

Este exemplar corresponde à redação final defendida por: FRANCISCO M. PORTELI

e aprovada pela Co  
Julgada em 12 Jan 2007

Orientado



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE  
COMPUTAÇÃO

## “Rádios Cognitivos: Implementação de Uma Plataforma Multiagentes”

**Autor: Francisco Martins Portelina**

**Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Kretly**

**Tese de Doutorado** apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. Área de concentração: **Engenharia de Telecomunicações.**

Campinas, 12 de Janeiro de 2007.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA DA ÁREA  
DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Portelinha, Francisco Martins  
Rádios cognitivos: implementação de uma plataforma multiagentes /  
P832r Francisco Martins Portelinha. --Campinas, SP: [s.n.], 2007.

Orientador: Luiz Carlos Kretly

Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade  
de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Sistemas de comunicação sem fio. 2. Espectro de frequência. 3.  
Rádio. 4. Inteligência artificial. 5. Redes neurais (Computação). I.  
Kretly, Luiz Carlos. II. Universidade Estadual de Campinas.  
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Título em Inglês: A multiagent framework for cognitive radio

Palavras-chave em Inglês: Wireless communication, Frequency allocation model,  
Cognitive radio, Software defined radio, Agent's  
frameworks, Neural networks applications

Área de concentração: Telecomunicações e Telemática

Titulação: Doutor em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Michel Daoud Yacoub, Paulo Cardieri, Luís Geraldo Pedroso  
Meloni, Silvio Ernesto Barbin, Mauricio Silveira e Omar  
Carvalho Branquinho

Data da defesa: 12/01/2007

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

## **Banca Examinadora**

**Prof. Dr. Luiz Carlos Kretly**  
Orientador

Departamento de Microonda e Óptica – FEEC/Unicamp.

**Prof. Dr. Michel Daoud Yacoub**

Departamento de Comunicações – FEEC/Unicamp.

**Prof. Dr. Paulo Cardieri**

Departamento de Comunicações – FEEC/Unicamp.

**Prof. Dr. Luís Geraldo Pedroso Meloni**

Departamento de Comunicações – FEEC/Unicamp.

**Prof. Dr. Silvio Ernesto Barbin**

Escola Politécnica da USP/USP São Paulo.

**Prof. Dr. Maurício Silveira**

PUC Campinas.

**Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho**

PUC Campinas.

200752383

## **Resumo**

Em frequências abaixo de 3 GHz, ocorre uma demanda de bandas no espectro de frequência, devido à expansão das redes de comunicações sem fio, principalmente para aplicações outdoor. Estudos mostram que há grandes lacunas no espectro de frequência até a faixa de 3 GHz. O modelo de alocação do espectro de frequência, já ultrapassado, precisa ser reformulado para uso destas lacunas. A utilização do espectro deve sair do modelo estático, para o modelo dinâmico. Rádios cognitivos e redes de rádios cognitivos surgem como opção tecnológica para uso deste novo modelo. Apresentamos uma arquitetura inovadora para a implementação de rádios cognitivos, baseados nos modelos computacionais de: rádios definidos por software, agentes e frameworks. Um estudo de caso, para rádio cognitivo nível 2, é apresentado para uso não licenciado no espectro nas faixas licenciadas para TV. Um algoritmo inovador, para detecção da disponibilidade de canais, é desenvolvido utilizando redes neurais.

Palavras-chaves: comunicação sem fio, modelo de espectro de frequência, rádios cognitivos, rádios definidos por software, agentes, frameworks, redes neurais.

## **Abstract**

In frequencies lower than 3 GHz, a demand occurs out of the frequency spectrum due to the expansion of the wireless communication network, mainly for outdoor applications. Studies show that, there are great gaps of the frequency spectrum in the bands up to 3 GHz. The allocation model of the frequency spectrum needs reformulation for the use of these gaps. This utilization must come from, the change of a static model to a dynamic one. Cognitive radio and cognitive radio networks rise as a technological option for the use of the new model. We introduce and an innovatory architecture for the implementation of cognitive radios, based on the computational models of: software defined radio, agents and frameworks. A case study, for cognitive radio level 2, is introduced for use in licensed TV bands. A new algorithm is developed to detect available channel.

Keywords: wireless communication, frequency allocation model, cognitive radio, software defined radio, agents, frameworks, neural networks applications.

*Dedico esta tese a minha esposa Déborah e meus filhos Francisco e Alexandre.*

## **Agradecimentos**

Ao professor Luiz Carlos Kretly, por toda a confiança, apoio e pelos ensinamentos.

Ao amigo de longa data Paulo Cardieri, que indicou o Virginia Tech.

Ao professor Dr. Jeffrey Reed, pela acolhida no MPRG/Virginia Tech, por toda confiança, por todo apoio, pelos ensinamentos e oportunidades.

Ao colega de trabalho Carlos Aguayo, pelo suporte recebido dentro do MPRG e pelo companheirismo.

Ao Dr. Max Robert, pelos ensinamentos da arquitetura OSSIE e pelo confiança e companheirismo.

A Shelby e Hilda, do MPRG, pelo suporte.

Ao meu amigo Gabriel Ângelo Vieira de Barros, pela oportunidade de unir pela primeira vez processamento digital de sinais com redes neurais.

Aos amigos Audrey e Isaac Cheng, e Nick e John Bruce Cantrell, por tornarem nossa estadia em Blacksburg mais agradável.

A CAPES, pelo apoio financeiro no Brasil, e a FAPEPE/Texas Instruments Americana pelo apoio financeiro nos EUA.

## Índice Geral

1	Introdução Geral .....	1
2	Modelo de Alocação de Banda do Espectro de Frequência .....	5
2.1	Introdução .....	6
2.2	Modelo de Alocação de Banda do Espectro de Frequência Atual.....	7
2.3	Análise do Modelo de Alocação de Banda Atual .....	9
2.4	Frequências abaixo de 3 GHz .....	11
2.5	Novas Propostas para Alocação de Bandas do Espectro de Frequência.....	12
2.5.1	Não Licenciado Compartilhado .....	12
2.5.2	Não Licenciado Oportunista .....	14
2.6	Uso do Espectro Licenciado como Segundo Usuário.....	15
2.7	Conclusões.....	17
3	Conceito de Rádio Cognitivo.....	19
3.1	Espaço Espectral do Rádio .....	20
3.2	Uso do Espaço Espectral como Segundo Usuário .....	24
3.3	Definição de Rádio Cognitivo .....	27
3.3.1	Ciclo Cognitivo.....	28
3.4	Rádio Cognitivo baseado em SDR .....	32
3.4.1	SDR.....	32
3.4.2	Arquiteturas de Software para SDR.....	35
3.4.3	Especificação do SDR baseado na SCA .....	36
3.4.4	Rádio Cognitivo baseado na arquitetura SCA .....	42
3.5	Conclusões.....	46
4	Uma Plataforma Multiagentes para Rádios Cognitivos.....	49
4.1	Modelo Computacional do Rádio Cognitivo .....	50
4.1.1	Rádio Cognitivo baseado em SDR .....	50
4.1.2	Rádios Cognitivos utilizando Modelo de Agentes.....	51
4.1.3	Framework para o Rádio Cognitivo.....	53
4.2	Modelo de Agentes aplicados ao Rádio Cognitivo.....	58
4.2.1	Rádio Cognitivo Nível 1 .....	62
4.2.2	Rádio Cognitivo Nível 2 .....	62

4.2.3	Rádio Cognitivo Nível 3 .....	65
4.2.4	Rádio Cognitivo Nível 4 .....	66
4.2.5	Rádio Cognitivo Nível 5 .....	67
4.2.6	Rádio Cognitivo Nível 6 .....	68
4.2.7	Redes de Comunicação baseada em Rádios Cognitivos.....	70
4.2.8	Comunicação Entre Agentes.....	71
4.3	Uma Plataforma Multiagente para Rádio Cognitivo .....	72
4.3.1	Framework para Rádio Cognitivo.....	72
4.4	Conclusões.....	75
5	Estudo de Caso .....	77
5.1	Rede de Rádios Cognitivos.....	78
5.1.1	Modelo da Rede de Rádios Cognitivos.....	79
5.1.2	Temperatura Interferente .....	84
5.1.3	Operação na Faixa Espectral de TV.....	88
5.2	Sensoriamento do Espectro de Frequência .....	96
5.2.1	Detector com Filtro Casado .....	100
5.2.2	Detector de Energia.....	101
5.2.3	Detector de Sinais Ciclo Estacionários.....	102
5.2.4	Sensoriamento Cooperativo do Espectro .....	103
5.2.5	Localização Geográfica .....	104
5.2.6	Detecção de Lacunas na Banda de TV utilizando Redes Neurais. ....	104
5.3	Implementação do Multiagente Framework para Rádio.....	107
5.3.1	Descrição da Implementação do Rádio Cognitivo.....	107
5.3.2	Arranjo para levantamento de dados do espectro de TV. ....	109
5.3.3	Rádio Cognitivo nível 2 .....	109
5.4	Conclusões.....	111
6	Conclusões Finais .....	113
6.1	Sumário dos Resultados.....	114
6.2	Sumário de Contribuições.....	114
6.3	Questões em aberto da tecnologia .....	115
6.4	Proposta de Trabalhos Futuros .....	116

6.5	Artigos publicados com esta tese.....	117
7	Apêndice A.....	119
8	Apêndice B – Futuro do Rádio Cognitivo.....	125
9	Referências Bibliográficas.....	127

