de ruído com carga casada para definir um valor de limiar onde um certo percentual do ruído ficará acima desse valor. Assim, um PFA 1% indica que apenas 1% do ruído está acima do limiar.

Outro conjunto de critérios foi desenvolvido para definir o limiar sem o conhecimento do ruído. Tais critérios são mais complexos e não podem ser utilizados em todos os casos, pois se baseiam em estatísticas [47] e premissas [51]. Tendo em vista o objetivo de desenvolver uma metodologia cujo critério do

limiar possa ser utilizado em qualquer medição de ocupação espectral, os critérios que não consideram o ruído foram excluídos do escopo desse trabalho.

Desta forma, para as medições deste trabalho foi adotado avaliar o limiar pelo critério  $\underline{m}$  dB, sendo o ruído avaliado a cada banda e o valor de  $\underline{m}$  definido para um percentual de falso alarme inferior a 1,22% conforme [41], resultando em uma margem de 6 dB acima do piso de ruído.

## 4

# Processo de Medição, Resultados e Simulação

## 4.1

### Fluxo do processo de medição e “softwares”

A medição de ocupação espectral e todas as suas fases de pós-processamento podem ser melhor descritas considerando o fluxo do processo de medição. O fluxo é mostrado na Figura 4.1 acompanhado dos respectivos “softwares” desenvolvidos em Matlab e os tipos de arquivos de saída/entrada.

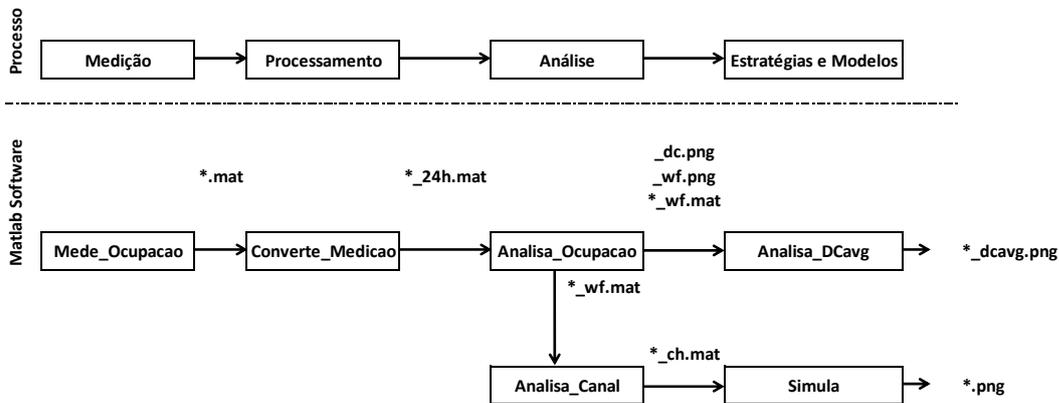


Figura 4.1. Fluxo do Processo de Medição

## 4.2

### Medição

A primeira etapa do processo é a medição que objetiva obter uma amostragem da densidade de potência da subfaixa de frequência que se deseja analisar. Esta etapa é realizada através de um “setup” de medição, conforme descrito em 3.2.3., que inclui um “laptop” para realizar configuração, coleta e gravação dos dados de medição através de um “software” desenvolvido em Matlab.

O “software” “*mede\_ocupacao.m*” comanda o analisador de espectro, tanto na sua configuração quanto na coleta e gravação dos dados de medição. Este envia um comando para realizar uma varredura (“trace”) no analisador de

espectro na subfaixa que está sendo medida. A varredura gera um conjunto de 500 valores de potência (dBm) no intervalo da subfaixa de frequência. Esses valores são gravados no “buffer” de saída do analisador de espectro. Um comando para leitura é enviado pelo “software” que recebe e grava o “trace” junto com sua data e hora em uma matriz na memória.

O procedimento é repetido durante 1 hora, após esse tempo a matriz é gravada como um arquivo \*.mat cujo nome do arquivo é formado pelas informações mostradas abaixo. Após a gravação, o “software” limpa a matriz e reinicia o procedimento. Todo o processo se repete durante 24 horas, resultando na gravação de 24 arquivos.

*Formato do nome do arquivo da medição de 1 hora:*

*“Banda”+Freq.Inicial+”-“+Freq.Final+”MHz-Rbw”+RBW+”KHz-Swt”+SweepTime+”ms\_”+Data-Hora+”.mat”*

Exemplo: Banda2620-2690MHz-Rbw10KHz-Swt2100ms\_2012-05-09-01-10.mat.

### 4.3

#### Processamento

A etapa do processamento trata as informações de medição gravadas como arquivos de 1 hora e gera um novo arquivo de medição de 24 h para ser utilizado como entrada da etapa de análise.

O “software” “**converte\_medicao.m**” faz a leitura dos 24 arquivos de medição e verifica a consistência de cada “trace” gravado, criando um único arquivo de medição com formato próprio.

Todos os “traces” devem satisfazer as três condições abaixo:

- devem existir 500 valores
- todos os valores devem ser numéricos
- todos os valores devem estar dentro da faixa [-130, 0] dBm

Caso alguma das condições seja violada, o “trace” será descartado. Um contador é utilizado para cada condição, sendo gerado um relatório no final da consolidação para que se possa avaliar se o arquivo consolidado poderá ou não ser utilizado na análise.

O formato do arquivo consolidado é diferente do formato original do arquivo de medição. Este último só possuía os dados do “trace” e da data/hora em que o “trace” foi medido. O arquivo consolidado possui na primeira linha as

frequências em que os valores dos “traces” foram medidos e na primeira coluna a data/hora de cada trace no formato “Serial Date Number” (SDN) do Matlab. O novo formato é utilizado devido ao melhor desempenho nos cálculos com o formato SDN de data e a necessidade das frequências nas funções utilizadas nos “softwares” de análise.

O nome do arquivo consolidado é formado com os mesmos dados do nome do arquivo de medição, com exceção da informação de “Data-Hora”, que é substituída pelo sufixo “\_24h”, conforme mostrado a seguir.

*Formato do nome do arquivo de consolidado:*

*“Banda”+Freq.Inicial+”-“+Freq.Final+”MHz-Rbw”+RBW+”KHz-Swt”+Sweep Time+”ms\_24h.mat”*

*Exemplo: Banda2620-2690MHz-Rbw10KHz-Swt2100ms\_24h.mat.*

## 4.4

### Análise

A etapa de análise visa transformar as informações de medição em gráficos que permitam uma avaliação da ocupação. Além disso, é gerado um arquivo de ocupação com terminação “\_wf.mat” que será usado como entrada para a etapa de modelo.

#### 4.4.1

##### Analisa Ocupação

O “software” “**Analisa\_Ocupacao.m**” faz a leitura do arquivo consolidado de 24 h; re-organiza a matriz para que a hora inicie em 00:00 e termine em 23:59; calcula o piso de ruído e limiar que será utilizado para decidir se o canal está ou não ocupado; plota gráficos no formato “\*.png” e salva arquivo de ocupação.

Os gráficos que permitem uma análise de ocupação espectral da faixa de frequência são “Waterfall” e “Duty Cycle”. Os outros dois gráficos são utilizados para avaliar a correção dos dados e dos dois primeiros gráficos citados e foram nomeados como “Signal, Noise Floor and Threshold” e “Max Hold”.

Os 4 gráficos foram gerados para todas as faixas de frequências medidas e são mostrados no Anexo A. Segue abaixo uma descrição dos mesmos.

- **Signal, Noise Floor and Threshold.**

Plota o nível de recepção em função da frequência para uma amostra do “trace” e indica o piso de ruído e limiar adotado naquele “trace”, conforme mostrado na Figura 4.2.

- **Max Hold.**

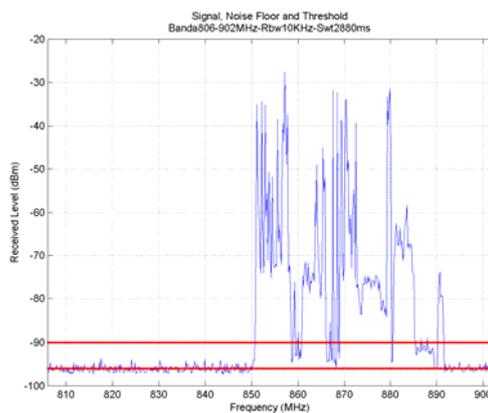
Plota o nível máximo de recepção em função da frequência, ou seja, o maior nível de recepção durante as 24 horas de medição para cada canal de frequência, conforme mostrado na Figura 4.3.

- **Waterfall.**

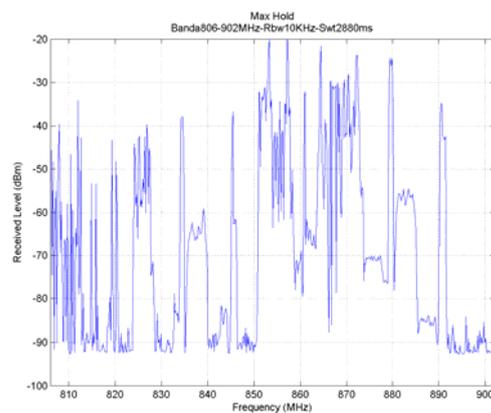
Plota um gráfico que indica a ocupação dos canais de frequência no período de tempo de 0 às 24h. Um canal de frequência ocupado é plotado como um ponto azul, conforme mostrado na Figura 4.4.

- **Duty Cycle**

Plota um gráfico que indica a ocupação percentual dos canais de frequência no período de tempo de 0 a 24 h, conforme mostrado na Figura 4.5.



**Figura 4.2. “Signal, Noise Floor and Threshold”**



**Figura 4.3. “Max Hold”**

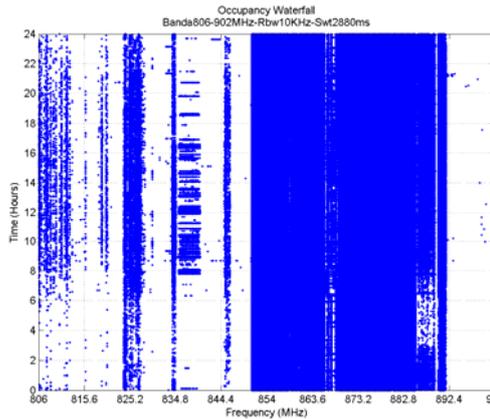


Figura 4.4. "Waterfall"

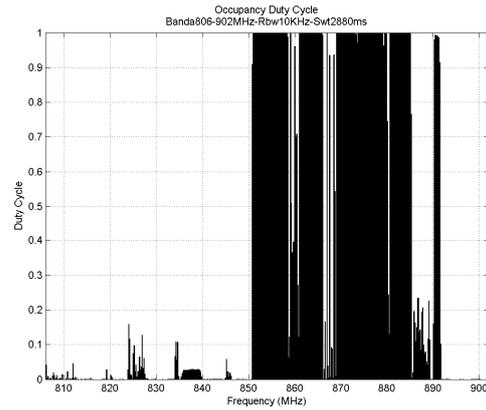


Figura 4.5. "Duty Cycle"

A principal métrica que descreve a ocupação espectral é conhecida como "duty cycle". Ela é definida como a fração do tempo que uma banda de frequência é medida como ocupada e representa um tempo médio de utilização do espectro.

Cada amostra medida deve ser avaliada como um sinal ou um ruído. Uma avaliação baseada em detecção de energia pode comparar a energia da amostra em certa banda de frequência a um limiar pré-definido. Caso a energia da amostra seja maior que o limiar, conta-se como ocupado aquele canal de frequência, caso contrário conta-se como não ocupado.

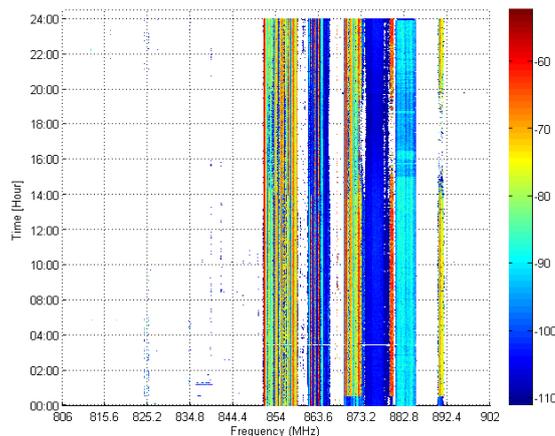
Sendo  $P_L$  (dBm) o nível de potência do limiar,  $P_R$  (dBm) o nível de potência de recepção da amostra, podemos determinar o tempo que um canal de frequência ficou ocupado durante o período de medição como  $n_s \cdot t$ , sendo  $t$  a duração da varredura de um canal e  $n_s$  o número de amostras em que  $P_R > P_L$  durante o período de medição. Tomando  $T$  como o período total de medição e  $N$  como o número total de amostras. Podemos calcular o "Duty Cycle" (DC) de cada canal de frequência como:

$$DC = n_s \cdot t / T = n_s \cdot t / N \cdot t = n_s / N \quad (4.1)$$

Nota-se pela expressão 4.1 que a informação de tempo foi excluída no cálculo do "duty cycle", ou seja, através dessa métrica podemos conhecer a percentagem do tempo em que o canal de frequência ficou ocupado, mas desconhecemos quando esses eventos de ocupação ocorreram.

Devido à perda de informação do tempo e objetivando analisar padrões temporais de ocupação, utiliza-se representar a ocupação através de gráficos conhecidos como "waterfall".

Gráficos “waterfall” apresentam a ocupação durante todo o período de medição, neste caso de 0 a 24 h, sendo possível criá-lo apenas com a informação de ocupação, neste caso, as amostras ocupadas são representadas como um ponto e as não ocupadas como vazio, ou adicionar informação do nível de potência medido na amostra ocupada através de uma escala de cores que represente o intervalo de potência da medição. Um exemplo deste gráfico “waterfall” de potência pode ser visto na figura 4.6, porém esse gráfico não foi gerado para todas as medições devido ao seu alto custo computacional.



**Figura 4.6. “Waterfall” de potência**

Para tempos de medição longos, uma região do gráfico “waterfall” pode parecer estar 100% do tempo ocupada, entretanto, a mesma pode apresentar curtos períodos de desocupação que não são visualizados devido a alta densidade de pontos. Um exemplo pode ser visto no gráfico da Figura 4.4 na região próxima da frequência de 880 MHz, onde não é possível identificar períodos não ocupados, entretanto, observando a região próxima a 880 MHz no gráfico de “Duty Cycle” da Figura 4.5, notamos que o mesmo apresenta uma estreita faixa de baixa ocupação nessa região.

Para verificar os valores máximos de potência obtidos durante todo o período de medição, gráficos do tipo “Max Hold” são gerados, como mostrado na Figura 4.3. Esses não possuem informação temporal, prestando-se a confirmar a presença de transmissões nos canais de frequência em algum momento da medição.

Os gráficos são gerados para cada faixa de frequência. O nome do arquivo de cada gráfico é formado com os mesmos dados do nome do arquivo de medição 24 h, apenas o sufixo “\*\_24h.mat” é substituído pelo sufixo que especifica o tipo de gráfico, conforme mostrado a seguir.

“\*\_th.png”: Signal, Noise Floor and Threshold.  
 “\*\_mh.png”: Max Hold.  
 “\*\_wf.png”: Waterfall.  
 “\*\_dc.png”: Duty Cycle.

*Formato do nome do arquivo dos gráficos:*

“Banda”+Freq.Inicial+”-“+Freq.Final+”MHz-Rbw”+RBW+”KHz-Swt”+Sweep Time+”ms\_th.png”

“Banda”+Freq.Inicial+”-“+Freq.Final+”MHz-Rbw”+RBW+”KHz-Swt”+Sweep Time+”ms\_mh.png”

“Banda”+Freq.Inicial+”-“+Freq.Final+”MHz-Rbw”+RBW+”KHz-Swt”+Sweep Time+”ms\_wf.png”

“Banda”+Freq.Inicial+”-“+Freq.Final+”MHz-Rbw”+RBW+”KHz-Swt”+Sweep Time+”ms\_dc.png”

Exemplo: Banda2620-2690MHz-Rbw10KHz-Swt2100ms\_th.png;

A matriz wf utilizada para a geração dos gráficos de “Waterfall” e “Duty Cycle” é gravada como um arquivo de ocupação. Esse arquivo permite aumentar o desempenho do processamento da etapa seguinte, já que o processamento de avaliação da ocupação não precisará ser refeito.

O nome do arquivo de ocupação é formado com os mesmos dados do nome do arquivo de medição 24 h, apenas o sufixo “\*\_24h.mat” é substituído pelo sufixo “\*\_wf.mat”, conforme mostrado a seguir.

*Formato do nome do arquivo de ocupação:*

“Banda”+Freq.Inicial+”-“+Freq.Final+”MHz-Rbw”+RBW+”KHz-Swt”+Sweep Time+”ms\_wf.mat”

Exemplo: Banda2620-2690MHz-Rbw10KHz-Swt2100ms\_wf.mat.

#### 4.4.2

##### Analisa Canal

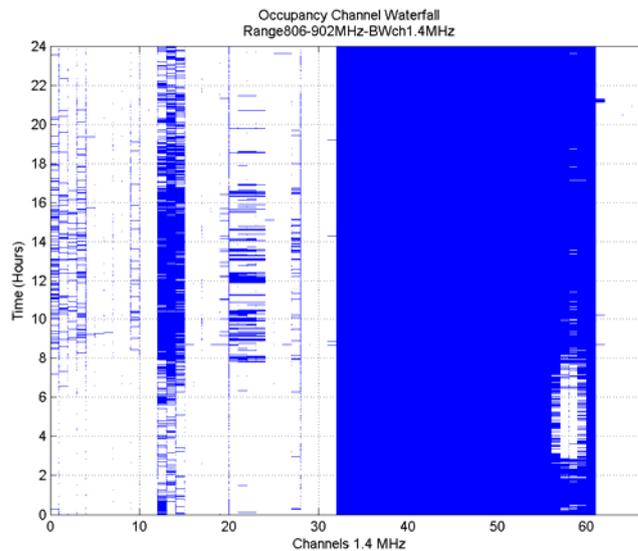
O “software” “**Analisa\_Canal.m**” realiza a leitura do arquivo de ocupação (\*\_wf.mat) e calcula a ocupação de canais com uma certa largura de banda entre uma frequência inicial e final definidas na chamada do “software”. Salva uma matriz com a ocupação dos canais, designada “BandaFinal”, plota e salva gráfico de ocupação dos canais.

A principal função do “software” Analisa\_Canal é gerar uma matriz com canalização e ocupação que servirá de entrada para o “software” de simulação que será descrito no item 4.5.2.

O cálculo da ocupação dos canais utiliza lógica OU. Assim, um canal será definido como:

- Ocupado, se uma ou mais frequências dentro de sua largura de banda esteja marcada como ocupada;
- Não Ocupado, se nenhuma frequência dentro de sua largura de banda esteja marcada como ocupada.

Um exemplo de gráfico com a ocupação dos canais é mostrada na Figura 4.7, neste gráfico foi utilizado canais com largura de 1.4 MHz, referenciando-se ao canal de menor largura do sistema LTE release 8.



**Figura 4.7. “Waterfall” Ocupação dos Canais**

O nome do arquivo de ocupação de canais é formado como mostrado a seguir, sendo BWch um label para largura de banda do canal:

*“Range”+Freq.Inicial+”-“+Freq.Final+”BWch”+largura de banda+”MHz\_ch.mat”*

*Exemplo: Range806-902MHz-BWch1MHz\_ch.mat.*

O nome do arquivo do gráfico é formado com os mesmos dados do nome do arquivo de ocupação de canais, substituindo a extensão “.mat” por “.png”.

#### 4.4.3

### Resultado Consolidado da Ocupação Espectral

A maioria dos estudos de ocupação espectral concentra-se em faixas de frequências específicas para obter informações direcionadas para algum propósito comercial ou regulatório.

Recentemente, um número crescente de estudos de ocupação tem sido desenvolvido em uma banda larga de frequências, visando obter um maior entendimento sobre a utilização do espectro para acesso de sistemas rádio cognitivo. [54] [55] Infelizmente, tais estudos são quase, exclusivamente, realizados em outros países, sendo praticamente nula a produção nacional desse tipo de trabalho.

Utilizando como entrada os arquivos de ocupação (“\*\_wf.mat”), o “software” ‘*Analisa\_DCavg.m*’ calculou a ocupação média (“Duty Cycle Average”) de cada faixa de frequência e gerou o gráfico de barras (“\*\_dcavg.png”), mostrando as ocupações de todas as faixas. Este gráfico, mostrado na Figura 4.8, permite comparar e visualizar a ocupação de todo espectro radioelétrico medido

***O gráfico da Figura 4.8 é uma das principais contribuições deste trabalho, pois apresenta uma avaliação da ocupação do espectro radioelétrico para uma banda larga de frequências em uma cidade brasileira.***

Observando o gráfico, verifica-se que apenas 5 faixas de frequência possuem ocupação superior a 50% e 2 superior a 25%. Pesquisando os serviços a que se destinam essas faixas, verifica-se que quase todas são utilizadas para serviços móveis, sendo uma delas utilizada para distribuição de TV sem fio (MMDS – “Multichannel Multipoint Distribution Service”), conforme Tabela 4.1. Entretanto, esta última faixa será desocupada e substituída pelo serviço móvel 4G para o qual foi leiloadada em junho de 2012.

**Tabela 4.1 Serviços associados as 7 faixas de maior ocupação espectral**

<b>Freq. Inicial [MHz]</b>	<b>Freq. Final [MHz]</b>	<b>Principal Serviço</b>
806	902	Móvel Celular
1626.5	1660	Móvel por satélite
1710	1785	Móvel Celular
1785	1850	Móvel Celular
1850	1930	Móvel Celular
2570	2620	MMDS (antes do leilão 4G)

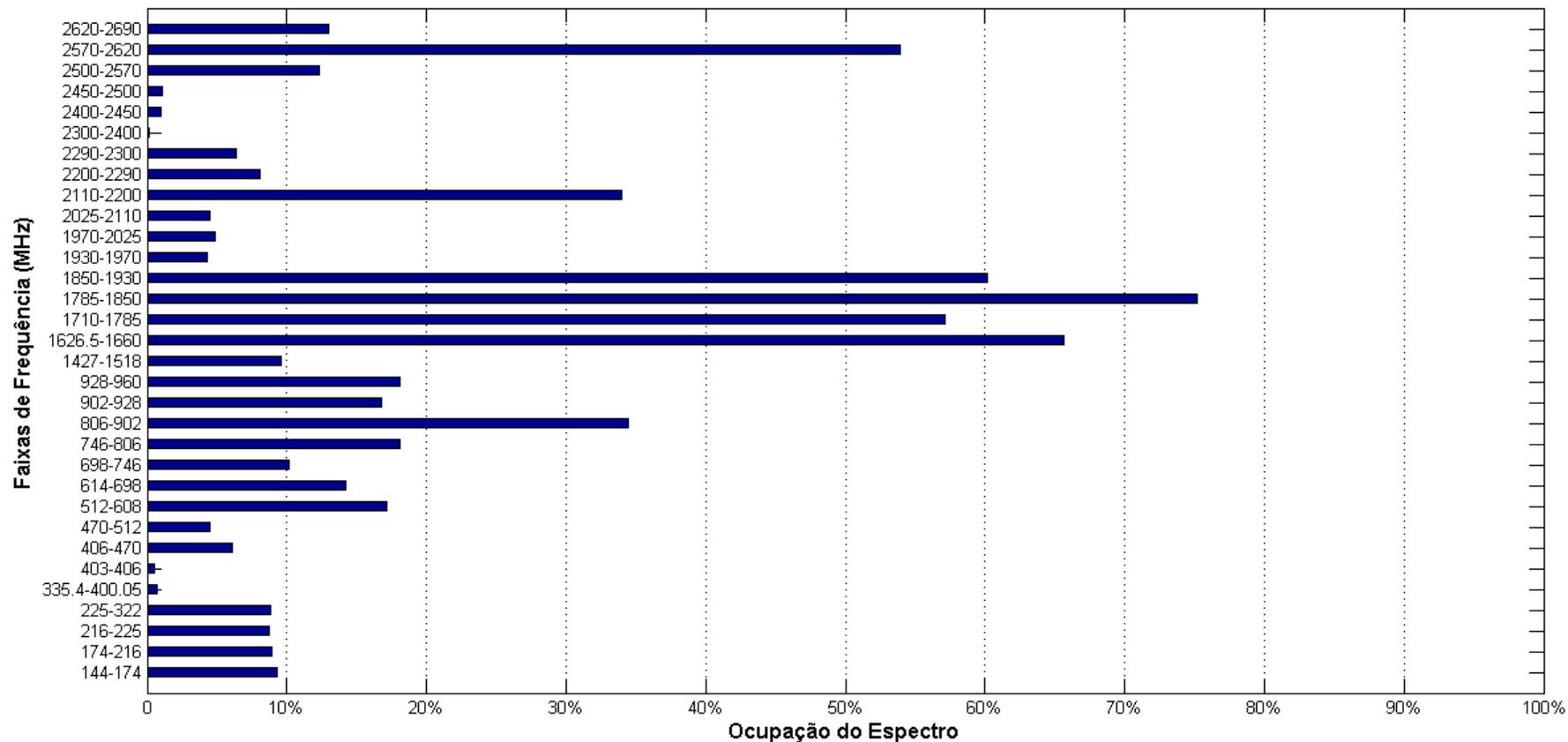


Figura 4.8. Ocupação do Espectro Radioelétrico Medido

Evidencia-se, assim, o alto tráfego e a maior eficiência espectral do serviço móvel. O crescimento deste serviço e a subutilização do espectro é a motivação para avaliações de ocupação espectral e o desenvolvimento de tecnologias de uso oportunístico do espectro.

A subutilização do espectro, também, é evidenciada neste estudo, uma vez que a ocupação espectral média de todas as faixas de frequência medidas é de apenas 19,6%.

Diversos estudos podem ser realizados, utilizando-se o gráfico da Figura 4.8 e os gráficos do anexo A. Um deles seria avaliar as quatro faixas de frequências medidas do espectro associado aos canais de TV, conforme descrito na Tabela 4.2, que possuem ocupação inferior a 25%.

**Tabela 4.2 Espectro associado aos canais de TV**

<b>Freq. Inicial [MHz]</b>	<b>Freq. Final [MHz]</b>	<b>Canais de TV</b>
174	216	7 a 13
470	608	14 a 36
614	746	38 a 59
746	806	60 a 69

Como exemplo, avaliamos a ocupação pelo gráfico “waterfall” da banda 614 a 698 MHz, mostrado na Figura 4.9, o mesmo demonstra existir vários canais não ocupados.