## Índice de Figuras

Figura 1 - Gráfico do Espectro em Columbus/Ohio (EUA) .....	10
Figura 2 – Modelo de Espectro Não Licenciado Compartilhado. ....	13
Figura 3 – Modelo de Espectro com Compartilhamento Oportunista .....	14
Figura 4 - Bandas para Canais de Rádio FM e TV-VHF .....	16
Figura 5 – Definição de Temperatura Interferente .....	17
Figura 6 – Modelo do Espaço Espectral do Rádio.....	20
Figura 7 – Modelo Espaço Espectral Multidimensional.....	23
Figura 8 - Espaço Espectral Multidimensional com Lacunas.....	24
Figura 9 - Estados do Rádio Cognitivo.....	29
Figura 10 - Ciclo Cognitivo .....	31
Figura 11 - Plataforma do SDR .....	34
Figura 12 - Modelo em Camadas do SDR.....	35
Figura 13 - Modelo de Referência para o SDR.....	38
Figura 14 - Modelo em Camadas - SDR/SCA.....	39
Figura 15 - Estrutura do Software para a especificação SCA.....	40
Figura 16 - Componentes do SDR.....	41
Figura 17 - Cognitive Radio baseado em SDR/SCA .....	42
Figura 18 - Componentes da Arquitetura SCA modificados para Rádio Cognitivo.....	44
Figura 19 - Arquitetura do Rádio Cognitivo baseado no Framework. ....	45
Figura 20 - Modelo em camadas do rádio cognitivo .....	45
Figura 21 - Arquitetura do Rádio Cognitivo.....	50
Figura 22 - Agente interagindo no ambiente. ....	52
Figura 23 - Modelo de desenvolvimento de software.....	53
Figura 24 - SDR Ideal. ....	55
Figura 25 - Modelo do CR em Camadas. ....	56
Figura 26 - SDR Real.....	60
Figura 27 – Rádio Cognitivo Nível 1 – Agente Tabela .....	62
Figura 28 - Rádio Cognitivo Nível 2 – Agente Reativo. ....	63
Figura 29 - Rádio Cognitivo Nível 2 – Agente Matemático.....	64

Figura 30 - Rádio Cognitivo Nível 3 – Agente Modelo.....	65
Figura 31 - Rádio Cognitivo Nível 4 – Agente Objetivo.....	67
Figura 32 - Rádio Cognitivo Nível 5 – Agente Utilidade.....	68
Figura 33 - Rádio Cognitivo Nível 6 – Agente Inteligente.....	69
Figura 34 - Rádio Cognitivo Nível 6 – Agente Inteligente proposto por Stan [6].....	70
Figura 35 - Redes de Rádios Cognitivos.....	71
Figura 36 - Uma Plataforma Multiagentes para Rádio Cognitivo.....	73
Figura 37 – Road-Map do Rádio Cognitivo.....	76
Figura 38 - Uso Oportunista do Espectro de Frequência.....	78
Figura 39 - Operação do Nó Cognitivo.....	79
Figura 40 - Estrutura do Quadro para Rede Cognitiva.....	80
Figura 41 - Distribuição Espacial entre Usuários Secundários.....	82
Figura 42 - Correlação Espacial entre Usuários Secundários [29]......	84
Figura 43 - Temperatura Interferente.....	85
Figura 44 - Protocolo da camada MAC do ITMA [8]......	87
Figura 45 - Arranjo para Levantamento do Espectro em Columbus Ohio [14].....	89
Figura 46 - Densidade Espectral de Potência de 0-90 MHz após [14]......	90
Figura 47 - Ambiente de Operação Oportunista.....	94
Figura 48 - Separação dos Usuários com Relação à Potência.....	95
Figura 49 - Controle de Potência.....	96
Figura 50 - Busca de Buracos no Espectro de Frequência.....	99
Figura 51 - Detector de energia não coerente.....	101
Figura 52 - Detector de Sinais Ciclo Estacionários.....	103
Figura 53 - Arquitetura da Rede Back-propagation.....	105
Figura 54 - Modelo em Camadas de Implementação do Rádio Cognitivo.....	108
Figura 55 - Arranjo para levantamento do espectro de TV, usando o OSSIE.....	109
Figura 57 - Diagrama UML para Rádio Cognitivo nível 2.....	111

## Índice de Tabelas

Tabela 1 – Dimensões Primárias do Espaço Espectral do Rádio.....	21
Tabela 2 - Dimensões Secundárias do Espaço Espectral do Rádio .....	22
Tabela 3 - Padrões de Arquitetura de Software de Comunicações.....	36
Tabela 4 - Características das Tarefas do Rádio Cognitivo.....	59
Tabela 5 - Tecnologia de Rádios Cognitivos.....	61
Tabela 6 - Vantagens e Desvantagens do Agente Reativo. ....	64
Tabela 7 - Contorno de Proteção do Serviço de TV [16]. ....	91
Tabela 8 - Relação D/U para o serviço de TV [16]. ....	92

## **Lista de Acrônimos**

- ACK** – Reconhecimento positivo (Acknowledgment)
- ANATEL** – Agência Nacional de Telecomunicações
- API** – Application Programming Interfaces
- CAPES** – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
- CF** – Core Framework
- CNR** – Cognitive Radio Network
- CPRI** – Common Public Radio Interface
- CORBA** – Common Object Broker Adapter
- COTS** – Commercial Off-the-Shelf
- CWT** – Center for Wireless Telecommunications from Virginia Tech
- DDC** – Digital Down Converter
- DFS** – Dynamic Frequency Selection
- DOCSRA** – Distributed Object Computing Software Radio Architecture
- DUC** – Digital Up Converter
- FAPEPE** – Fundação de Apoio ao ensino, Pesquisa e extensão de Itajubá
- FCC** – Federal Communication Commission
- GPIB** – General Purpose Interface Bus
- GPRS** – General Packet Radio Service
- GPS** – Global System Position
- GSM** – Global System for Mobile Communications
- GUI** – Graphic User Interface
- HAL** – Hardware Abstraction Layer
- IP** – Internet Protocol
- ISM** – Instrument, Scientific and Medical
- ISO** – International Standardization Organization
- ITMA** – Interference Temperature Multiple Access
- ITU** – International Telecommunications Union
- JTRS** – Joint Tactical Radio System
- MPRG** – Mobile Portable Research Group

**OMG** – Object Management Group  
**OSI** – Open System Interconnection  
**OSSIE** – Open Source Software Embedded  
**PAN** – Personal Area Network  
**P<sub>I</sub>** – Potência de Interferência  
**QoS** – Quality of Service  
**SCA** – Software Communications Architecture  
**SDR** – Software Defined Radio  
**SNR** – Signal Noise Ratio  
**SOHO** – Small Office Home Office  
**RE** – Radio Equipment  
**REC** – Radio Equipment Control  
**RSSI** – Received Signal Strength Indicator  
**RTOS** – Real Time Operation System  
**T<sub>L</sub>** – Limite da temperatura interferente  
**T<sub>I</sub>** – Temperatura Interferente  
**TCP** – Transfer Control Protocol  
**TPC** – Transmission Power Control  
**WiFi** – Wireless Fidelity  
**WRC** – World Radio Conference  
**UML** – Unified Modeling Language  
**UMTS** – Universal Mobile Telecommunications System  
**UP** – Usuário Primário  
**US** – Usuário Secundário  
**US<sub>A</sub>** – Usuário Secundário A  
**US<sub>B</sub>** – Usuário Secundário B  
**UWB** – Ultra Wideband  
**XML** – eXtensible Markup Language

# 1 Introdução Geral

O objetivo desta dissertação é apresentar o desenvolvimento de uma tecnologia para implementação de um rádio cognitivo, utilizando a tecnologia de rádio definido por software, do inglês, Software Defined Radio - SDR.

A percepção de mobilidade gera uma sensação de conforto muito grande ao ser humano. Mobilidade, associada à capacidade de comunicar-se, com qualquer um, em qualquer lugar, então é o ápice do bem estar, haja vista as expansões dos serviços de sistemas de comunicação móveis. No entanto, nada é pior do que em um dado momento discar o telefone, e não conseguir estabelecer a conversa, por falta de disponibilidade do serviço. O mote dos pesquisadores de tecnologia wireless, serviços ilimitados em qualquer hora e qualquer lugar, esbarrara na limitação do recurso natural das comunicações elétricas: espectro de frequência. Recurso natural, portanto, limitado.

A diferença deste recurso natural, em relação aos demais, é que uma vez cessado sua ocupação, ele pode ser reutilizado por outro sem perda de características. A otimização de uso do espectro de frequência é uma das propostas prioritárias do rádio cognitivo. E como têm acontecido com outras tecnologias de comunicação, novos serviços deverão surgir com a adoção desta nova tecnologia.

Dada a complexidade da tecnologia de rádio cognitivo, estudos mostram que, a implantação de um rádio cognitivo com alto grau de cognição é muito extensa. Assim, estamos propondo uma plataforma evolucionária denominada, “Uma Plataforma Multiagentes para Implementação de Rádio Cognitivo”, do inglês “A MultiAgent Framework for Cognitive Radio”.

No capítulo 2, descreveremos o modelo de alocação de bandas do espectro de frequência atual, e a nova proposta de uso do espectro. A comunicação wireless e a introdução de novos serviços fazem crescer a demanda por espectro de frequência. O modelo atual de administração do espectro, baseado no princípio de que a banda do espectro tecnicamente alocada não pode ser compartilhada com outros usuários, deve ser reformulado. Esta reformulação deverá permitir o uso de uma banda do espectro por mais de um usuário. Teremos dois tipos de usuários: os usuários primários, detentores da licença de uso da banda; e os usuários secundários que poderão fazer uso da banda quando as mesmas não estiverem em uso. O rádio cognitivo é a plataforma básica para a transição modelo de uso de espectro, do modelo estático para o modelo dinâmico.

No capítulo 3, iremos descrever os conceitos de: espaço espectral do rádio e tecnologia de rádio cognitivo. Espaço espectral define as formas de múltiplo acesso, as características de transmissão e os modos de propagação. A otimização do espaço espectral do rádio, através da adoção da tecnologia de rádios cognitivos, pode contribuir significativamente para a expansão dos sistemas de comunicação wireless, tendo em vista os principais mercados: militar, segurança pública e comercial e órgãos reguladores.

Há muitas questões em aberto para implementação e uso dos rádios cognitivos e seu sucessor, as redes de rádios cognitivos, dentre os quais podemos citar:

1. Quais são os elementos cognitivos, isto é, quais os parâmetros operacionais que devem ter a capacidade de adaptação e flexibilidade?
2. Como a rede de rádios cognitivos pode ser utilizada para a detecção de usuários primários?
3. Qual é o compromisso entre, a capacidade da rede de rádio cognitivo, e a interferência causada nos usuários primários?
4. A qualidade do sistema será afetada pela incorporação das novas redes de rádios cognitivos?
5. Onde seu uso terá mais benefícios?