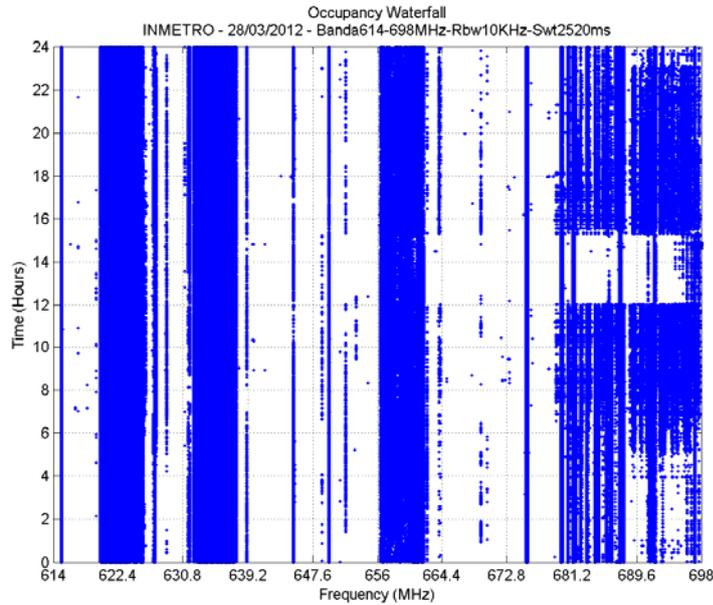


Figura 4.9. “Waterfall” de Ocupação da Banda 614 a 698 MHz

Torna-se evidente a viabilidade de utilização das faixas de frequências associadas aos canais de TV para sistemas móveis com uso oportunístico dos TV “White Spaces” (TVWS) ou para futura migração (“refarming”) dos sistemas de TV da faixa de 698 a 806 MHz para faixas mais baixas, abrindo espaço para o chamado dividendo digital devido à migração da TV analógica para TV digital. [1-4]

## 4.5

### Estratégias e Modelos

A etapa de Estratégias e Modelos visa alcançar um conhecimento sobre a ocupação que permita prever comportamentos e características associados à faixa de frequência, bem como parâmetros e desempenho de sistemas que a utilizem.

#### 4.5.1

### Simulação de Sistema Rádio Cognitivo

O “software” ‘*Simula.m*’ foi desenvolvido para simular uma estação radiobase cognitiva com um esquema de alocação de canais do tipo DSA

(“Dynamic Spectrum Access”) de forma a obter parâmetros de desempenho desse tipo de sistema associado a uma faixa de frequência medida.

As premissas utilizadas no simulador são:

- a. O sistema rádio cognitivo é centralizado, ou seja, uma radiobase cognitiva gerencia a alocação de canais de usuários secundários (US) e o sensoriamento cooperativo;
- b. O sistema utiliza agregação de canais para prover a banda requerida, permitindo que K canais não contíguos na frequência sejam utilizados.
- c. Quando um US quer se comunicar, segue o procedimento:
  - (i) US requisita um canal de comunicação à radiobase;
  - (ii) Radiobase executa um algoritmo de alocação de canal e informa canal para US;
  - (iii) US inicia sua comunicação usando o canal alocado.
- d. Quando um usuário primário (UP) inicia sua comunicação em um canal em uso por um US, este último tem que parar sua transmissão, liberando o canal para UP, retornando ao procedimento descrito em c.

O simulador utiliza os dados de ocupação das medições que são tratados como Usuários Primários (UP) e gera Usuários Secundários (US) através de tempos de chegada definidos por uma distribuição de Poisson.

Um grande diferencial do simulador desenvolvido neste trabalho é a utilização da medição de ocupação espectral como UP. Simulações desse tipo são desenvolvidas utilizando a geração artificial de UP através de distribuições conhecidas, como Poisson e/ou exponencial, não representando a realidade das oportunidades dos WS da faixa de frequência.

Através da utilização da ocupação real dos canais de frequência, é possível realizar uma avaliação da faixa de frequência em termos da sua qualidade para utilização de sistemas cognitivos. Assim sendo, é possível comparar faixas de frequências que possuam ocupação média idêntica, obtendo a de melhor desempenho para uso de sistemas cognitivos, ou mesmo, comparar faixas com ocupações médias diferentes, uma vez que características distintas da ocupação dos canais dessas faixas podem resultar em um desempenho melhor para faixa de ocupação média maior.

O simulador pode ser descrito através de seus blocos, conforme Figura 4.10.

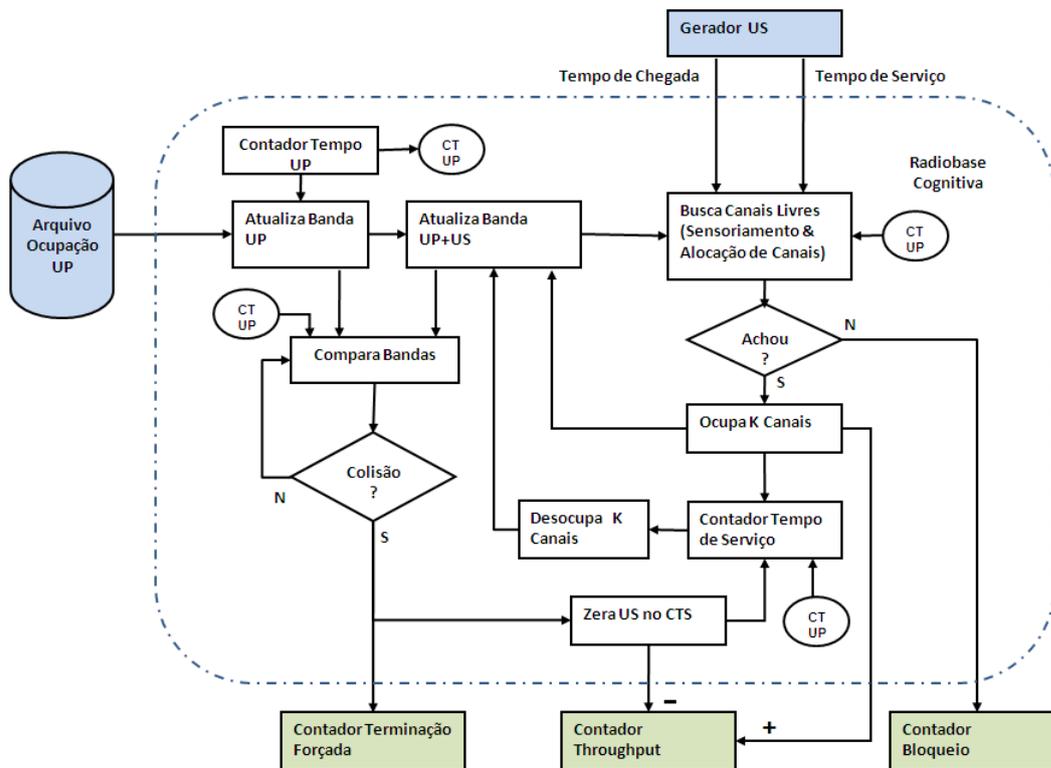


Figura 4.10. Diagrama Simulador Radiobase Cognitiva

Um relógio chamado “Contador Tempo UP” (CTUP) serve como base de tempo para todo o sistema. A cada contagem de tempo uma linha do “Arquivo Ocupação UP” é lida através do bloco “Atualiza Banda UP”, sendo essa a referência da ocupação dos UP.

Através do “Gerador US” é definido o “Tempo de Chegada” e “Tempo de Serviço” dos US que entram no sistema. Os tempos de chegada são gerados através de uma distribuição de Poisson, cujo parâmetro ‘lambda’ define o número médio de chegadas de US, sendo esse uma entrada da simulação. O tempo de serviço representa a duração em que um US permanecerá alocado em um canal de frequência e, também, é definido na entrada da simulação.

No momento da chegada de um US, o bloco “Busca Canais Livres” executa um “sensoriamento” da “Banda UP+US”, procurando canais livres para alocar um novo usuário.

Um algoritmo de alocação de canais é executado para selecionar K canais a serem utilizados pelo US. Estes canais podem não ser contíguos na

frequência, uma vez que o simulador considera o uso de agregação de canais para prover a banda necessária.

Inicialmente, foi definido para a distância de agregação um limite de 40 MHz. Ou seja, canais com distância em frequência superior a 40 MHz não seriam agregados [52]. Esta restrição foi imposta devido à velocidade de amostragem dos conversores analógico-digital (A-D), sendo definida, originalmente, pelo Relatório da QinetiQ de 2006 [53]. Verificamos que em 2012 os conversores A-D possuíam velocidade de amostragem para bandas superiores a 100 MHz, e uma vez que as bandas das medições foram limitadas a 100 MHz, conforme descrito no capítulo 3, concluímos que devido a esses fatores o limite de distância de agregação poderia ser desconsiderado para todas as simulações deste trabalho.

O primeiro esquema de alocação de canais implementado foi a busca aleatória de canais livres, em uma versão inicial do simulador. Nos estudos de parâmetros e desempenho do capítulo 5, outros dois esquemas de busca de canais são apresentados e são realizadas avaliações de desempenho do sistema em função desses.

Uma premissa dessa simulação é que o sensoriamento é realizado em um modelo do tipo cooperativo, no qual um histórico da condição dos canais é mantido pela radiobase e pode ser utilizado no cálculo de estatísticas dos canais para alocação do usuário.

Caso encontre canais livres, será disparado o bloco “Ocupa K Canais” que realizará 3 ações:

- (i) Solicita ocupação dos canais na “Banda UP+US” através do bloco “Atualiza Banda UP+US”;
- (ii) Inicia “Contador Tempo de Serviço” para aquele US;
- (iii) Incrementa o “Contador Throughput”.

Caso “Busca Canais Livres” não encontre canais suficientes para prestar o serviço, o “Contador Bloqueio” será incrementado.

O “Contador Tempo de Serviço” (CTS) inicia um contador distinto com o valor do “Tempo de Serviço” para cada novo US que entra na “Banda UP+US”. A cada ciclo do relógio “CTUP” todos os contadores são decrementados e verificados. Quando um contador chega à zero, o tempo de serviço daquele US chegou ao fim e um comando é disparado para o bloco “Desocupa K Canais”

que solicitará a desocupação dos canais através do bloco “Atualiza Banda UP+US”.

Através das solicitações de “Ocupa K Canais” e “Desocupa K Canais” a “Banda UP+US” é atualizada e os US são servidos pelo sistema. O número K de canais define a largura de banda que será utilizada por cada US. Tanto o número K quanto a largura de banda do canal é uma definição inicial do sistema.

Uma avaliação do valor de K, que viesse a otimizar o desempenho do sistema, poderia ser desenvolvida através desse simulador, entretanto, essa avaliação foge ao escopo do presente trabalho.

A cada ciclo do relógio é realizada a comparação entre “Banda UP” e “Banda UP+US” através do bloco “Compara Bandas”. Caso não seja verificada a presença de UP em canais ocupados por US, nenhuma ação é realizada.

Caso seja verificado que um UP invadiu canais ocupados por um US, uma colisão é detectada. Neste caso, o “Contador Terminação Forçada” é incrementado e o bloco “Zera US no CTS” é disparado.

O bloco “Zera US no CTS” irá realizar duas ações:

- i. Zerar o contador de tempo do US que sofreu a colisão no bloco “Contador Tempo Serviço”. Este último irá disparar, no próximo ciclo do relógio, a desocupação dos canais;
- ii. Decrementar o “Contador Throughput”, uma vez que a US que sofreu colisão teve seu serviço interrompido, essa comunicação não deverá ser contabilizada para o cálculo do throughput.

A simulação é executada 100 (cem) vezes em função da taxa de chegadas do US, gerando valores dos parâmetros de desempenho para as taxas utilizadas. Esses valores são plotados em um gráfico e, a partir desses pontos, uma curva de ajuste polinomial é traçada.

Segue abaixo uma descrição dos parâmetros de desempenho da saída do simulador e um exemplo dos gráficos desses parâmetros mostrado na Figura 4.11.

- **Vazão:**  
Mostra o número de vezes que a radiobase cognitiva conseguiu prover serviço aos US que entraram no sistema.

- Terminação Forçada:**  
 Mostra o número de vezes que a radiobase cognitiva teve que interromper o serviço de um US devido à entrada de um UP no(s) canal(is) de frequência(s) que provia o serviço.
- Bloqueio:**  
 Mostra o número de vezes que a radiobase cognitiva não pode atender um US que chegou ao sistema devido a não existência de canais de frequência para prover o serviço.

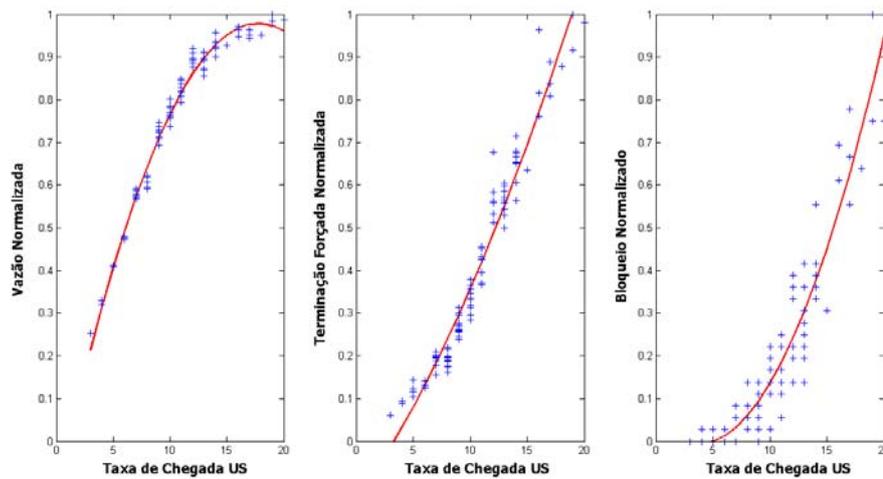


Figura 4.11. Parâmetros de Desempenho do Simulador.

## 5

# Estudo das Oportunidades de Espectro para Uso de Sistemas Rádio Cognitivo

O capítulo 5 apresenta dois estudos que satisfazem o segundo e terceiro objetivo deste trabalho, mencionados no capítulo um. O primeiro estudo é uma avaliação do desempenho das faixas de frequências para utilização de sistemas rádio cognitivo. O segundo estudo trata sobre a melhor utilização das oportunidades de espectro para faixas de frequência fragmentadas.

Para o primeiro estudo, dois esquemas de alocação de canais são desenvolvidos através de um modelo de cadeia de Markov de dois estados. O modelo e esquemas de alocação de canais são utilizados no simulador para realizar uma avaliação comparativa das faixas de frequências em termos de sua qualidade para utilização por um sistema oportunístico. Essa avaliação é possível devido à utilização das medições de ocupação espectral como Usuário Primário no simulador. Assim sendo, o desempenho do sistema rádio cognitivo corresponde ao desempenho da faixa de frequência para uso desse tipo de sistema. A avaliação comparativa é desenvolvida através do cálculo da eficiência espectral do sistema para todas as faixas de frequências.

O segundo estudo é motivado pela identificação do impacto negativo da fragmentação no desempenho das faixas de frequência. A perda associada à utilização de canais em uma faixa fragmentada justificou uma investigação sobre a utilização de larguras variáveis. Um novo modelo bi-dimensional de “White Spaces” foi proposto para ser empregado em um esquema de alocação de larguras de banda variáveis. Este esquema de alocação, denominado bi-dim, foi testado em faixas de frequência fragmentadas e comparado com o desempenho do esquema por alocação de canais. Os resultados da comparação são avaliados no contexto da tese de melhor utilização de faixas de frequência fragmentadas com sistemas baseados em largura variável.

## 5.1

### Modelo de Ocupação do Usuário Primário

O estudo assume que a ocupação de canais pelos Usuários Primários (UP) é um processo estocástico que pode ser modelado como uma cadeia de Markov de dois estados, sendo o estado ocupado identificado como ON ou 1 e o estado não ocupado como OFF ou 0.

O tempo de ocupação dos UP é contínuo, entretanto, é possível segmentar esse tempo em pequenos “Time Slots”, os quais são referenciados como “mini-slots” [56] [57]. Assim, o tempo de ocupação pode ser tratado como um modelo discreto da cadeia de Markov. A Figura 5.1 ilustra esse procedimento.

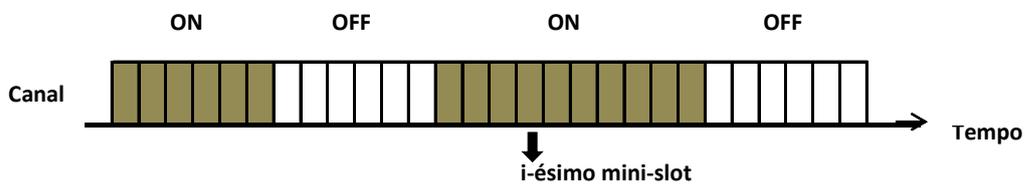


Figura 5.1. Segmentação do tempo para modelo discreto da cadeia de Markov.

Assumindo que os tempos de chegada e saída do usuário primário sejam independentes, então o diagrama de transição de estados on-off da figura 5.2 pode ser utilizado como modelo.

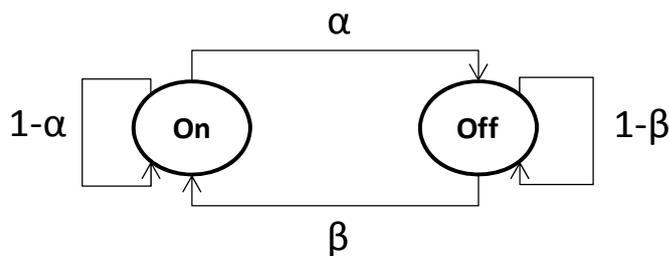


Figura 5.2. Diagrama de transição de estados – modelo Gilbert-Elliot.

As probabilidades de transição dos estados serão  $\alpha$  para transição de ON para OFF e  $\beta$  para transição de OFF para ON. Assim, a probabilidade de manter-se no estado ON será  $(1 - \alpha)$  e no estado OFF será  $(1 - \beta)$ .

Designando  $T_B$  como o somatório do tempo em que o canal se encontra no estado ON e  $T_I$  o somatório do tempo no estado OFF, pode-se calcular o total de

“mini-slots” em cada estado  $S_B$  e  $S_I$ , utilizando  $\delta$  como tempo de um “mini-slot”.

Assim sendo, temos:

$$S_B = \frac{T_B}{\delta} \quad (5.1)$$

e

$$S_I = \frac{T_I}{\delta} \quad (5.2)$$

Da mesma forma, designando  $\mu$  o número de transições do estado ON para OFF e  $\lambda$  o número de transições do estado OFF para ON, pode-se calcular as probabilidades de transição como:

$$\alpha = \frac{\mu}{S_B} \quad (5.3)$$

e

$$\beta = \frac{\lambda}{S_I} \quad (5.4)$$

Através das estatísticas dos canais de frequência e das fórmulas 5.1 a 5.4, é possível conhecer esses parâmetros do modelo de ocupação.

## 5.2

### Modelo de Ocupação do Usuário Secundário

O estudo assume que a ocupação de canais pelo Usuário Secundário (US) é desenvolvida através de um sistema rádio cognitivo centralizado no qual uma radiobase cognitiva realiza os procedimentos de sensoriamento e alocação dos canais de frequência para os US conectados no sistema.

O sensoriamento é cooperativo e processado centralizadamente. Assim, a radiobase cognitiva recebe as informações de sensoriamento do espectro de cada US e analisa, estatisticamente, a ocupação dos canais de frequências dos UP para definir a alocação dos canais.

Quando a radiobase cognitiva recebe uma requisição de um canal de comunicação do US, ela executa seu algoritmo de alocação de canal que avalia

o melhor canal de frequência para essa requisição. O US é, então, informado sobre qual canal deve utilizar e inicia sua comunicação através do mesmo.

Durante a comunicação, poderá ocorrer a entrada de um UP no canal de comunicação em uso pelo US. Neste caso, o canal deve ser desocupado pelo US que deve retornar ao início do procedimento.

### 5.2.1

#### Esquemas de alocação de canal

A radiobase cognitiva realiza uma alocação de canal para cada requisição feita pelo US. Utiliza, para isso, as informações estatísticas de sensoriamento dos canais de frequências que permitirão calcular os parâmetros do modelo de alocação do UP.

Utilizando esse modelo, a radiobase pode avaliar qual canal possui a menor probabilidade de ocupação, bem como, o tempo médio de não ocupação do canal. Esta avaliação é utilizada para selecionar o canal, no intuito de reduzir a probabilidade de uma ocupação durante a utilização do canal pelo US.

Sabendo que  $(1-\beta)$  é a probabilidade de transição que mantém o canal no estado OFF e calculando o número médio de “mini-slots” em OFF ( $\tau_I$ ) no período de tempo de avaliação, pode-se calcular a probabilidade de um canal estar no estado OFF ( $\rho$ ) em um certo instante de tempo, na janela de tempo de avaliação, pela fórmula [56]:

$$\rho = (1 - \beta)^{\tau_I} \quad (5.5)$$

Considerando que cada canal  $i$  pode possuir probabilidades de transição e número médio de “mini-slots” em OFF diferentes, então o esquema de alocação de canal da radiobase cognitiva deverá avaliar os parâmetros de cada canal, decidindo pelo canal de maior probabilidade  $\rho_i$ .

Através desse modelo e parâmetros e utilizando o simulador descrito no item 4.5.2, foram desenvolvidos três esquemas de alocação de canais. Os parâmetros de desempenho de cada esquema são apresentados nos gráficos da Figura 5.3 e descritos nos itens a seguir.

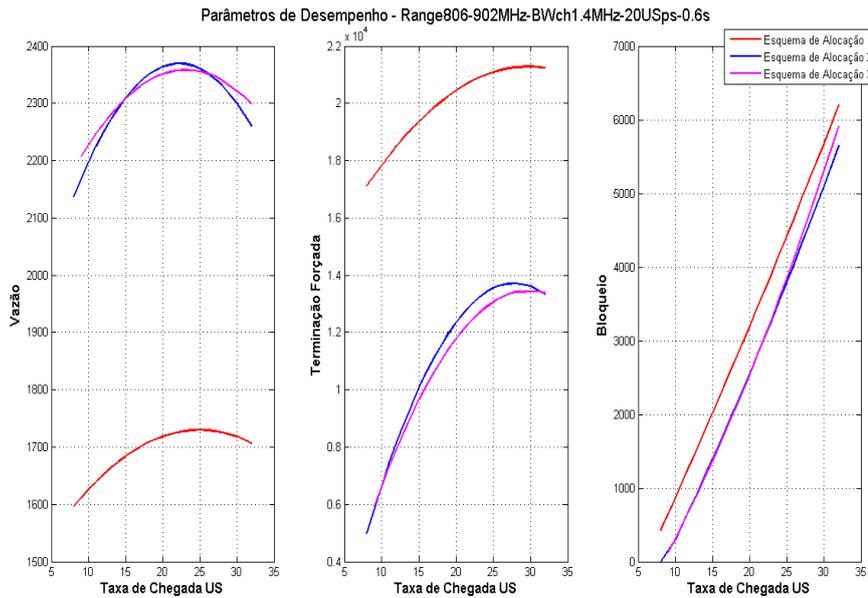


Figura 5.3. Avaliação de desempenho dos esquemas de alocação de canais.

### 5.2.1.1

#### Alocação aleatória

O 1º esquema de alocação de canais desenvolvido foi o aleatório cujo desempenho é mostrado nas curvas de cor vermelha na Figura 5.3.

Nesse esquema, a busca dos canais inicia em uma posição aleatória da lista de canais disponíveis e prossegue na direção do fim da lista até encontrar os K canais solicitados ou até encontrar o fim da lista. Neste último caso, a busca recomeça no início da lista e prossegue até encontrar os K canais solicitados ou até encontrar a posição aleatória inicial.

Esse esquema de alocação é simples e ineficiente, pois não faz uso do conhecimento do histórico de estados dos canais. É usado como uma referência para outros esquemas desse estudo.

### 5.2.1.2

#### Alocação pela maior média de seqüências OFF

O 2º esquema de alocação de canais desenvolvido foi o de maior média de seqüências OFF ( $\tau_I$ ) cujo desempenho é mostrado nas curvas de cor azul na Figura 5.3.

Nesse esquema de alocação, o histórico de sensoriamento dos canais é utilizado dentro de uma janela de tempo de 20 minutos. Através desse histórico, é calculada a média dos números de “slots” das sequências no estado OFF (“idle”) de cada canal. Caso não seja possível calcular a média daquele canal por falta de sequências “idle” e sendo o estado atual do canal “idle”, então o valor da média é colocado como zero. Este valor permite que o canal seja utilizado caso não existam canais com média maior. A busca de canais é realizada selecionando os K canais com maior média de sequências OFF.

A curva de vazão (“throughput”) demonstra a maior eficiência desse esquema de alocação em relação ao esquema aleatório. Uma vazão máxima do sistema de 2250 usuários foi obtida no 2º esquema, enquanto um máximo de 1750 foi servido utilizando o esquema aleatório.

A diferença significativa de mais de 500 usuários servidos é explicada pelo gráfico de terminação forçada (“forced termination”), onde as curvas invertem de posição. O segundo gráfico mostra que a curva de terminação forçada do esquema de maior média de sequências OFF está na metade do valor da curva do esquema aleatório.

A redução da terminação forçada mostra que a estatística dos canais, usada no segundo esquema, é uma informação efetiva na previsão do estado futuro dos canais. Os canais ocupados pelos usuários secundários possuem menor probabilidade de colidir com usuários primários, permitindo um aumento da vazão do sistema.

A curva de bloqueio (“blocking”) do 2º esquema mostra uma melhoria pequena em relação ao 1º. Ao atingir certo número de entradas de usuários por segundo, os canais da faixa de frequência são quase totalmente ocupados, causando bloqueios que possuem comportamentos similares nesses dois esquemas de alocação.

### 5.2.1.3

#### **Alocação pela maior probabilidade de estado OFF**

O 3º esquema de alocação de canais desenvolvido foi o de maior probabilidade de estado OFF ( $\rho$ ) cujo desempenho é mostrado nas curvas de cor magenta da Figura 5.3.

Nesse esquema de alocação, o histórico de sensoriamento dos canais, também, é utilizado dentro de uma janela de tempo de 20 minutos. Através

desse histórico, parâmetros estatísticos dos canais são calculados, conforme expressões (5.1) a (5.4). Tais parâmetros são:

- i. probabilidade de transição do estado OFF para ON ( $\beta$ )
- ii. média do números de “slots” das sequências OFF ( $\tau_I$ ).

Os parâmetros acima são utilizados para calcular a probabilidade de estado OFF dos canais, conforme expressão (5.5). Caso não seja possível calcular a probabilidade de estado OFF de um canal por falta de sequências “idle” e sendo o estado atual do canal “idle”, então o valor da probabilidade é colocado como zero. Este valor permite que o canal seja utilizado caso não existam canais com probabilidade maior. A busca de canais é realizada selecionando os K canais com maior probabilidade de estado OFF.

A curva de vazão (“throughput”) demonstra que a eficiência desse esquema é bem próxima do 2º esquema, havendo uma pequena perda de vazão na região central. Após o máximo da curva de vazão, verifica-se que a eficiência do 3º esquema aumenta, apresentando vazão um pouco maior que a do 2º esquema.

A robustez do esquema de maior probabilidade de estado OFF para altas taxas de chegada de US, também, é demonstrada na curva de terminação forçada (“forced termination”), bastando observar que essa curva aumenta sua distância da curva do 2º esquema nas taxas de chegada de US (“arrival rate SU”) mais altas, ou seja, apresenta redução da terminação forçada nas taxas altas.

A curva de bloqueio (“blocking”) apresenta-se muito similar em relação à curva do 2º esquema.