No capítulo 4, iremos descrever um modelo computacional para a implementação do rádio cognitivo. O modelo proposto utiliza basicamente três tecnologias computacionais: SDR, agentes e frameworks. O modelo desenvolvido é chamado de

“Uma Plataforma Multiagentes para Rádio Cognitivo”, do inglês, “A MultiAgent Framework for Cognitive Radio”. A proposta deste modelo é uma arquitetura capaz de adaptar-se a evolução do nível de cognição.

O modelo computacional proposto para a implementação do rádio cognitivo, utilizando agentes e frameworks é inovadora. A vantagem deste modelo em relação aos demais é sua capacidade evolucionária e sua desvantagem é a alta carga computacional. Apresentaremos o modelo de referência para implementação do rádio cognitivo.

No capítulo 5, iremos descrever uma aplicação para o modelo de referência descrito no capítulo 4. Desenvolveremos parcialmente uma implementação para um rádio cognitivo de nível 2, para operar em um espectro não licenciado. A implementação será parcial devido à complexidade computacional. Uma implementação completa foge do escopo deste trabalho. Serão apresentadas as questões relevantes à caracterização da rede cognitiva, a caracterização do ambiente, algoritmos para identificação de canal, controle de potência e detecção de espaço espectral em bandas de TV utilizando redes neurais. O modelo de rádio cognitivo nível 2, descrito neste capítulo, foi parcialmente implementado utilizando a arquitetura OSSIE. A implementação do rádio cognitivo nível 2 considera uma arquitetura de hardware do SDR ideal. Ou seja, opera em qualquer banda e qualquer frequência, com toda a canalização digital.

## 2 Modelo de Alocação de Banda do Espectro de Frequência

Atualmente, nas tecnologias de comunicações sem fio, é onde encontramos mais oportunidades para a introdução de novos serviços de telecomunicações. Um dos recursos básicos para a comunicação sem fio, ou wireless, o espectro de frequência, é regido por uma regulamentação ultrapassada. Esta regulamentação, baseada na tecnologia eletrônica dos primórdios do século passado, tornou o uso do espectro de frequência ineficiente. Neste capítulo descreveremos o modelo atual de alocação de bandas do espectro de frequência<sup>1</sup> e a nova proposta de uso.

---

<sup>1</sup> Banda – uma banda é uma pequena parte do espectro de frequência de comunicação por rádio frequência dividida em um ou mais canais de mesma largura de faixa. Canal é por onde efetivamente se estabelece uma comunicação, os canais são normalmente usados para o mesmo tipo de serviço. Como por exemplo, banda de radiodifusão AM; ocupam a faixa do espectro de 1530 – 1700 kHz, com canais de largura de faixa de 10 kHz.

## 2.1 Introdução

Como já citado, o espectro de frequência é um recurso natural, assim como, água e o solo é propriedade do Estado. O direito de uso de uma parte do espectro é concedido através de uma licença, obtida gratuitamente ou através de leilão público. Esta parte do espectro pode ser uma banda inteira, como por exemplo, nos sistemas móveis celulares ou um canal dentro de uma banda, como por exemplo, emissoras de rádio e televisão. A licença é concedida por um período de tempo, desde dias até anos. Diferente da maioria dos recursos naturais, ele é reutilizável. Ao expirar a licença de um usuário, outro poderá obter a licença desta mesma banda do espectro, sem que o mesmo tenha perdido suas características.

O uso do espectro de frequência regulado e licenciado, já é utilizado há quase 100 anos [28]. A história do uso do espectro licenciado começou no início do século 20, após a desastrosa jornada do Titanic em 1912. Na época, os receptores de rádio eram de baixa qualidade e a capacidade de distinguir entre diferentes fontes era muito limitada. Fato considerado como uma das razões, pelas quais os navios próximos ao mesmo não responderam as chamadas de socorro. As autoridades iniciaram então, o uso do espectro licenciado e dividido em faixas de uso.

A regulamentação do espectro de frequência ocorre basicamente em três níveis: global; regional, definido com um bloco de países vizinhos; e internamente em um país. A divisão das faixas do espectro de frequência, a nível global e regional, é discutida no

fórum internacional, o WRC<sup>2</sup> - World Radio Conference. WRC é uma conferência a nível global, organizada pela International Telecommunications Union – ITU, a cada dois, três, ou quatro anos. Neste fórum são discutidas as questões relacionadas à utilização do espectro de frequência para comunicações wireless, em outras palavras, questões relacionadas ao rádio. A função da WRC é rever e ratificar a regulamentação do espectro de rádio frequência, e o tratado internacional que governa o uso de rádio frequência. WRC propõe e atualiza acordos de alocação do espectro de frequência, e outros usos do espectro de rádio a nível mundial, de forma a evitar interferências desastrosas, em operações de serviços wireless.

## **2.2 Modelo de Alocação de Banda do Espectro de Frequência Atual**

Atualmente, o modelo de alocação de bandas do espectro de frequência, permite os seguintes tipos de concessões: licenciado exclusivo, não licenciado e licenciado não exclusivo [58].

### **1. Licenciado Exclusivo**

“Licenciado exclusivo” obtém direito de uso exclusivo de uma parte do espectro de frequência. Atualmente, grande parte das licenças do espectro são concedidas como licenciado exclusivo. Licenças são dadas para as operadoras de serviços públicos, tais

---

<sup>2</sup> O WRC sucede o WARC (World Administration Radio Conference), órgão internacional vinculado as Nações Unidas para regulamentar o espectro de frequência que se reuniu pela primeira vez em 1979.

como, emissoras de TV e rádio, companhias telefônicas locais e de longas distâncias, operadoras dos sistemas celulares, empresas operadoras de energia elétrica e água, militares, etc.

Ao receber a concessão daquela parte do espectro, sem considerar as conseqüências, o adquirente obtém o controle exclusivo daquela banda ou canal por um período de anos, sujeito às limitações da licença. Esta parte do espectro pode ser utilizada ou não, dependendo do interesse do licenciado, fato conhecido também como **alocado e tecnicamente utilizado**. O licenciado tem seu direito de uso exclusivo assegurado por um órgão fiscalizador do espectro.

## 2. Não Licenciado

“Não Licenciado” utiliza o espectro de frequência sem a necessidade de obter uma licença. Neste caso, não há um único usuário com direito de uso exclusivo, e todos os usuários estão sujeitos aos limites nos termos da licença. Nestas faixas, ao invés do fornecedor de serviços, ou um usuário em particular, obter o direito de uso e controle do espectro, os fabricantes de equipamentos ganharam o direito de uso para produzir e vender equipamentos homologados. Esta parte do espectro é também denominada ISM - Instrument, Scientific and Medical. Inicialmente as faixas alocadas para o mesmo foram de 902 MHz e 2,4 GHz. Depois ocorreu uma extensão para 3.5 GHz e 5.8 GHz, faixas do espectro denominadas de não licenciadas.

“Não licenciado” é na realidade um termo impróprio, pois “não licenciado” não significa “sem regulamentação”. A primeira vista implica que, o órgão regulador não deixou o espectro disponível para uso, quando de fato o espectro tem sido alocado e destinado para uso como qualquer outra parte do espectro. Os dispositivos deverão estar homologados, conforme estabelecido pelo órgão regulador, para poderem operar nesta parte do espectro. A licença é dada a equipamentos, submetidos a uma bateria de testes com parâmetros bem definidos. Um dos principais parâmetros analisados é o limite de emissão de potência.

### **3. Licenciado Não Exclusivo**

“Licenciado não exclusivo” utiliza partes do espectro de frequência onde são concedidas licenças para mais de um usuário. Como exemplo, temos as faixas para o serviço de rádio amador, rádio astronomia e sistemas de microondas privados. Nenhuma entidade tem o controle total desta parte do espectro, tal como, o direito de uso da parte do espectro não licenciado. No entanto, há restrições no conteúdo que pode ser transmitido, e os tipos de serviços que elas poderão fornecer. Há restrições para a introdução de novas tecnologias, pois mesmo que, uma nova tecnologia aumente a capacidade do canal, ou forneça um novo tipo de serviço, elas não podem ser implantadas sem atender o critério, “licenciado não exclusivo”.

## **2.3 Análise do Modelo de Alocação de Banda**

### **Atual**

De acordo com os órgãos reguladores de espectro de frequência, em todo o mundo, há poucos recursos de espectro de frequência disponíveis. Em algumas partes, não há banda nem canal disponível. Na condição atual, “espectro de frequência tecnicamente alocado”, a expansão das novas aplicações dos sistemas de comunicações wireless esta comprometida. Com a evolução tecnológica, produção de computadores portáteis com conexão wireless mais baratos, estes problemas deverão se agravar. Como a maior parte do espectro de frequência é usada como licenciado exclusivo, alocado e tecnicamente utilizado, existe muito pouca margem para concessão de novas licenças, ou mesmo inclusão de novas bandas não licenciadas.

Estudos demonstram que, há muito espectro tecnicamente alocado, mas não utilizado, a escassez é artificial. Como por exemplo, na faixa de VHF, faixas de guarda em sistemas de TV [14]. No início, devido à tecnologia dos receptores ser pouco sofisticada, as faixas de guarda foram necessárias para separar o sinal dos transmissores. No entanto, atualmente a tecnologia de dispositivos licenciados permite aos usuários não licenciados operarem nas faixas de guarda sem interferir nos dispositivos licenciados.

Esta pesquisa foi realizada em partes do espectro, segmentadas em canais com largura de faixa de 30 kHz, nas faixas do espectro de: zero até 90 MHz; 90 a 180 MHz; e 180 a 270 MHz, na cidade de Columbus, Ohio [14]. Os dados foram levantados durante uma semana de trabalho, nos limites da cidade, com medidas realizadas na área urbana e rural. A **Figura 1**, mostra a densidade espectral de potência para a faixa de 0 até 90 MHz. O sinal no topo da figura (vermelho) mostra o máximo da densidade espectral de potência; no meio (azul) mostra a média da densidade espectral de potência e na parte inferior (verde) temos a média utilizando uma carga casada ao invés da antena, a resolução utilizada como previamente citada é de 30 KHz.

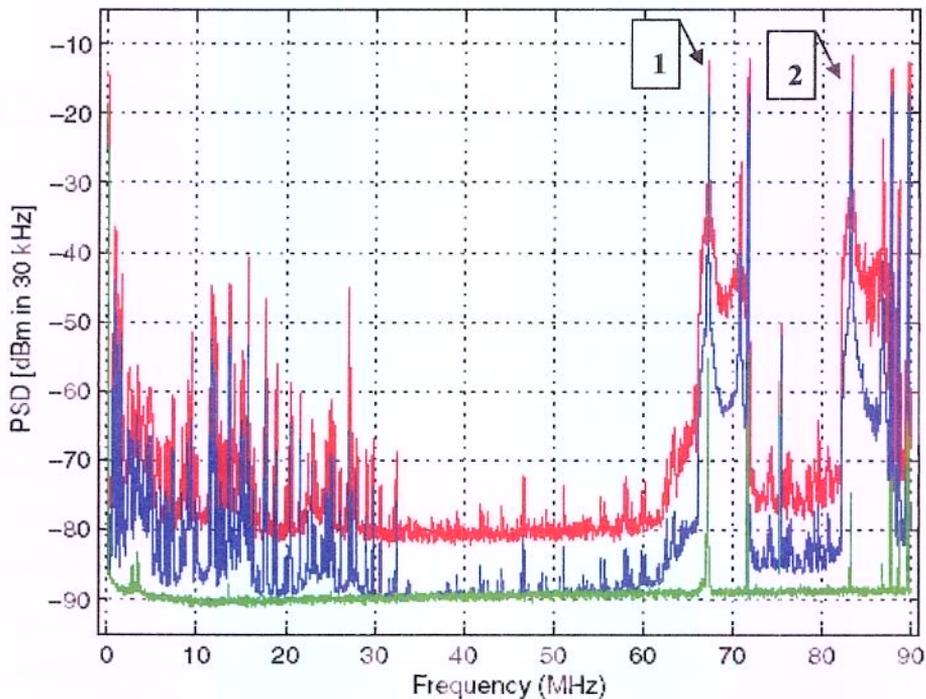


Figura 1 - Gráfico do Espectro em Columbus/Ohio (EUA)

Analisando a ocupação do espectro na **Figura 1**, nas faixas de 54 MHz até 90 MHz, verificamos:

- Canais 2 e 3 de TV, faixa de 54 MHz até 66 MHz, estão vagos;
- Canal 4 de TV, faixa de 66 até 72 MHz, em uso com suas subportadoras de 67,25 MHz; 70,83 MHz e 71,75 MHz, de vídeo, cor e áudio, respectivamente, conforme indicado pela seta 1;

- Faixa de 72 a 76 MHz, reservada;
- Canal 5 de TV, faixa de 76 a 82 MHz, vago;
- Canal 6 de TV, faixa de 82 a 88 MHz, em uso com suas subportadoras de 83,25 MHz; 86,83 MHz e 87,75 MHz, conforme indicado pelas setas 2;
- Canais 201 a 210 de rádio FM, faixa de 88 MHz até 90 MHz, parcialmente em uso.

Não foi observada muita diferença entre, a densidade espectral de potência média e máxima, sugerindo assim um ciclo de ocupação contínuo para os canais em uso.

## 2.4 Freqüências abaixo de 3 GHz.

Grande parte das bandas de espectro, com freqüência abaixo de 3 GHz encontram-se tecnicamente alocadas. As características técnicas, das faixas abaixo de 3 GHz, despertam interesse especial pelos seguintes fatores:

- Sinais de baixa freqüência propagam-se mais facilmente, através do ar e na presença de obstáculos;
- São mais tolerantes a ruído e não há necessidade de linha de visada, entre o transmissor e o receptor, do inglês Line-Of-Sight – LOS;
- Os componentes eletrônicos associados para os circuitos em baixas freqüências são mais baratos.

Novas faixas de espectro poderão ser obtidas, com uma reforma na regulamentação da alocação do espectro. Introduzindo novas formas de direito de uso, como por exemplo:

- **Usuários secundários** operando como oportunista, em bandas de guarda;
- Sublocação de partes do espectro, por parte dos **usuários primários**.

## 2.5 Novas Propostas para Alocação de Bandas do Espectro de Freqüência

Há uma proposta, defendida por diversas organizações, para mudar o regime de uso de espectro atual, dentre elas a New America Foundation<sup>3</sup>. Dos três regimes existentes atualmente para novos quatro regimes, a saber: licenciado exclusivo, não licenciado puro, não licenciado compartilhado e não licenciado oportunista. O “licenciado exclusivo” segue o modelo do “licenciado exclusivo” atual, e o “não licenciado puro”, segue o modelo do “não licenciado”, conforme descrito no item anterior [55].

### 2.5.1 Não Licenciado Compartilhado

Sob certas circunstâncias, usuários tipicamente equipados com dispositivos não licenciados, poderão compartilhar o uso do espectro com dispositivos licenciados. Isto deverá ser realizado através de um contrato de sublocação, uma lei análoga a de aluguel de imóveis. O termo inglês usado para isto é, “**underlay**”, pois os dispositivos não licenciados deverão operar abaixo de um limiar de ruído mínimo, estabelecido para os dispositivos licenciados. Os dispositivos licenciados operam com uma potência bem acima da permitida para os usuários não licenciados nesta faixa de freqüência, Figura 2.

---

<sup>3</sup> New America Foundation é um instituto de políticas públicas, sem fins lucrativos, sem partidatismo político com sede em Washington, DC, EUA. Ela é financiada por empresas tais como, Microsoft, IBM, etc. Endereço web: [www.newamerica.net](http://www.newamerica.net)

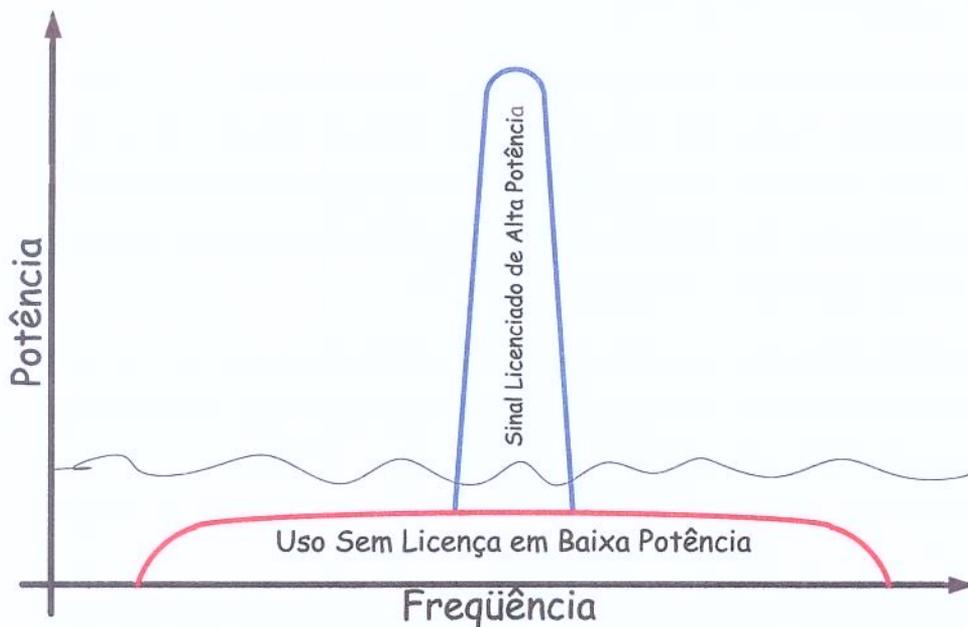


Figura 2 – Modelo de Espectro Não Licenciado Compartilhado.

Há dois grandes exemplos de compartilhamento não licenciado, utilizando as regras atuais do FCC. O primeiro, conforme recomendação Part 15 de 1938, com o dispositivo operando em uma faixa larga, com um limite de potência restrito e alcance curto, não produzindo interferência nos sistemas licenciados.

Outro exemplo mais recente de uso de espectro não licenciado compartilhado é o ultrawideband (UWB), em parte do espectro não licenciado. O FCC autorizou o uso desta tecnologia em 2002 [55]. UWB usa a técnica de espalhamento espectral para transmissão, assim a energia radiada em uma faixa grande do espectro de frequências, no entanto com uma potência extremamente baixa, abaixo do nível mínimo de ruído detectável por outros dispositivos na mesma faixa. Utilizando as técnicas de espalhamento espectral, os sistemas UWB são capazes de reconstruir mensagens e suportar transmissão de altas taxas, mesmo sob condições muito severas. Autorizando o UWB, para grande parte do espectro acima de 3 GHz, o FCC efetivamente abriu precedentes para a negociação de subcontratos, entre o usuário licenciado e não licenciado, permitindo assim o uso compartilhado de parte do espectro.

## 2.5.2 Não Licenciado Oportunista

Compartilhamento oportunista significa obter vantagens do espectro não utilizado em faixas licenciadas. Como pode ser observado na carta de alocação de espectro da maioria dos países, há muitas partes do espectro de frequência tecnicamente utilizadas, mas que, na prática, não estão efetivamente em uso, segundo levantamentos em [14]. Por exemplo, a faixa de guarda para os sistemas de televisão.

Outro faixa de possível uso, de não licenciado oportunista, é na parte do espectro tecnicamente alocado e ocioso por um determinado período de tempo. Por exemplo, em muitas células do sistema da telefonia móvel pública, o número de canais móveis disponíveis está superestimado, com muitos canais ociosos. Estes canais podem ser realocados para outros serviços, da própria operadora ou sublocado para outra operadora. Neste modelo, quando um canal estiver temporariamente disponível o rádio cognitivo detecta estes buracos no espectro e estabelece uma rede comunicação sobre o mesmo. Em paralelo com o uso, o rádio cognitivo através de um mecanismo de sensoriamento, monitora esta parte do espectro. Caso ele detecte o início de atividade, por um usuário licenciado, ele imediatamente libera esta parte do espectro. Em seguida ele procura outro canal para restabelecer uma nova rede de comunicação, como mostrado na Figura 3.