#### 5.2.1.4

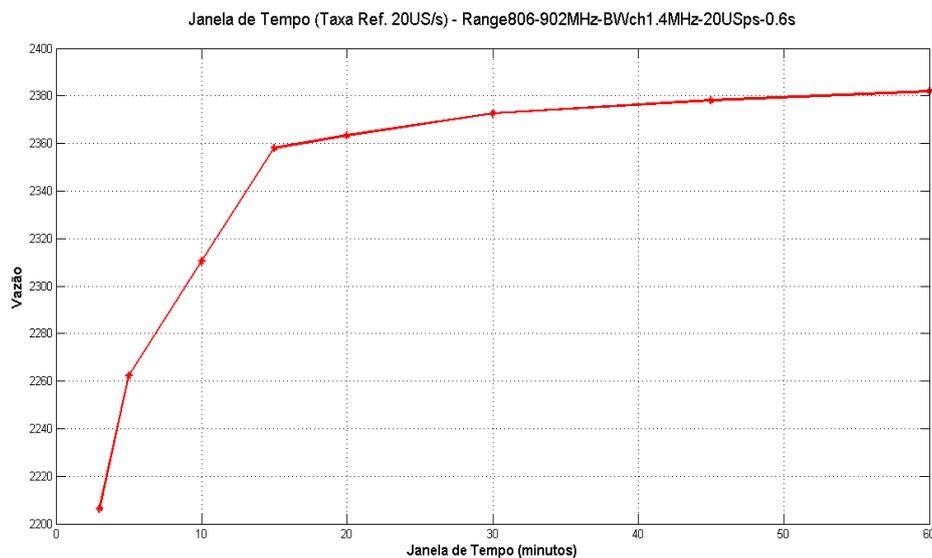
##### **Estudo da janela de tempo**

A avaliação dos esquemas de alocação de canais foi baseada na estatística dos canais dentro de uma janela de tempo de 20 minutos, utilizando o histórico de sensoriamento dos canais.

O tamanho dessa janela influencia, diretamente, a seleção dos canais. Uma estatística que obtenha melhores resultados na seleção de canais e,

consequentemente, melhor vazão, dependerá da dinâmica dos canais na faixa de frequência.

Um estudo sobre a janela de tempo foi realizado, avaliando o desempenho em termos de vazão para janelas de 3, 5, 10, 15, 20, 30, 45 e 60 minutos. Para esse estudo, utilizou-se como referência o esquema de alocação de canais pela maior média de sequências OFF e a vazão calculada para uma taxa de chegada igual a 20 usuários por segundo que é o mesmo valor da média da distribuição de Poisson utilizada. O resultado pode ser visto na Figura 5.4.



**Figura 5.4. Estudo da Janela de Tempo**

O gráfico da Figura 5.4 mostra que a curva de vazão apresenta melhor desempenho à medida que a janela de tempo aumenta.

A janela de 3 minutos mostra-se como a de pior desempenho. Essa vazão reduzida mostra que não há suficiente informação sobre as sequências “idle” para obter uma estatística dos canais que aumente a eficiência da seleção.

A vazão aumenta assintoticamente com o aumento do tempo da janela, isso demonstra que a maior quantidade de informação dos canais melhora a estatística das sequências “idle”. Entretanto, além de certo limite, o aumento dessa informação não representa um ganho significativo na vazão.

A utilização de valores altos da janela de tempo pode não ser vantajoso, uma vez que uma mudança na dinâmica do canal pode não ser percebida devido a grande quantidade de informações. Outros fatores importantes são a quantidade de dados armazenados e o tempo de processamento.

Assim sendo, buscamos avaliar uma faixa útil da janela de tempo. Considerando uma assíntota no valor da vazão em 2380 e estimando uma faixa dentro de 1% do valor da assíntota, uma faixa útil de janelas de tempo entre 15 e 30 minutos poderia ser utilizada sem perda significativa da eficiência na seleção dos canais e, também, na vazão.

### 5.2.1.5

#### Estudo comparativo

Existe uma grande diferença entre trabalhos publicados [56] [57] [59] [5] sobre esquemas de alocação de canais e o presente trabalho. No melhor conhecimento do autor, os trabalhos que apresentam simulações sobre este tema apresentam usuários primários e secundários gerados através de distribuições conhecidas, tais como Poisson e/ou exponencial. Por outro lado, o presente trabalho apresenta uma simulação cujo usuário primário é “real”, ou seja, é obtido através de medições de ocupação espectral realizadas em campo.

Para desenvolver um estudo comparativo de um trabalho cujo esquema de alocação de canais foi realizado com geração de UP através de distribuições de Poisson e/ou exponencial, torna-se necessário criar arquivos com essas distribuições e converter parâmetros e dados para as mesmas unidades,. entretanto, de acordo com o modelo do sistema e do esquema de alocação utilizado, a comparação pode não apresentar resultados tão próximos.

Utilizando a referência [59], selecionamos o esquema de alocação “CCA with HO” (“constant channel aggregation with handover”) para realizarmos um estudo comparativo.

No esquema CCA, o sistema é modelado como uma cadeia contínua de Markov onde os estados são definidos pelo número de UP e US que ocupam canais no sistema. O sistema possui M canais primários. Um US utiliza K vezes a largura de banda do UP, ou seja, K canais. As taxas de chegadas dos UP e US assumem uma distribuição de Poisson com médias  $\lambda_P$  e  $\lambda_C$ , respectivamente. Além disso, o tempo de serviço dos UP e US assume uma distribuição exponencial com média  $1/\mu_P$  e  $1/\mu_C$ , respectivamente.

Um usuário primário seleciona seu canal aleatoriamente, entre todos os canais, enquanto um usuário secundário seleciona, aleatoriamente, apenas entre canais não usados. Quando um UP inicia transmissão em um canal em uso por um US, este último é imediatamente deslocado para outro canal não usado.

O trabalho descreve o diagrama de transição de estados e calcula através dele os parâmetros de saída vazão (T), probabilidade de terminação forçada ( $P_F$ ) e probabilidade de bloqueio ( $P_B$ ). Os dados utilizados na simulação são mostrados na Tabela 5.1.

**Tabela 5.1. Dados da simulação “CCA with HO”**

Parâmetro	Valor
Taxa de chegada UP ( $\lambda_p$ )	1.2
Taxa de chegada US ( $\lambda_c$ )	variável
Taxa de serviço UP ( $\mu_p$ )	0.45
Taxa de serviço US ( $\mu_c$ )	5
Número de canais (M)	12
Número de canais US (K)	2

Após introduzir os conceitos do modelo da simulação “CCA with HO”, mostraremos como o simulador desenvolvido foi adaptado para essa comparação.

O simulador utiliza um arquivo de canalização (\*\_ch.mat) como entrada. Um arquivo canalizado com 12 canais foi gerado a partir das medições da faixa de frequência de 2300-2400 MHz. Esse arquivo foi modificado apenas na parte referente à ocupação, utilizando uma taxa de chegada e tempo de serviço definida pelas distribuições de Poisson e exponencial, respectivamente, com os parâmetros da Tabela 5.1. O tempo de serviço foi limitado a 10 vezes a média da distribuição exponencial, reduzindo tempos altos de serviço que ultrapassavam o tempo total de medição.

Uma versão do simulador com alocação de canais contíguos para US foi desenvolvida. O esquema de alocação de canais aleatório (“Esquema de Alocação 1”) foi utilizado como equivalente ao da simulação “CCA with HO”. Após executada a simulação, os resultados salvos serviram de entrada para o “software” “ComparaDesempenhoArquivoCCA” que plota e converte os parâmetros nas unidades utilizadas na simulação do esquema “CCA with HO”. Os gráficos comparativos são mostrados na Figura 5.5.

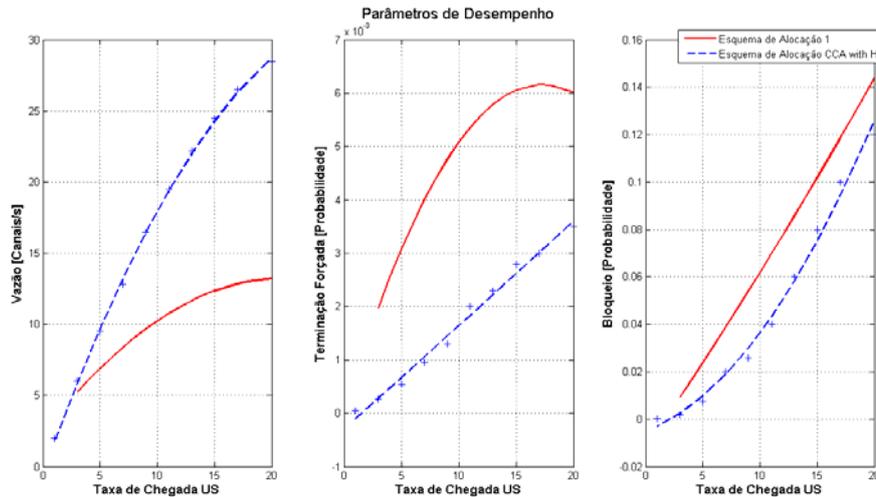


Figura 5.5. Comparativo Esquemas de Alocação de Canais.

As curvas pontilhadas representam o esquema de alocação de canais “CCA with HO” e as curvas cheias o esquema de alocação 1 visto na seção 5.2.1.1.

Pode-se notar que as curvas de probabilidade de bloqueio estão próximas com o esquema 1 acima, aproximadamente, 2% do esquema “CCA with HO” para uma mesma taxa de chegada US.

As curvas de probabilidade de terminação forçada apresentam uma maior separação nas taxas de chegada mais altas. O máximo ocorre próximo da taxa de 17 US/s, apresentando uma separação de, aproximadamente, 0.3% neste ponto.

As curvas de vazão quase se encostam à taxa de chegada mais baixa e se distanciam nas taxas mais altas. Este comportamento pode ser reflexo da diferença de probabilidade citada para terminação forçada.

As diferenças observadas nas curvas estão relacionadas à comparação entre um modelo que utiliza distribuições teóricas para outro desenvolvido para utilizar a realidade da ocupação das faixas de frequências. Por exemplo, a limitação citada, anteriormente, sobre o tempo de serviço ser mantido em até 10 vezes a média da distribuição exponencial para não ultrapassar o tempo total de medição, possui alto impacto nos resultados, em especial, nas taxas mais altas de US. Apesar disso, os resultados apresentam-se dentro da mesma ordem de grandeza e aproximam-se, demonstrando haver consistência.

### 5.3

#### Avaliação das Faixas de Frequências pela Eficiência Espectral

O modelo e esquemas de alocação de canais, desenvolvidos nas seções anteriores, geraram as ferramentas necessárias para realizar uma avaliação comparativa das faixas de frequências em termos de sua qualidade para utilização por um sistema oportunístico com acesso DSA.

Para realizar essa avaliação, utilizamos a eficiência espectral por canal do sistema rádio cognitivo simulado, calculada para todas as faixas de frequências.

A eficiência espectral pode ser definida como a taxa que pode ser transmitida através de uma dada largura de banda de um sistema de comunicação específico, calculada em bit/s/Hz.

Para configurar uma eficiência espectral no sistema simulado, buscou-se adotar uma referência de taxa de dados de um sistema que utilize um esquema de modulação OFDM, uma vez que essa modulação é apropriada para agregação de canais de sistemas oportunísticos.

A referência adotada foi o padrão LTE que possui diversas larguras de banda, desde 1.4 MHz até 20 MHz. Utilizando a eficiência espectral de 1.74 bit/s/Hz para largura de 1.4 MHz no “downlink” do padrão LTE “release” 8 [58], podemos calcular a taxa de referência para um canal de 1 MHz como sendo 1.740 Mb/s.

Na Tabela 5.2 são apresentados os parâmetros utilizados nas simulações.

**Tabela 5.2. Parâmetros da simulação**

Parâmetro	Valor
Esquema de alocação de canais	Maior média de sequências OFF
Largura dos canais	1 MHz
Janela de tempo	30 minutos
Média da taxa de chegada	20 US/s
Tempo de serviço	0,6 segundo
Taxa de Dados	1.740 Mb/s

A Figura 5.6 mostra, para cada faixa de frequência medida, o valor da ocupação nas barras largas e da eficiência espectral por canal nas barras estreitas.