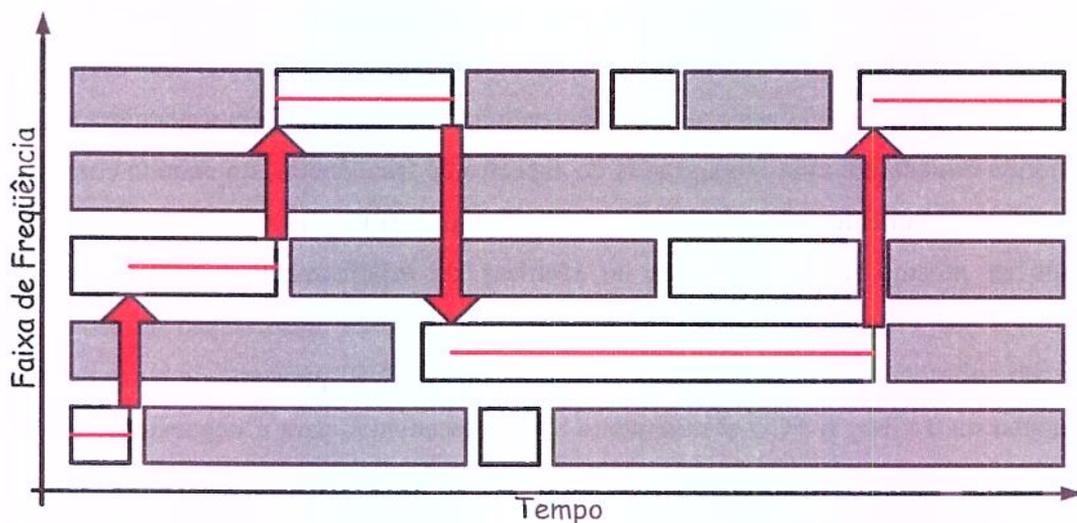


Figura 3 – Modelo de Espectro com Compartilhamento Oportunista

Os mecanismos disponíveis, para a implementação do compartilhamento oportunista, são impossíveis de enumerar. O desenvolvimento de algoritmos, para **detectar buracos no espectro**, utiliza técnicas de processamento digital de sinais associadas com técnicas de inteligência artificial.

**O compartilhamento de espectro oportunista** será uma das bases para o novo modelo de espectro proposto.

## 2.6 Uso do Espectro Licenciado como Segundo Usuário

Há dois critérios para serem analisados no uso do espectro licenciado por um segundo usuário, a escolha da banda ou das bandas para a formação de uma rede de usuários secundários e a técnica de acesso e controle das faixas do espectro dentro da banda.

Vamos analisar o caso particular daquelas faixas usadas para os serviços de radiodifusão, as rádios AM e FM e os sistemas de TV pública aberta. Nestes casos, temos apenas a transmissão simplex e estas bandas possuem grandes áreas de lacunas no espectro [31]. O FCC propôs o uso de determinadas faixas de TV para serem utilizadas pelos rádios cognitivos baseados nos seguintes fatores [16]:

1. As faixas de frequências alocadas para as emissoras de TV e não utilizadas, poderão fornecer uma grande oportunidade para implantação de sistemas WiFi, em áreas rurais, utilizando as faixas de VHF e UHF;
2. Os sistemas de TV por broadcast demandam o uso de antenas altas. Os receptores necessitam sinais com no mínimo de 10 dB de relação sinal/ruído (SNR). Esta alta relação SNR simplifica a tecnologia de detecção de buracos no espectro, canal ocupado/desocupado;
3. Finalmente, a maioria das emissoras de rádio e TV operam em regime contínuo. Além disto, dificilmente mudam de localização geográfica ou de

canal na banda de frequência, facilitando a detecção de buracos no espectro de frequência.

Estes fatores tornam as bandas de frequência de TV, e rádios AM e FM bastante atrativas para operação de rádio cognitivo na faixa de VHF, **Figura 4**.



Figura 4 - Bandas para Canais de Rádio FM e TV-VHF

O FCC propôs a discussão de três técnicas, a serem utilizados pelos dispositivos não licenciados, para determinar os espaços em branco em uma banda ou canal:

1. Sensoriamento passivo, “escutar-antes-falar-depois”, para detectar a presença de sinais de TV;
2. Localização geográfica utilizando um GPS ou outra tecnologia de localização, seguida de uma verificação na base de dados para determinar quais frequências estão em uso;
3. Usar transmissores de guia em pontos geograficamente separados, que deverão indicar quais são os espectros indisponíveis naquela área em particular.

O uso do sensoriamento passivo, associado ao parâmetro de temperatura interferente, é uma das técnicas propostas para monitorar o espectro.

Na Figura 5, é mostrado o uso por um dispositivo não licenciado do espectro licenciado. Por exemplo, esta faixa do espectro licenciado pode estar sendo utilizada por duas emissoras de TV, com separação entre elas de três canais, ou seja, 18 MHz, que é indicado como espectro licenciado. É estabelecido um limiar de temperatura interferente maior. Os usuários não licenciados, utilizando a tecnologia de rádio cognitivo com um algoritmo de detecção de buraco no espectro, buscam uma faixa do espectro que não está em uso e operam nesta faixa de frequência, abaixo da temperatura interferente.

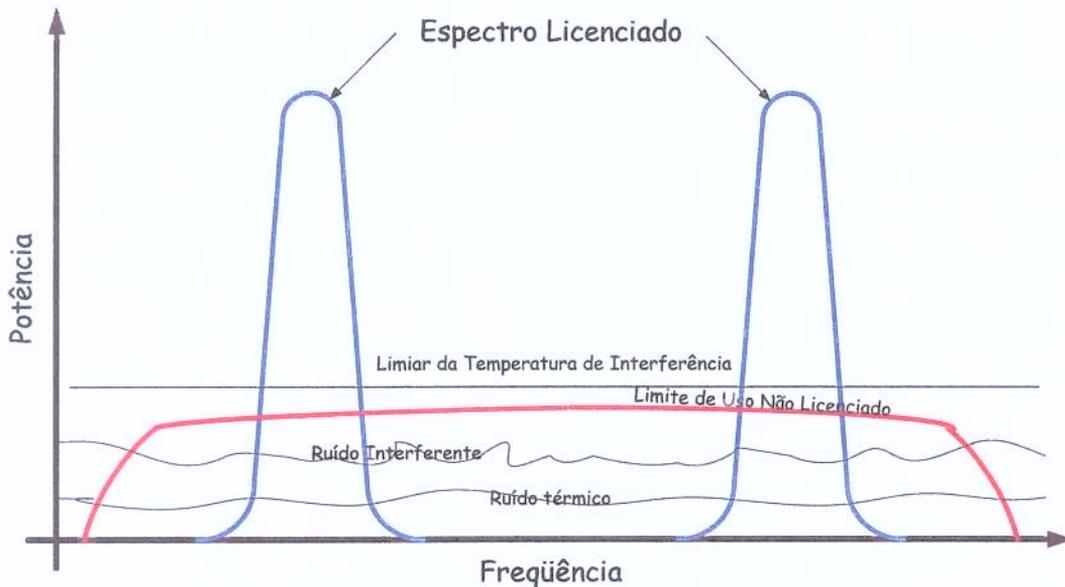


Figura 5 – Definição de Temperatura Interferente

## 2.7 Conclusões

A comunicação wireless e a introdução de novos serviços aumentam a demanda por espectro de frequência. Por exemplo, outra área em que deve ocorrer uma demanda significativa de espectro de frequência é a TV digital. As bandas de frequência de HDTV operam nas mesmas bandas, e com a mesma largura de faixa do sistema analógico atual, no entanto esta prevista a interatividade com o usuário final através de um canal de retorno. A introdução do canal de retorno irá demandar mais recursos para espectro de frequência.

O modelo tradicional de administração do espectro, espectro tecnicamente alocado e não utilizado, deve ser reformulado. Isto irá demandar uma mudança do regime licenciado exclusivo estático, para um regime de concessão dinâmico.

Há também uma consciência de que, o modelo do espectro usado até então era em parte função da tecnologia de rádio disponível, com capacidade limitada de separação dos sinais dentro de uma faixa do espectro de frequência. Com as novas tecnologias de

semicondutores e o desenvolvimento de algoritmos de processamento digital de sinais associado com inteligência artificial, é possível não só separar os sinais mais facilmente, como o rádio passa a ser agora um agente de controle e uso do espectro. Permitindo monitorar, analisar e tomar decisões resultando no melhor uso do espectro de frequência.

De uma forma geral, rádios cognitivos são por definição equipamentos capazes de: sensoriar o seu ambiente de operação; escolher a melhor condição técnica de operação; a melhor faixa de frequência; o melhor esquema de modulação; e a potência de transmissão mais adequada.

Rádio cognitivo é a plataforma básica para a transição, entre o modelo de uso de espectro estático, para o modelo de uso de espectro dinâmico.

# 3 Conceito de Rádio Cognitivo

Neste capítulo, iremos descrever os conceitos de: espaço espectral do rádio e tecnologia de rádio cognitivo. Espaço espectral define as formas de múltiplo acesso, as características de transmissão e os modos de propagação. A tecnologia de rádio cognitivo é utilizada para selecionar uma forma de onda<sup>4</sup> a ser instalada em um SDR. Forma de onda é um conceito mais abrangente do que espaço espectral, pois envolve também as características de recepção do sistema. Vamos adotar o termo forma de onda, definida pelo Joint Tactical Radio System - JTRS, para definir um enlace de comunicação wireless. Segundo esta definição, o termo forma de onda do rádio, ou simplesmente forma de onda, é usado para descrever o conjunto de todas as funções do rádio: desde, a entrada da informação em banda base, até a transmissão do sinal de RF; e na outra ponta do enlace, desde, a recepção do sinal de RF, até a saída da informação em banda base. Os principais conceitos da tecnologia do rádio cognitivo, e a implementação do mesmo, utilizando o conceito de SDR serão descritos.

---

<sup>4</sup> Forma de Onda: A definição usual de forma de onda é: representação de um sinal em um gráfico relacionando amplitude versus tempo. No âmbito do JTRS, o termo de forma de onda é usado para descrever o conjunto de todas as funções necessárias para implementar um rádio, desde a entrada do usuário até a saída de RF e vice versa. A Forma de Onda é implementada como uma função reutilizável, portátil e executável em software, independente do sistema operacional, middleware e hardware. [Fonte: <http://jtrs.army.mil>]

### 3.1 Espaço Espectral do Rádio

Os parâmetros  $(t,v,s)$ , *espectro* sobre um *volume* de espaço para uma duração de *tempo*, definem as dimensões do ambiente de operação do espectro de rádio licenciado. Também chamado de **espaço espectral do rádio**, [54] ou **electrospace**, [46]. Normalmente, cada um destes parâmetros é fixo nos termos da licença, determinando o limite do projeto do sistema de comunicações. A frequência é geralmente alocada em blocos fixos, o volume é geralmente grande, e a duração da alocação é geralmente muito longa, da ordem de anos. Estes parâmetros, associados aos seus derivados, descrevem completamente qualquer uso do espectro.

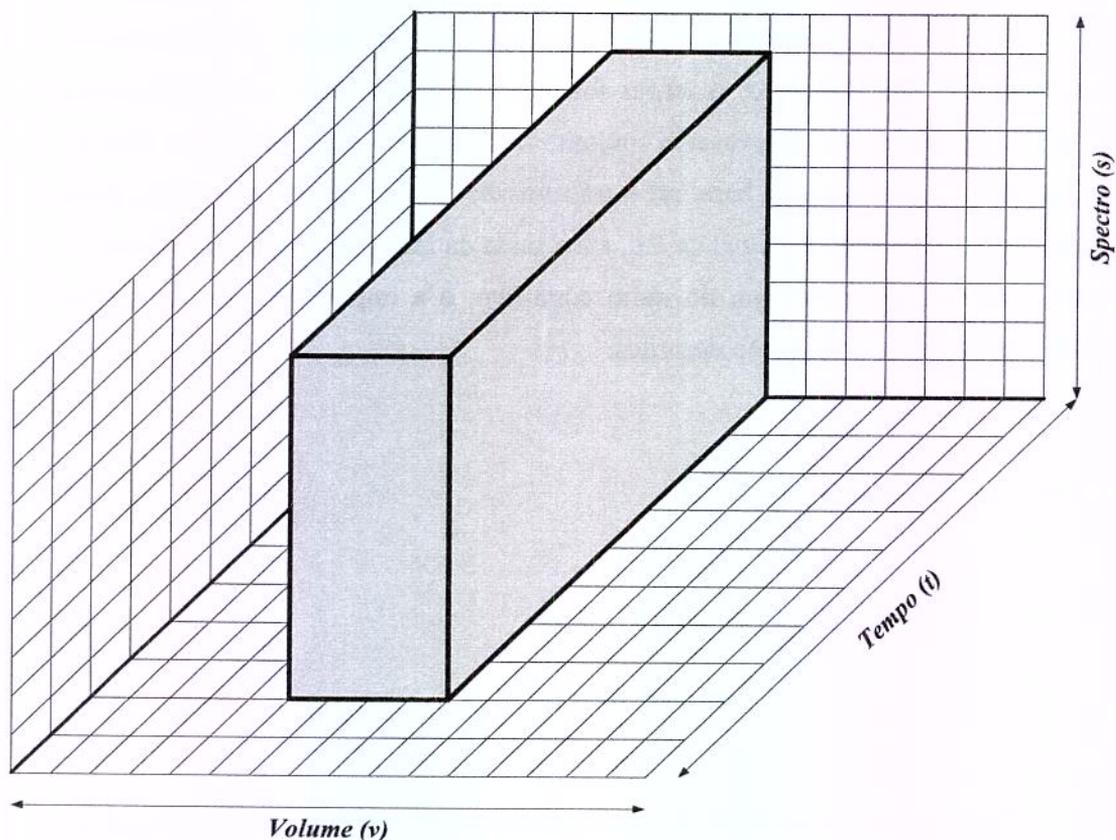


Figura 6 – Modelo do Espaço Espectral do Rádio.

O espaço espectral do rádio é definido por dois conjuntos: um de dimensão primária, e outro de dimensão secundária. A dimensão primária do espaço espectral do

rádio é definida a partir das dimensões básicas: frequência, tempo e espaço, como mostrado na **Figura 6**.

A dimensão primária está dividida em sete conjuntos, como mostrado na **Tabela 1**. No mundo real cada dimensão tem sua limitação prática como descrita na tabela.

<b>Dimensão Primária do Espaço Espectral do Rádio</b>			
<b>Dimensão</b>	<b>Parâmetro</b>	<b>Número de Dimensões</b>	<b>Descrição</b>
Frequência	kHz, MHz, GHz,...	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>A dimensão de frequência descreve a banda espectral e a subdivisão da banda (largura de faixa do canal) destinada a um tipo de serviço.</li> <li>Subdividir as faixas em canais muito estreitos resulta filtros com características impraticáveis;</li> </ul>
Tempo	segundos, minutos, horas, dias	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>A dimensão de tempo descreve o tempo de ocorrência de uma forma de onda. A subdivisão pode variar em uma larga faixa, desde sistemas com direito de uso por anos até sistemas de curtíssima duração.</li> <li>As subdivisões muito estreitas do tempo resultam em circuitos de sincronismo de difícil implementação;</li> </ul>
Espaço Geográfico	latitude, longitude e altitude	3	<ul style="list-style-type: none"> <li>A dimensão de espaço representa a região da localização física (geográfica), na qual a forma de onda é caracterizada. A região do espaço espectral inclui o volume do espaço físico dentro do qual a potência da forma licenciada deverá ser menor.</li> <li>A subdivisão do espaço físico considera a propagação do sinal idêntico em todas as direções a partir do centro como para uma antena isotrópica, infelizmente em condições reais não há como confinar o sinal de rádio dentro de uma esfera arbitrária selecionada. Portanto, a potência de transmissão, características do terreno e ângulo da antena transmissora são condições operacionais para estabelecer o limite espacial da região ocupada por um dado transmissor.</li> </ul>
Direção do Sinal	Azimute: ângulo horizontal e ângulo de elevação: ângulo vertical	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Embora similar ao espaço geográfico, esta dimensão descreve o ângulo de chegada dos sinais de rádio. A direção da antena transmissora descreve a região geográfica ocupada pelo espaço espectral do rádio.</li> <li>A transmissão entre o par transmissor e receptor deveria estar limitada somente em uma direção. No entanto, devido ao efeito multipercurso o sinal não permanece confinado somente no ângulo projetado no caminho entre o transmissor e receptor.</li> </ul>

Tabela 1 – Dimensões Primárias do Espaço Espectral do Rádio

O conjunto de dimensão secundária define a característica de transmissão da forma de onda como mostrado na **Tabela 2**.

<b>Dimensão Secundária do Espaço Espectral do Rádio</b>		
<b>Dimensão</b>	<b>Parâmetro</b>	<b>Descrição</b>
<b>Características de Transmissão</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Esquema de Modulação</li> <li>• Esquema de Codificação</li> <li>• Codificadores de Sinais Fontes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nesta dimensão a informação é processada análoga e/ou digitalmente para adaptar-se a um espaço espectral de dimensão primária específico de forma a otimizar o recurso do mesmo.</li> </ul>

Tabela 2 - Dimensões Secundárias do Espaço Espectral do Rádio

O compartilhamento de um único espaço em varias licenças pode ser realizado através de um refinamento do processo de alocação. Dois usuários poderão ser autorizados a utilizar a mesma frequência, se eles diferem no seu “volume” de operação, ou no seu “tempo” de operação. As modernas técnicas de rádio permitiram a alocação dinâmica de  $(t, v, s)$ , tal como o arrendamento e permitiram um controle fino no volume usado e no tempo de operação.

Os parâmetros, que definem as dimensões do espectro do rádio, são utilizados por engenheiros para projetar os sistemas de comunicação sem fio. Estas técnicas de múltiplo acesso permitem que, diferentes formas de onda ocupem diferentes subespaços, possam ser diferenciadas uma das outras pelas suas propriedades de ortogonalidade, ou pela utilização de métodos estatísticos. Os três principais sistemas de múltiplo acesso são FDMA, TDMA e CDMA, ver **Figura 7**.