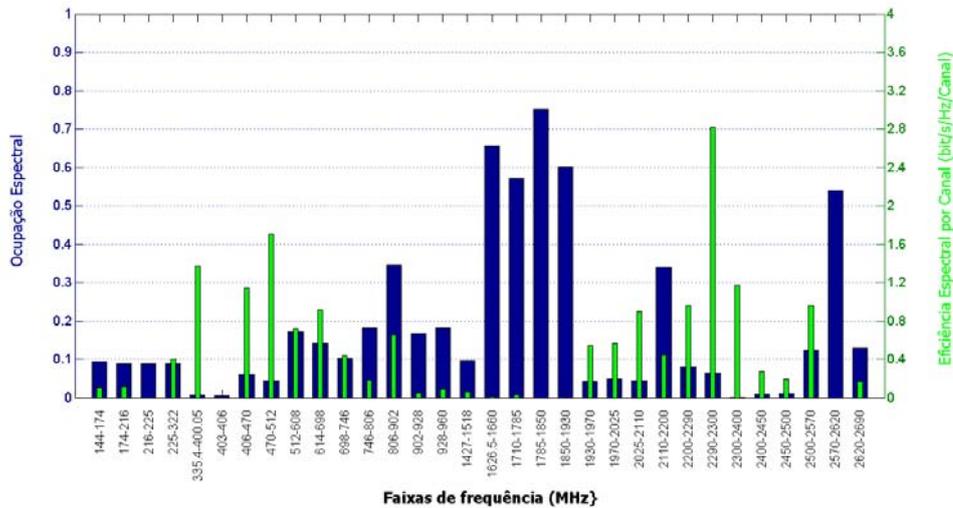
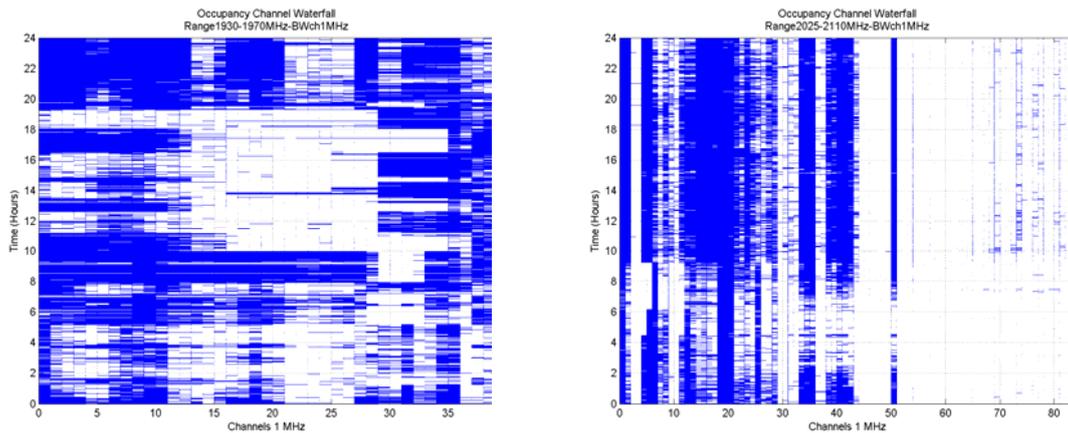


Figura 5.6. Ocupação x Eficiência Espectral

É intuitivo o conceito de que quanto maior a ocupação, menor será a eficiência espectral de um sistema rádio cognitivo e vice-versa. Isso é notado nas faixas com alta ocupação e eficiência próxima de zero na região central do gráfico e, também, nas faixas com alta eficiência e baixa ocupação. Observa-se, entretanto, que existem faixas de frequência com ocupações similares e eficiências discrepantes. Destacamos os conjuntos de faixas abaixo, nas quais a última faixa do conjunto se destaca pela maior eficiência espectral em relação as outras.

- 144-174, 174-216, 216-225 e 225-322 MHz
- 1930-1970, 1970-2025 e 2025-2110 MHz

Comparando os gráficos “waterfall” de ocupação de canais dessas faixas, conforme exemplo das faixas 1930-1970 MHz e 2025-2110 MHz da Figura 5.7, observa-se uma grande fragmentação na primeira, caracterizada por grande espalhamento da ocupação, enquanto, na segunda, a ocupação se apresenta mais ordenada, permitindo distinguir visualmente um padrão de ocupação dos canais de 1 MHz. Constata-se que a fragmentação concorre para menor eficiência espectral, em outras palavras, menor vazão por Hertz de um sistema rádio cognitivo.



**Figura 5.7. Gráficos “waterfall” de ocupação de canais das faixas 1930-1970 e 2025-2110 MHz.**

A canalização empregada, em uma faixa de frequência, permite evitar interferências co-canal e limitar interferências de canal adjacente dos sistemas de comunicação que a empregam. Assim, através de um planejamento de frequências é possível compartilhar a faixa entre um grande número de transceptores.

A utilização de sistemas rádio cognitivos permite adotar novos conceitos em termos de utilização do espectro. O acesso oportunístico faz uso de porções do espectro de larguras variáveis e descontínuas. Nesse contexto, utilizar uma canalização para um sistema oportunístico pode causar perdas de banda sem fornecer contrapartida em redução de interferências.

Um sistema rádio cognitivo, cuja faixa seja canalizada, pode ter aumentada a fragmentação da faixa. Uma vez que um canal que esteja apenas parcialmente ocupado, ele será considerado ocupado em toda sua largura. Essas ocupações fracionárias podem resultar em uma significativa banda indisponível para o sistema, como é demonstrado no exemplo da Figura 5.8.

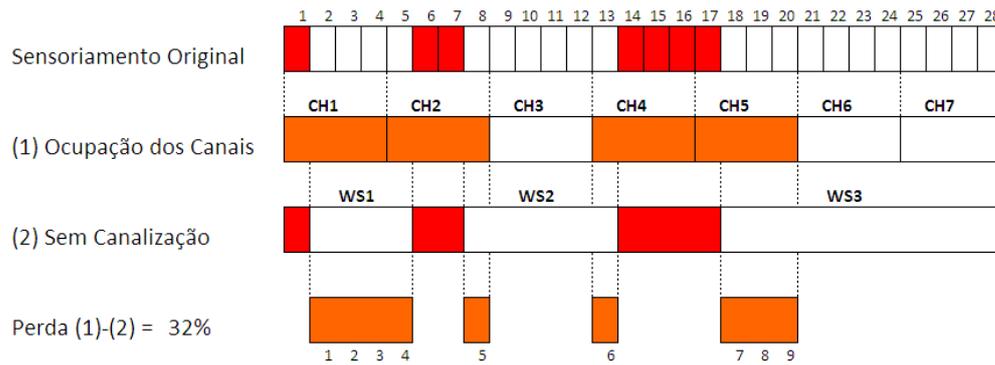


Figura 5.8. Perdas devido à canalização de um sistema rádio cognitivo.

Por outro lado, utilizar uma largura de banda maior em um sistema do tipo DSA pode significar uma maior probabilidade de colisão, aumentando a quantidade de terminação forçada e diminuindo a vazão do sistema.

Observando os aspectos apontados, desenvolvemos um estudo de um modelo bi-dimensional de “white spaces” que permitisse ser empregado como esquema de alocação de canais e avaliasse o desempenho do sistema, fazendo uso de larguras de frequência variáveis.

## 5.4

### Modelo Bi-dimensional de “White Spaces”

Uma questão prioritária para uma rede de rádios cognitivos é a busca e seleção de oportunidades no espectro para ser utilizada pelo sistema. Para esse modelo, uma oportunidade será considerada como um “White Space” (WS) que não está limitado por uma canalização e está caracterizado, neste estudo, pela sua largura na frequência e duração no tempo.

A primeira característica, a largura de banda, é crucial para a vazão do sistema. A relação entre banda e capacidade demonstrada pelo teorema de Shannon-Nyquist, citado na introdução deste trabalho, demonstra essa associação.

A segunda característica, duração, é crucial para minimizar o “handoff” espectral. “Handoff” espectral pode ser definido como a migração do sistema de uma banda de frequência para outra. Em geral, essa migração é forçada por 2 motivos principais:

- Aparecimento de um usuário primário (UP) no canal em uso pelo usuário secundário (US), ou seja, interferência co-canal;
- Degradação do canal que inviabilize a utilização do mesmo. A degradação é, geralmente, causada pelo aumento da interferência de canal adjacente provocada por transmissores que emitem espúrios dentro do canal em uso.

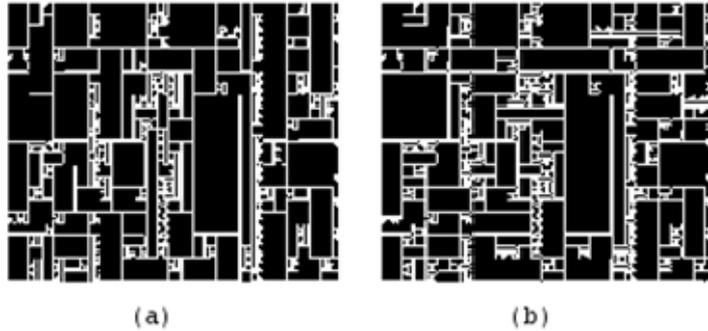
Para o escopo desse estudo, será considerado apenas o “handoff” espectral devido ao aparecimento de usuário primário no canal.

Considerando que os WS alteram sua largura e duração de acordo com as alterações de ocupação sofridas na faixa de frequência, uma avaliação bi-dimensional dos WS irá requerer agrupar espaços em branco adjacentes para formar um bloco retangular contíguo de maior largura e duração.

Espaços em branco de uma faixa de frequência podem ser agrupados de diferentes formas para se tornar um WS, dependendo de qual dimensão seja enfatizada. Agrupando espaços, preferencialmente na dimensão tempo, serão gerados WS com maiores alturas; agrupando na dimensão frequência serão gerados WS com maiores larguras, considerando tempo no eixo y e frequência no eixo x.

Enfatizar tempo ou frequência depende de qual serviço será usado. Para um serviço de tempo real como voz, enfatizar tempo para selecionar WS com longa duração seria apropriado. No entanto, um navegador web, onde o tráfego é transmitido por rajada, enfatizar frequência para obter maior vazão seria melhor escolha.

Para desenvolver as funções de agrupamento de WS, foram utilizadas funções de manipulação de imagens binárias. Imagens binárias são imagens preto e branco que utilizam apenas zeros e uns, respectivamente. Neste contexto, foi importante avaliar o arranjo geométrico obtido, através de gráficos com essas imagens binárias. A visualização das imagens permitiu verificar o comportamento das funções que agrupam espaços em brancos como blocos, buscando gerar WS de maiores dimensões. Uma amostra desse tipo de imagem com marcas dos WS selecionados é mostrada na Figura 5.9.



**Figura 5.9. Imagens Binárias de WS.**  
**(a) ênfase no tempo (b) ênfase na frequência**

Verificou-se que utilizar um único critério para ênfase dos agrupamentos, ou seja, tempo ou frequência, poderia resultar em WS com áreas pequenas para algumas configurações de ocupação.

Uma função de imagem binária delimitadora de bloco permitiu definir blocos maiores em que todos os “zeros” estão conectados. Apesar de todos os “zeros” estarem conectados, ainda poderiam existir “uns” dentro desses blocos. Efetuando a quebra desses blocos maiores na linha (tempo) ou coluna (frequência) que possuísse o maior número de “uns”, foi possível criar blocos que preservavam o maior número de “zeros”. Através desse critério misto, obtivemos um aumento na área dos blocos gerados, criando WS maiores tanto em largura quanto em duração.

Uma vez definida a técnica de busca de WS, foi iniciada a caracterização estatística de WS dentro da faixa de frequência. A contagem e classificação dos WS resulta em uma probabilidade conjunta da largura de frequência ( $w$ ) e duração no tempo ( $\tau$ ).

Tomando  $n()$  como o número de elementos,  $\Omega$  como o espaço amostral e  $S()$ , como número de blocos de uma amostra, a probabilidade de um WS de largura  $W$  e duração  $T$  pode ser expressa por:

$$P_{w\tau}(W, T) = \frac{n(w, \tau)}{n(\Omega)} \quad (5.6)$$

Sendo:

$$n(w, \tau) = \sum_{i=1}^n S(w_i = W, \tau_i = T) \quad (5.7)$$

Um gráfico de densidade de WS permite identificar os WS de maior probabilidade, conforme Figura 5.10. Nesta figura, são mostrados apenas WS

com largura superior a 1 MHz, reduzindo, assim, os fragmentos que não serão usados em um sistema real.

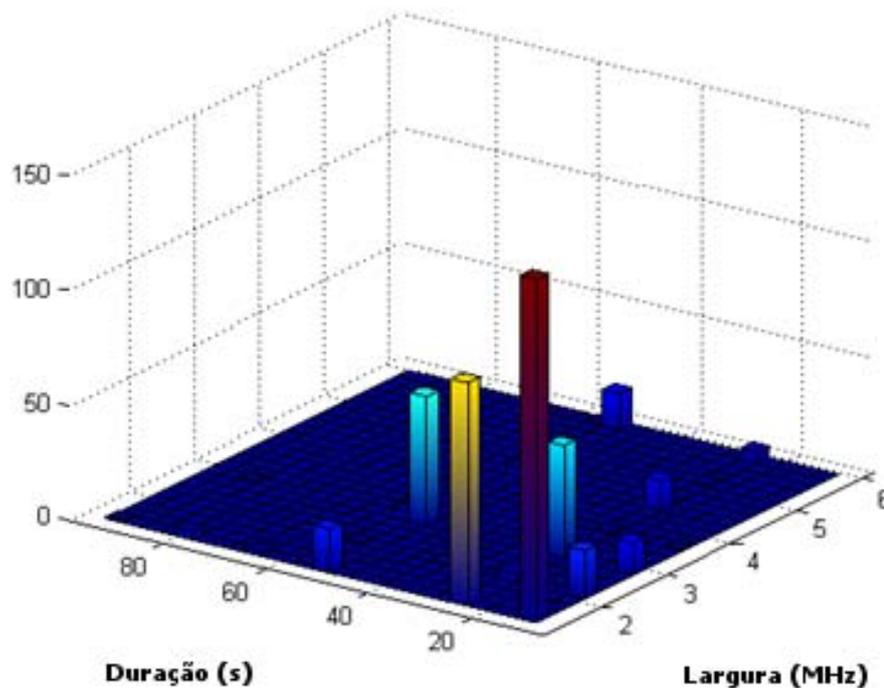


Figura 5.10. Densidade de “White Space”

#### 5.4.1

##### Esquema de Alocação Bi-dimensional de “White Spaces”

Através do modelo bi-dimensional e da técnica de busca e seleção de WS descrita, desenvolvemos um esquema de alocação de WS para utilizar na simulação das faixas de frequências.

Neste esquema, permanece inalterado o modelo de ocupação dos usuários primários descritos no item 5.1. Entretanto, o modelo de ocupação dos usuários secundários é alterado para se adaptar a utilização de WS de largura e duração variável, em vez de canais de largura fixa.

O modelo continua a utilizar um sistema rádio cognitivo centralizado no qual uma radiobase cognitiva coordena os procedimentos de sensoriamento e alocação. A diferença está no esquema de alocação que ao invés de selecionar canal, agora, seleciona WS.

O sensoriamento continua cooperativo e processado centralizadamente, sendo utilizado para analisar, estatisticamente, a ocupação dos Usuários Primários (UP) e definir a alocação do WS.

Quando a radiobase cognitiva recebe uma requisição de comunicação do US, ela executa seu algoritmo de alocação de WS que seleciona o melhor WS disponível e os parâmetros que serão utilizados. O US é, então, informado sobre esses parâmetros e inicia sua comunicação através dos mesmos.

A diferença marcante desse novo esquema de alocação está em não ser mais uma simples seleção de qual WS será usado, como no caso da alocação de canais. Após selecionar o WS atual, as informações estatísticas dos WS encontrados no histórico de sensoriamento são processadas para obter a melhor “posição inicial” e “largura” que serão utilizados na comunicação do US.

Durante a comunicação, poderá ocorrer a entrada de um UP no canal de comunicação em uso pelo US. Neste caso, o canal deve ser desocupado e o US deve retornar ao início do processo de admissão para seleção de um novo WS.

O esquema de alocação de WS pode ser ilustrado pela Figura 5.11. Nesta figura estão representados 3 WS, resultado do último sensoriamento do sistema. A partir desses WS atuais são definidas 3 janelas de tempo onde são calculados os WS ocorridos no passado e a estatística dos mesmos, conforme histórico de sensoriamento.

A busca de WS, conforme modelo bi-dimensional, é realizada dentro de cada janela de tempo, sendo calculada média e desvio padrão dos parâmetros INÍCIO, LARGURA e DURAÇÃO desses WS de cada janela. A seleção do WS atual utiliza os critérios:

- i. São excluídos todos os WS atual cuja largura é inferior a 1 MHz;
- ii. É selecionado o WS atual cuja estatística apresentou maior média e menor desvio padrão da LARGURA, menor desvio padrão do INÍCIO e maior média da DURAÇÃO, nesta ordem de prioridade.

O item (i) tem como objetivo selecionar apenas WS cujas larguras de frequência possam prover uma vazão adequada aos US.

O item (ii) tem como objetivo aumentar a vazão e reduzir a probabilidade de colisão, então, quanto mais similares forem as larguras e inícios e quanto maior for a duração dos WS no histórico de sensoriamento, menor a probabilidade de colisão.

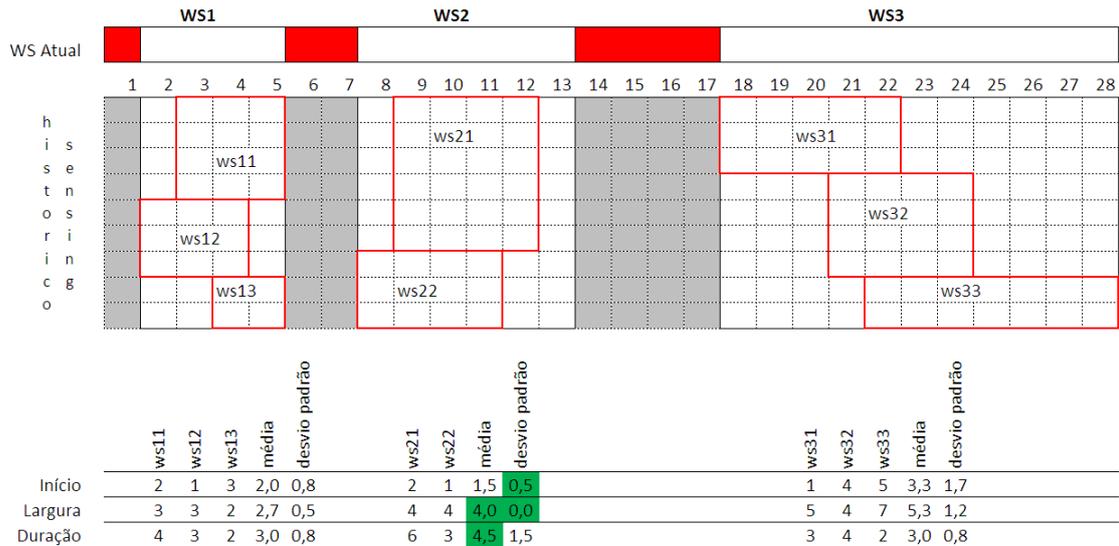


Figura 5.11. Esquema de Alocação de “White Space”.

Uma consequência do critério (ii) é que nem sempre o WS de maior largura será selecionado. De fato, no exemplo ilustrativo da Figura 5.11, o WS2 atual foi escolhido em vez do WS3 cuja largura é quase o dobro do primeiro. Isso ocorre, pois é mais importante realizar uma comunicação completa do que obter uma maior largura com alta probabilidade de interrupção por uma colisão.

Após a seleção do WS atual, o próximo passo da alocação é definir os parâmetros que serão utilizados na comunicação. Os parâmetros definem o WS que será efetivamente utilizado, sendo esses parâmetros definidos pelas médias calculadas do início e largura dos WS da janela. A duração não é utilizada como parâmetro, pois o sistema adota um tempo de serviço fixo.

Uma nova versão do simulador (simula17.m) foi desenvolvida para executar o esquema de alocação de canais bi-dimensional (bi-dim). A simulação foi realizada nas faixas de frequência que apresentaram ocupações similares e grande diferença na eficiência espectral mostradas na Figura 5.7.

Os resultados foram comparados com novas simulações realizadas com o 2º esquema de alocação de canais ("média de sequências OFF"), o mesmo esquema utilizado para calcular a eficiência espectral das faixas de frequências na seção 5.3. Na Tabela 5.3 são apresentados os parâmetros utilizados nas simulações com o esquema Bi-dim e com o 2º esquema de alocação de canais.

Tabela 5.3. Parâmetros das simulações 2º esquema e Bi-dim

Simulações		
Parâmetro	2º Esquema	Esquema Bi-dim
Esquema de alocação	Média de sequências OFF	WS Bi-dimensional
Largura dos canais	1 MHz	Variável
Janela de tempo	15 minutos	15 minutos
Taxa de chegada (média)	Poisson (20 US/s)	Poisson (20 US/s)
Tempo de serviço	0,6 s	0,6 s
Tempo de simulação	2 horas	2 horas
Agregação contígua (K)	Utilizada	Não Utilizada

A simulação do 2º esquema trabalha com canais contíguos, utilizando faixas canalizadas com canais de 1 MHz. O número de canais (K) utilizado na simulação do 2º esquema está associado ao desempenho do sistema, quanto maior o número de canais, maior a quantidade de terminações forçadas e bloqueio, conseqüentemente menor vazão. A simulação do esquema Bi-dim pode apresentar melhor ou pior desempenho comparada a simulação do 2º esquema, de acordo com o número de canais K. Na Figura 5.12, são mostrados gráficos comparativos entre o esquema Bi-dim plotado com linha tracejada e o 2º esquema plotado com linha cheia..

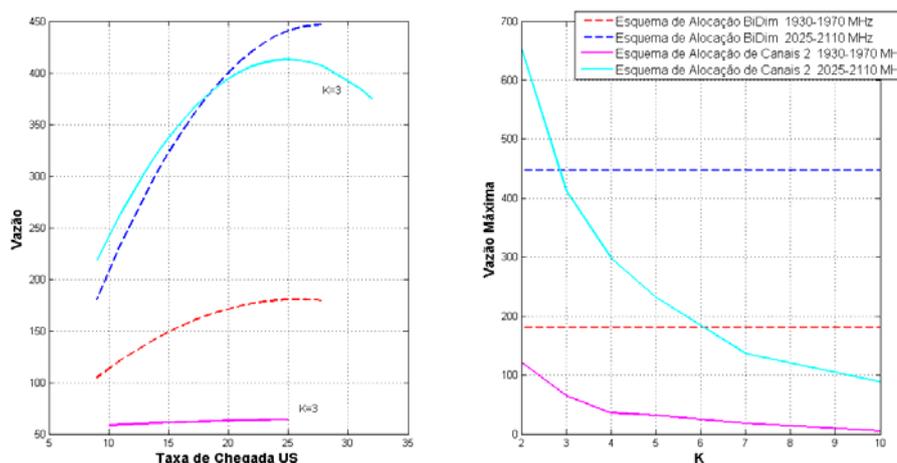


Figura 5.12. Esquemas de alocação de canais Bi-dim e Média de sequências OFF.

No primeiro gráfico, as linhas tracejadas mostram as vazões do esquema Bi-dim nas faixas de frequência 1930-1970 MHz em vermelho e 2025-2110 MHz em azul. As linhas sólidas mostram as vazões do 2º esquema, utilizando K=3,

nas mesmas faixas de frequência nas cores magenta e ciano, respectivamente. No segundo gráfico, as linhas sólidas mostram as vazões máximas do 2º esquema, variando em função de K, e nas linhas tracejadas as vazões máximas do esquema Bi-dim que utiliza WS com largura de banda variável.

Nota-se, pelos gráficos, que para a faixa 2025-2110 MHz, a partir de  $K = 3$ , o esquema Bi-dim se torna melhor que o 2º esquema, ou seja, uma largura de banda de aproximadamente 3 MHz é o limiar entre os esquemas. Para a faixa 1930-1970 MHz o esquema Bi-dim se apresenta melhor que o 2º esquema para qualquer valor de K utilizado.

Conforme seção 5.3 / Figura 5.7, a faixa 2025-2110 MHz apresenta “ocupação mais ordenada, permitindo distinguir um padrão de ocupação dos canais de 1 MHz”, enquanto a faixa 1930-1970 MHz apresenta “grande fragmentação”. Conclui-se que o esquema Bi-dim apresenta bom desempenho em faixas fragmentadas, enquanto em faixas menos fragmentadas seu melhor desempenho é definido a partir de um limiar de largura de banda.

## 6

### Conclusões

Esta dissertação abordou as medições de ocupação do espectro radioelétrico, no contexto de sua utilização para sistemas rádio cognitivo, e desenvolveu uma metodologia de medição, processos e “software” de análise, estratégias e modelos para avaliação da ocupação. Foi realizada uma avaliação da ocupação do espectro radioelétrico para uma banda larga de frequências de uma cidade brasileira.

Foi desenvolvido um simulador de rádio cognitivo que utiliza medições de ocupação do espectro para caracterizar a atividade dos usuários primários. Esta abordagem permitiu realizar uma avaliação da qualidade de diferentes faixas de frequências para uso oportunístico. Além disso, foram desenvolvidos esquemas de alocações de canais que utilizam estatísticas das medições e um esquema de alocação de “white spaces” desenvolvido para melhor utilização de faixas de frequência fragmentadas.

No Capítulo 1, foram apresentadas as motivações do trabalho, em especial a escassez espectral que motiva o uso oportunístico do espectro.

No Capítulo 2, foram introduzidos os conceitos regulatórios do uso do espectro, sua organização, gerenciamento e compartilhamento. Foram tratados os aspectos mais importantes do conceito de Acesso Dinâmico do Espectro e o atual estágio da regulação para ocupação oportunística.

A tecnologia de rádios cognitivos foi discutida e introduzido o conceito de Rádio Definido por “Software”. Técnicas cognitivas de sensoriamento e banco de dados de geolocalização foram abordadas, sendo detalhadas as técnicas de sensoriamento por detecção de energia, detecção cicloestacionária, detecção por filtro casado e sensoriamento cooperativo. Por fim, o tema padrões internacionais foi tratado, destacando-se o padrão IEEE 802.22 que foi o primeiro a utilizar tecnologia de rádio cognitivo.

O Capítulo 3 apresenta o estudo dos aspectos metodológicos aplicados à campanha de medição de ocupação espectral em andamento. Esse estudo aborda a definição das bandas de frequências, a caracterização do ambiente de teste e a especificação do “setup” de medição.

É discutida, também, a abordagem estatística e definidos os parâmetros utilizados para garantir a exatidão e o nível de confiança requerido. O estudo

metodológico aborda, ainda, aspectos relacionados às configurações de tempo e frequência do equipamento de medição e da definição do limiar.

No Capítulo 4 o processo de medição é descrito, associando a cada fase do processo as ferramentas de “software” desenvolvidas. Estas ferramentas foram descritas, indicando-se suas principais características, entradas e saídas, e os conceitos associados a seus resultados. Na fase de análise são descritas as principais métricas da ocupação espectral, resumidas nos gráficos “duty cycle” e “waterfall”. *O resultado consolidado da ocupação de todas as faixas de frequência é apresentado como uma das principais contribuições deste trabalho, pois representa uma das primeiras avaliações da ocupação do espectro radioelétrico para uma banda larga de frequências em uma cidade brasileira.*

Ainda no Capítulo 4, o simulador de um sistema rádio cognitivo é descrito em detalhes. O principal destaque da simulação está na utilização dos arquivos de medição de ocupação como usuários primários (UP) do sistema. *No melhor conhecimento do autor, a utilização de medições de ocupação como UP é uma inovação na simulação e avaliação espectral, pois essa abordagem permite que o desempenho do sistema simulado possa ser, também, uma avaliação qualitativa da faixa de frequência para uso de um sistema oportunístico.*

Por fim, o Capítulo 5 desenvolve modelos e esquemas de alocação para uma avaliação do desempenho das faixas de frequências para utilização de sistemas rádio cognitivo, bem como um modelo e esquema bi-dimensional de “white spaces” que visa a melhor utilização das oportunidades de espectro para faixas de frequência fragmentadas.

Os esquemas de alocação de canais pela “média de sequências OFF” e “probabilidade de estado OFF” foram desenvolvidos através de um modelo de cadeia de Markov de dois estados. Esses esquemas definem o melhor canal, utilizando estatísticas do histórico de sensoriamento dentro de uma janela de tempo. Um estudo sobre a janela de tempo foi realizado visando definir uma faixa útil para essa janela.