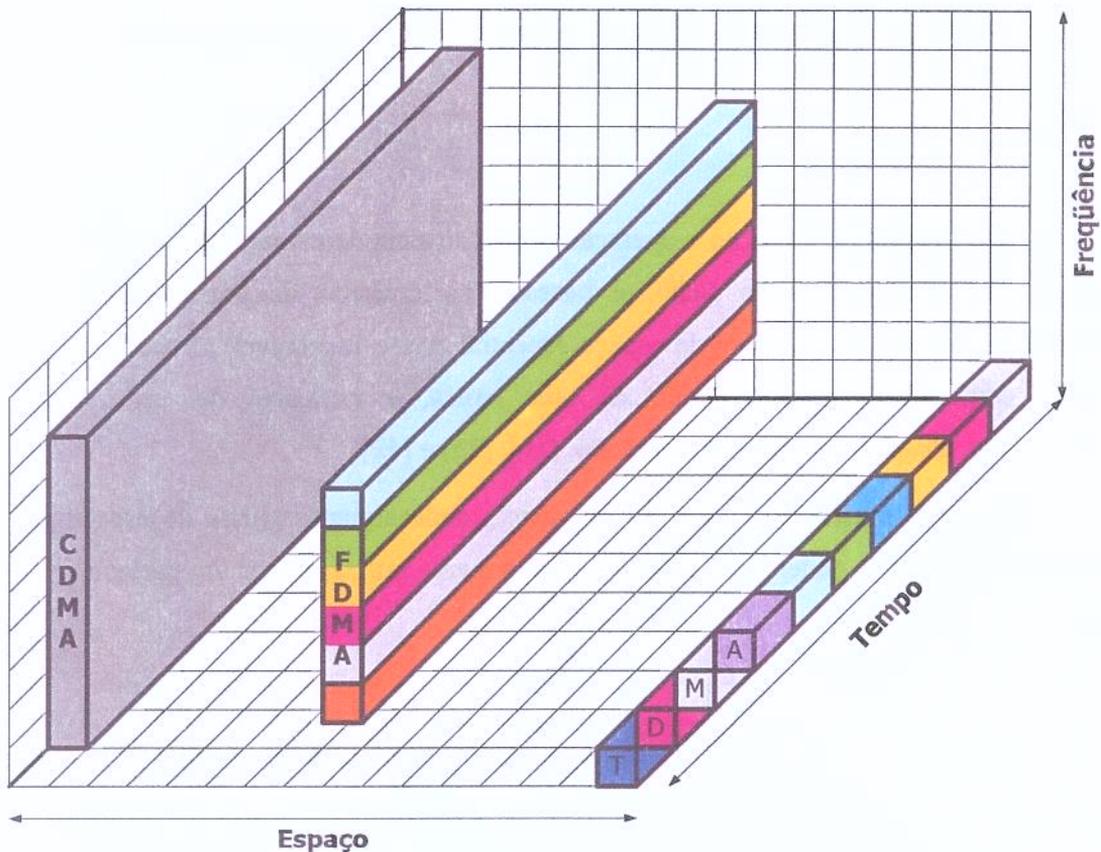


Figura 7 – Modelo Espaço Espectral Multidimensional

O espaço espectral do rádio é uma descrição dos parâmetros de transmissão, e das características do enlace de propagação. A descrição do espaço espectral não inclui as características do receptor, embora ela descreva os sinais de rádio que podem causar interferências em outros usuários. Os receptores não causam interferência em outros usuários. Ao electospace está associado o custo de regulação do espectro, enquanto que o receptor não acrescenta nenhum custo extra na regulação. Esta divisão é conveniente para o propósito de regulamentação.

Por exemplo, na especificação espaço espectral do rádio do padrão IEEE 802.11b são definidos o esquema de modulação, a faixa de frequência de operação, a potência máxima, etc. mas não são especificadas as características do receptor, como por exemplo, à sensibilidade.



Os espaços vazios, do espaço espectral observado, na **Figura 8**, tais como: faixas de frequências dentro uma banda no FDMA; slots vazios dentro de um quadro TDMA; e potências no CDMA, podem ser utilizadas para constituir uma segunda rede de comunicações. Esta rede poderá ter características de serviços completamente independentes da rede primária, a qual é denominada de rede secundária. A rede secundária poderá operar quando, o espaço espectral não estiver sendo utilizado pelo usuário primário, criando assim a figura de **usuário secundário ou oportunista**. A formação de uma rede secundária, dentro de uma mesma dimensão do espaço espectral, está baseada na oportunidade do usuário secundário identificar subespaços vagos.

Poderemos classificar dois tipos de acesso secundário:

- Acesso como usuário secundário não licenciado, em partes não utilizadas por subespaços do espectro licenciado. Neste caso são utilizados espaços adjacentes deixados como faixa de guarda;
- Acesso como usuário secundário licenciado, em partes do espectro não usadas temporariamente pelo usuário primário licenciado. Neste caso, são utilizados os mesmos espaços dos usuários primários.

No primeiro caso, a formação de uma rede secundária dentro das bandas de guarda, irá aumentar o nível de interferência dentro da rede primária. As interferências podem ocorrer nas dimensões de frequência e espaço. Considere um espaço espectral, de uma banda dividida em múltiplos espaços para uso licenciado:

- No domínio do espaço geográfico, os canais de mesma frequência são dispostos em pontos distantes geograficamente, para evitar a interferência cocanal;
- No domínio da frequência, dentro de um mesmo espaço geográfico, são deixados canais de guarda para minimizar o efeito de interferência de canal adjacente.

O usuário oportunista escolhe, dentre os canais vagos, o cocanal com menor ruído interferente para formar uma rede secundária. A transmissão do usuário secundário não deve causar interferência, e nem a quebra de serviço da rede primária. Por exemplo, na

banda alocada para estações de TV, encontramos muitos espaços em branco com largura de faixa idêntica à faixa ocupada, denominadas de faixas de guarda. Estas bandas de guarda foram deixadas para minimizar o efeito da interferência adjacente. Estas faixas poderão ser utilizadas para formar uma nova rede secundária oportunista, com um limite de transmissão limitado.

No segundo caso, parte do espectro licenciado pelo usuário primário, poderá ser sublocada para um usuário secundário sem autorização do órgão regulador. Usuários primários obtêm licença através de leilão, junto aos órgãos reguladores para uso de uma banda do espectro. Na prática, é leiloada uma banda inteira e eles pagam pela mesma, usando ou não. No entanto, é identificado que em algumas regiões há disponibilidade de canais vagos, por longo período de tempo. Os detentores da licença poderiam leiloar partes de seu espectro, para uso nas redes de usuários secundários. Os transmissores secundários deverão estar em conformidade com o conjunto de técnicas e regras operacionais, definidas para o usuário com licença primária. Na essência, isto inclui os parâmetros de faixa de frequência e largura de faixa alocada, o espaço geográfico e as emissões máximas dentro e fora da faixa.

Por exemplo, uma operadora de celular, em uma determinada região, adquiriu através de leilão, toda a faixa de operação para a banda B. No entanto, ela não está utilizando parte do espectro continuamente, assim ela poderia alugar ou leiloar parte do espectro para uso por uma rede secundária.

Baseado nas considerações descritas acima, o dispositivo rádio do usuário secundário, requer características mais complexas do que simplesmente reprogramar uma forma de onda. O rádio requer um sistema com capacidade de inteligência para se adequar ao ambiente, surgindo assim, o conceito de rádio cognitivo. De uma forma geral, o rádio cognitivo deve ser capaz de desempenhar as seguintes funções [24], [33] e [35]:

1. Encontrar a posição geográfica atual;
2. Encontrar canais vagos na banda espectral de interesse;
3. Determinar potência máxima de transmissão permitida ao usuário secundário;

4. Identificar o esquema de modulação do usuário primário;
5. Monitorar ambiente;
6. Ajustar as modificações do ambiente;
7. Negociar com usuário primário a máxima interferência;
8. Negociar protocolo entre usuários secundários.

O rádio cognitivo irá permitir a implantação de um novo modelo de comunicação wireless, deixando o modelo atual de alocação estática do espectro para um modelo de alocação dinâmico. No modelo atual, a instalação da forma de onda é praticamente estática, ocorrendo sempre com a interveniência do usuário e com o rádio fora de operação. Por exemplo, o rádio pode ter sua forma de onda programada durante o processo de fabricação ou programada em campo no caso do uso da tecnologia de SDR. A proposta do rádio cognitivo é a instalação autônoma de uma forma de onda com o rádio em operação, denominada de **programação em tempo real**, com pouca ou sem nenhuma interveniência do usuário.

### 3.3 Definição de Rádio Cognitivo

O termo Rádio Cognitivo foi cunhado por Joe Mitolla em 1999, para descrever uma família de rádios com a capacidade de cognição<sup>5</sup>, [33].

O desenvolvimento e implementação de rádios cognitivos, e rede de rádios cognitivos, tem despertado atenção em diversos centros de pesquisa em todo o mundo,

---

<sup>5</sup> Do website da dictionary.com, cognição é definida como: processos mentais do conhecimento, incluindo aspectos tais como consciência, percepção, raciocínio e julgamento; Aquilo que entra para o conhecimento, através da percepção, raciocínio, ou intuição.

como uma forma de otimizar o uso racional do espectro de frequência. Como exemplo, apenas no Virginia Tech, há duas propostas de implementação para rádio cognitivo, baseadas em plataformas completamente diferentes. O grupo Mobile Portable Research Group - MPRG do Virginia Tech trabalha com a proposta de desenvolver um rádio cognitivo implementado em uma plataforma SDR, [40] e [41]. O MPRG possui uma plataforma implementada de SDR, baseada na arquitetura Software Communications Architecture – SCA, denominada Open Source SCA Integrated Embedded – OSSIE. O grupo do Center for Wireless Telecommunications – CWT, também do Virginia Tech, propôs um modelo de rádio cognitivo baseado em algoritmos genéticos, [44] e [45].

Nosso trabalho, foi grande parte desenvolvida no MPRG, assim seguimos a proposta do grupo e estamos propondo a implementação de um rádio cognitivo baseado no SDR utilizando a plataforma OSSIE, denominada “Uma Plataforma Multiagente para Rádio Cognitivo”, do inglês “A MultiAgent Framework for Cognitive Radio”.

Rádio cognitivo é um tipo de rádio que, conhecendo as preferências do usuário e com capacidade de sensoriar o ambiente ajusta-se automaticamente ao ambiente, para fornecer o melhor serviço disponível. A capacidade de ajuste ou decisão permite a reinstalação de uma nova forma de onda através do SDR para adaptar-se ao ambiente.

### 3.3.1 Ciclo Cognitivo

O processo de operação do rádio cognitivo, analisado como uma máquina de dois estados, possui dois estados: o **estado dormente** e o **estado consciente**, tal como mostrado na **Figura 9**.

O **estado dormente** ocorre por um período de tempo relativamente longo, de minutos, horas ou mesmo dias, durante o qual o rádio cognitivo observa o ambiente e processa algoritmos da máquina de conhecimento. Neste estado não há interferência do rádio cognitivo nas operações de rádio propriamente ditas. As oportunidades de aprendizado não resolvidas durante o estado dormente são levadas à atenção do usuário ou da rede, no estado consciente. No estado dormente é onde o rádio cognitivo opera efetivamente como rádio, com a forma de onda instalada. Neste estado o rádio cognitivo monitora continuamente o ambiente. Os sensores estão implementados no SDR. A

mudança de estado, dorminte para consciente, é disparada nos seguintes casos: power-up, outage, handoff,  $BER < BER_{\text{Mínimo}}$ , etc. ou ainda pela rede de rádios cognitivos.