Os resultados da simulação com os esquemas citados foram validados através de um estudo comparativo com o esquema de alocação de canais “constant channel aggregation with handover”. O artigo desse esquema apresenta simulações onde Usuários Primários (UP) e Usuários Secundários (US) são gerados através de distribuições de Poisson e exponencial. Por outro lado, o presente trabalho apresenta uma simulação cujo usuário primário é “real”, ou seja, é obtido através de medições de ocupação espectral realizadas em campo. Devido a essa diferença, foi necessário gerar arquivos de entrada com

as distribuições citadas e converter parâmetros e dados para as mesmas unidades do artigo. Apesar dessas diferenças de abordagem, os resultados se apresentaram aproximados, permitindo validar a simulação utilizada neste trabalho.

O modelo e esquemas de alocação de canais desenvolvidos permitiram criar as ferramentas necessárias para realizar uma avaliação comparativa das faixas de frequências em termos de sua qualidade para utilização por um sistema oportunístico. Essa avaliação foi realizada, utilizando a eficiência espectral do sistema rádio cognitivo simulado que foi calculada para todas as faixas de frequências. Verificou-se o impacto negativo da fragmentação no desempenho da faixa de frequência. A perda associada à canalização de uma faixa fragmentada justificou uma investigação sobre a utilização de larguras variáveis no esquema de alocação.

Um novo modelo bi-dimensional de “white spaces” (WS) foi proposto para ser empregado em um esquema de alocação que permita fazer uso de larguras de banda variáveis e para ser testado em faixas de frequência com maior nível de fragmentação. Nesse modelo, um WS é caracterizado pela sua largura na frequência e duração no tempo, sendo avaliada a probabilidade conjunta da largura e duração, definindo, assim, uma densidade de WS de maior probabilidade com largura mínima de 1 MHz.

O esquema de alocação bi-dimensional (bi-dim) desenvolvido utiliza uma estatística dos WS que estão dentro dos WS atuais. Estes últimos são os WS existentes no momento da chegada de um novo US. Os WS são contabilizados através de funções de imagens binárias. A média e desvio padrão do início, largura e duração são usados para seleção do WS atual e dos parâmetros utilizados na definição do canal de transmissão.

A simulação do esquema bi-dim é comparada com a simulação do esquema da “média de sequências OFF”. Este último utiliza um número de canais (K) contíguos e canalização de 1 MHz. Os resultados demonstraram que o esquema bi-dim apresenta desempenho superior para qualquer valor de K em faixas mais fragmentadas, enquanto em faixas menos fragmentadas seu desempenho é superior a partir de certo limiar de valor de K. No exemplo da faixa utilizada, esse limiar foi  $K=3$ , ou seja, o modelo bi-dim apresentou-se superior a partir de larguras de canal de 3 MHz. Tal resultado comprova a tese de melhor utilização de faixas de frequência fragmentadas com sistemas baseados em largura variável com estatística de WS dentro dos referidos limites.

Como continuidade deste trabalho, temos programada a continuação da campanha de medição em outros locais da cidade do Rio de Janeiro com características de ambiente do tipo urbano e densamente urbano. Recomenda-se, como trabalho futuro, um estudo comparativo das ocupações dos ambientes rural, urbano e densamente urbano. Propõe-se ainda uma avaliação do valor de K, número de canais agregados, que viesse a otimizar o desempenho do sistema rádio cognitivo. Por fim, sugere-se uma investigação da agregação de canais e/ou “White Spaces” contíguos e não contíguos através de uma implementação por “hardware”.

## Referências bibliográficas

- [1] Gartner, Press Release “Table 2 - Worldwide Smartphone Sales to End Users by Operating System”. Available at:  
<http://www.gartner.com/it/page.jsp?id=1466313>
- [2] Cisco - Global Mobile Network Connection Speed, Maio, 2011. Available at:  
[http://newsroom.cisco.com/dlls/2011/prod\\_013111.html](http://newsroom.cisco.com/dlls/2011/prod_013111.html)
- [3] Alexander M., Wyglinski, Maziar Nekovee, and Y. Thomas Hou; “Cognitive radio communications and networks”; Elsevier, 2010
- [4] CPqD; Relatório Técnico “Análise de Utilização do Espectro de 700 MHz”; Setembro, 2011.
- [5] J. Mitola III, “Cognitive radio: An integrated agent architecture for software define radio.” PhD thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, May 2000.
- [6] Alexander M., Wyglinski, Maziar Nekovee, and Y. Thomas Hou, “Cognitive radio communications and networks”, Elsevier, 2010
- [7] IEEE Standard 802.22, [www.ieee.org](http://www.ieee.org).
- [8] Yonghong Zeng et al, “Worldwide Regulatory and Standardization Activities on Cognitive Radio”, 978-1-4244-5188-3, IEEE, 2010.
- [9] Fette Bruce, “Cognitive Radio Technology”, 2nd edition, Elsevier, 2009
- [10] Kwang-Cheng Chen and Ramjee Prasad, “Cognitive Radio Networks”, 2009 (cap.11-Spectrum Management of Cognitive Radio Networks)
- [11] Annex 7 to Document 1B/210; Conference Preparatory Meeting (CPM); WRC-12 agenda item 1.19
- [12] S. M. Kay, “Fundamentals of Statistical Signal Processing: Detection Theory”, vol. 2, Prentice-Hall, 1998.
- [13] W. A Gardner, “Statistical Spectral Analysis: A Nonprobabilistic Theory”, Prentice-Hall, 1988.
- [14] Mishra, A. Sahai, R. Brodersen, “Cooperative sensing among cognitive radios”, in: Proc. of IEEE ICC 2006, vol. 4, 2006, pp. 1658–1663.
- [15] R. Tandra, A. Sahai, “SNR walls for signal detection”, IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing 2 (1) (2008) 4–17
- [16] Visotsky, S. Kuffner, R. Peterson, “On collaborative detection of tv transmissions in support of dynamic spectrum sharing”, in: Proc. Of IEEE DySPAN 2005, 2005, pp. 338–345.
- [17] A. Ghasemi, E. Sousa, “Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments”, in: Proc. of IEEE DySPAN2005, 2005, pp. 131–136.
- [18] Z. Li, F. Yu, M. Huang, “A cooperative spectrum sensing consensus scheme in cognitive radios”, in: Proc. of IEEE Infocom 2009, 2009, pp. 2546–2550.

- [19] G. Ganesan, Y.G. Li, "Cooperative spectrum sensing in cognitive radio—part I: two user networks", *IEEE Transactions on Wireless Communications* 6 (6) (2007) 2204–2213.
- [20] G. Ganesan, Y.G. Li, "Cooperative spectrum sensing in cognitive radio—part II: multiuser networks", *IEEE Transactions on Wireless Communications* 6 (6) (2007) 2204–2213.
- [21] W. Zhang, K. Letaief, "Cooperative spectrum sensing with transmit and relay diversity in cognitive radio networks"— [transaction letters], *IEEE Transactions on Wireless Communications* 7 (12) (2008) 4761–4766.
- [22] Dusit Niyato and Ekram Hossain, "Competitive Pricing for Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks: Dynamic Game, Inefficiency of Nash Equilibrium, and Collusion", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, January 2008
- [23] Kaushik R. Chowdhury and Tommaso Melodia, "Platforms and Testbeds for Experimental Evaluation of Cognitive Ad Hoc Networks", *IEEE Communications Magazine* • September 2010
- [24] C. Stevenson et al., "Functional Requirements for the 802.22 WRAN Standard", doc. IEEE 802.22-05-0071r44, sept. 2005.
- [25] FCC, "Second Report and Order and Memorandum Opinion and Order, in Matter of Unlicensed Operation in the TV Broadcast Bands Additional Spectrum for Unlicensed Devices Below 900 MHz and in the 3 GHz Band." Oct. 18, 2008
- [26] Gwangzeen Ko et al, "Channel Management in IEEE 802.22 WRAN Systems", *IEEE Communications Magazine*, September 2010.
- [27] C. J. Kim et al., "Initialization and Updating Channel Sets", doc. IEEE 802.22-08-0263r0, Set. 2008
- [28] Stanislav Filin et al, "International Standardization of Cognitive Radio Systems", *IEEE Communications Magazine*; March 2011.
- [29] ECMA-392 Std., "MAC and PHY for Operation in TV White Space," Dec. 2009.
- [30] M. Mueck et al., "ETSI Reconfigurable Radio Systems: Status and Future Directions on Software Defined Radio and Cognitive Radio Standards" *IEEE Commun. Mag.*, Sept. 2010.
- [31] Kang G. Shin, Hyoil Kim, Alexander W. Min, and Ashwini Kumar, "Cognitive Radios For Dynamic Spectrum Access: From Concept To Reality", *IEEE Wireless Communications*, 2010
- [32] E. K. Au, D. Cavalcanti, G. Ye Li, W. Caldwell, K. BemLetaief, "Advances in Standards and Testbeds for Cognitive Radio Networks: Part 1", *IEEE Communications Magazine*, Sep. 2010.
- [33] P. Pawelczak, K. Nolan, L. Doyle, SerWah Oh, D. Cabric, "Cognitive Radio: Ten years of Experimentation and Development", *IEEE Communications Magazine*, March 2011.
- [34] D. Cabric, S. M. Mishra, R. W. Brodersen, "Implementation Issues in Spectrum Sensing for Cognitive Radios", *IEEE Signals, Systems and Computers Conference*, Nov. 2004.
- [35] K. Kim, I. Akbar, K. Bae, J.-S. Um, C. Spooner, and J. Reed, "Cyclostationary approaches to signal detection and classification in cognitive

- radio,” in Proceedings of IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, Apr. 2007.
- [36] P. Sutton, K. Nolan, and L. Doyle, “Cyclostationary signatures in practical cognitive radio applications,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Jan. 2008
- [37] “Plano de Atribuição, Destinação e Distribuição de Faixas de Frequências Anatel 2011”, Anatel, 2011
- [38] “Annex 7; Document 1B/210; Conference Preparatory Meeting (CPM); WRC-12 agenda item 1.19”, ITU-R
- [39] Recommendation ITU-R SM.1880, “Spectrum occupancy measurement”, 2011
- [40] Miguel López-Benítez and Fernando Casadevall, “On the Spectrum Occupancy Perception of Cognitive Radio Terminals in Realistic Scenarios”, 2nd International Workshop on Cognitive Information Processing, 2010.
- [41] Robin I. C. Chiang; Gerard B. Rowe and Kevin W. Sowerby, “A Quantitative Analysis of Spectral Occupancy Measurements for Cognitive Radio”, 1550-2252, IEEE, 2007.
- [42] Shared Spectrum Company, “General Survey of Radio Frequency Bands – 30 MHz to 3 GHz”, technical reports (Sept 2009). Available at: <http://www.sharespectrum.com/papers/spectrum-reports/>
- [43] Timothy Harrold, Rafael Cepeda, Mark Beach, “Long-term Measurements of Spectrum Occupancy Characteristics”, International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN), IEEE, 2011
- [44] Kishor Patil<sup>1</sup>, Ramjee Prasad<sup>1</sup>, Knud Skouby, "A Survey of Worldwide Spectrum Occupancy Measurement Campaigns for Cognitive Radio", 978-1-4244-9190-2/11, IEEE, 2011
- [45] Robin I. C. Chiang; Gerard B. Rowe and Kevin W. Sowerby, “A Quantitative Analysis of Spectral Occupancy Measurements for Cognitive Radio”, 1550-2252, IEEE, 2007.
- [46] Miguel Lopez-Benitez and Fernando Casadevall, "Methodological Aspects of Spectrum Occupancy Evaluation in the Context of Cognitive Radio", European Wireless, 2009.
- [47] Miao Dan, Feng Zhiyong, Cai Huying , Yao Yanjun, “An Adaptive Threshold Method for Data Processing in Spectrum Occupancy Measurements”, 978-1-4244-2515-0/09, IEEE, 2009.
- [48] W. F. Egan, “Practical RF system design”, Wiley-IEEE Press, 2003.
- [49] “Spectrum analysis basics”, Agilent, Application note 150.
- [50] M. Wellens, J. Wu, and P. Mahonen, "Evaluation of spectrum occupancy in indoor and outdoor scenario in the context of cognitive radio," , CrowCom 2007, 2007.
- [51] N. Otsu, "A threshold selection method from gray-level histograms," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 9, 1979.
- [52] Furong Huangy , Wei Wangy z , Haiyan Luoy , Guanding Yuy , Zhaoyang Zhangy, "Prediction-Based Spectrum Aggregation with Hardware Limitation in Cognitive Radio Networks", 978-1-4244-2519-8, IEEE, 2010.

- [53] A. Shukla, B. Williamson, J. Burns, E. Burbidge, A. Taylor, and D. Robinson, "A study for the provision of aggregation of frequency to provide wider bandwidth services", QinetiQ Final Report, 2006.
- [54] A. Petrin, "Maximizing the utility of radio spectrum: Broadband spectrum measurements and occupancy model for use by cognitive radio." PhD thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA, July 2005.
- [55] R. Bacchus, A. Fertner, C. Hood, and D. Roberson, "Long-term, wide-band spectral monitoring in support of dynamic spectrum access networks at the IIT spectrum observatory," in Proceedings of the Third IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, Oct. 2008.
- [56] G. Lee, W. Na, L. Park, S. Cho, K. Kim, and S. Hwang, "Channel allocation scheme for cognitive radio systems", ICUFN2010, 2010.
- [57] G. Lee, J. Ko, S. Oh, C. Kim, "Sensing and transmission parameter determination for cognitive radio networks", ICOIN2012, 2012.
- [58] Harri Holma and Antti Toskala, "LTE for UMTS: OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access", John Wiley & Sons, 2009
- [59] Jongheon Lee and Jaewoo So, "Analysis of Cognitive Radio Networks with Channel Aggregation", WCNC, 2010.
- [60] T. M. N. Ngatched, Attahiru S. Alfa, and Jun Cai, "Analysis of Cognitive Radio Networks with Channel Aggregation and Imperfect Sensing", 978-1-4577-0638-7, IEEE, 2011.

## Anexo A – Gráficos das Medições de Ocupação Espectral