No **estado consciente** se inicia um ciclo cognitivo primário. O ciclo cognitivo é estimulado através de um ou mais eventos. Os eventos disparam ações cognitivas, para que algum ajuste seja efetuado.

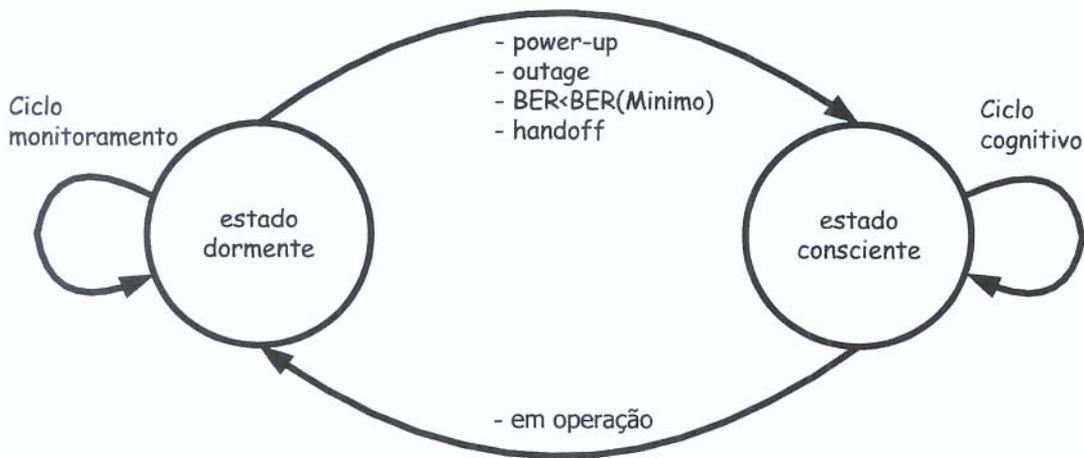


Figura 9 - Estados do Rádio Cognitivo

O **ciclo cognitivo** [35] é definido como, o ciclo de iteração do rádio cognitivo com todo ambiente onde ele está inserido. O rádio cognitivo continuamente observa, orienta a si próprio, cria plano, decide e atua no ambiente. A **Figura 10**, adaptada de [33], mostra um ciclo cognitivo completo como descrito a seguir.

Na etapa **Observa**, o rádio cognitivo observa seu ambiente, analisando informações de seus sensores. Durante esta etapa, ocorre em paralelo, o conhecimento do ambiente pela etapa **Conhece**. Como exemplos de parâmetros observados temos medida do ruído de interferência, localização geográfica, temperatura de interferência, etc. Estas informações são pré-processadas através de filtros e servem como parâmetros auxiliares de decisão, para a etapa de orientação.

Na etapa **Orienta**, o rádio cognitivo orienta a si próprio para determinar o nível da prioridade associada com o estímulo: imediato, urgente ou normal. Por exemplo, uma falha no sistema de energia, requer uma ação “*imediata*” e ele envia uma mensagem associada com a orientação recebida. Da mesma forma, uma falha de comunicação

irrecuperável, requer uma realocação completa de recursos, tal como, seleção de outro canal de rádio frequência. Neste caso deverá ser enviada uma mensagem ao usuário através de uma interface Graphic User Interface - GUI, como exemplo um “*warning*”. Para o caso de uma orientação de operação “*normal*”, deverá ser acionada a etapa **Planeja**. A etapa planeja, por exemplo, pode atuar em dois casos: o usuário poderá estar saindo da área de cobertura daquela rede e requer uma operação de roaming; ou um aumento gradual da taxa de erros de bits e requer uma mudança no tipo de serviço.

Na etapa **Planeja**, deverá ser elaborado um plano para a instalação de uma nova forma de onda. Por exemplo, um aumento no nível de interferência, com um esquema de modulação mais robusto, à custa de uma menor taxa de bits; caso contrário, condições favoráveis permitem instalar uma forma de onda com uma taxa de bits maior. Esta fase deve incluir raciocínio sobre eventualidades. A etapa **Decide**, seleciona entre continuar com a forma de onda instalada ou instalar uma nova.



## 3.4 Rádio Cognitivo baseado em SDR

A idéia básica do Rádio Cognitivo, baseado na arquitetura SDR, é desenvolver um método de otimização de seleção de forma de onda, a ser instalada pelo SDR, de acordo com o ambiente de operação do rádio. Inicialmente iremos fazer uma descrição do SDR [7], [35] e [41].

### 3.4.1 SDR

O SDR pode ser visto como resultado de um processo evolucionário na tecnologia de equipamentos de rádio. É a migração dos primeiros equipamentos, com sua forma de onda totalmente definida em hardware, para os equipamentos com forma de onda totalmente reprogramados através de software. Neste sentido, o processo evolutivo pode ser descrito de uma forma geral como:

- i. **Rádios Hardware:** Nenhum parâmetro pode ser alterado após a produção, a Forma de Onda é totalmente definida ainda na fase de projeto do equipamento. Frequência de transmissão, tipo de modulação e outros parâmetros referentes à faixa de radiofrequência de operação são determinados por hardware e não poderão ser alterados, sem alterações no hardware do mesmo.
- ii. **Rádios Digitais:** Alguns poucos parâmetros da forma de onda podem ser reprogramados após a produção. Frequência de transmissão, tipo de modulação e outros parâmetros referentes à faixa de radiofrequência de operação podem ser definidos após a etapa de produção. O rádio realiza parte do processamento ou transmissão, utilizando técnicas digitais e sintetizadores de frequência.
- iii. **SDR:** Forma de Onda totalmente reprogramada após a produção. Todas as funções, incluindo formas de onda e camadas de aplicações, podem ser configuradas e reconfiguradas por software em qualquer etapa após a produção.

O termo software radio foi criado por Joe Mitola em 1991 [34], para se referir a uma classe de rádios reprogramáveis ou reconfiguráveis, que aceita funções de controle e tráfego completamente programáveis e suportam uma larga faixa de frequências,

interfaces aéreas e aplicações. Em outras palavras, o mesmo hardware poderá executar diferentes funções, em diferentes instantes de tempo.

No âmbito do SDR Forum [50], a arquitetura SDR é definida como um elemento de uma rede sem fio, cujo modo de operação poderá ser alterado ou expandido, após o processo de fabricação, via software. SDR é uma plataforma de hardware e software genérica, capaz de suportar os diversos tipos de padrões de comunicação nos diferentes tipos de sistemas. A arquitetura de um rádio definido por software permite definir um rádio multimodo e multifaixas, com capacidade dinâmica, definida através de software em todas as camadas do protocolo, incluindo a camada física. A necessidade de adaptação por software, de uma plataforma de hardware flexível, surge dos problemas da constante evolução e inovação na indústria de comunicações sem fio, particularmente nas técnicas de modulação, protocolos, serviços e mudança de padrões. As implementações destas técnicas reprogramáveis requerem a troca do processamento analógico para o processamento digital dos sinais, tanto quanto possível, dentro dos transceptores da unidade móvel - UM e da estação rádio base - ERB. O software define todas as propriedades da plataforma, desde a criptografia até as aplicações, e através da reprogramação uma nova forma de onda poderá ser instalada em campo, com novas características.

A evolução do rádio, para arquiteturas semelhantes às arquiteturas computacionais, induziu o desenvolvimento de arquiteturas de hardware e de software sob aspecto funcional do SDR. Os estudos e propostas de arquiteturas de hardware, para o SDR, tiveram início nos anos 90 e se encontram em estágio avançado. As novas tecnologias na área de semicondutores de uma forma geral, e mais especificadamente a área de processadores digitais de sinais, alavanca o desenvolvimento de novas **arquiteturas de hardware** para SDR. O desenvolvimento das **arquiteturas de software** para o SDR é mais recente e tem recebido diferentes propostas de diversos órgãos, tais como, órgãos governamentais, não governamentais e empresas privadas. No item 3.4.2, faremos as considerações a respeito de arquitetura de software para SDR.

Sob o ponto de vista do rádio cognitivo, a arquitetura de hardware do SDR, será tratada como um elemento capaz de alterar sua forma de onda através de um controle de software, tal como mostrado na **Figura 11**.

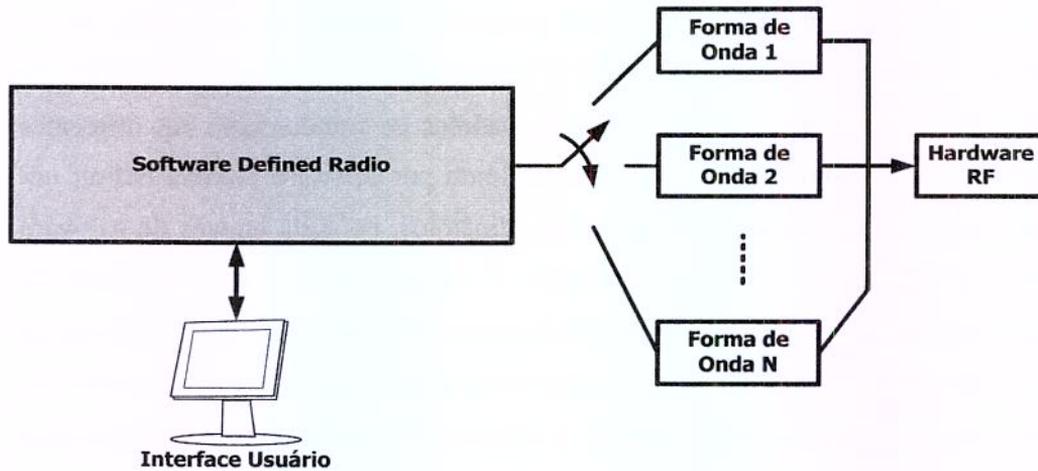


Figura 11 - Plataforma do SDR

De uma forma geral, o SDR, é uma tecnologia na qual todo o processamento, incluindo quase toda a camada física, é realizado através de um hardware programável, microprocessado ou não.

O modelo em camadas é utilizado para a implementação de software do SDR. O modelo define quatro camadas como mostrado na **Figura 12**. A primeira camada define o **sistema operacional** da arquitetura de software, devendo ser utilizado um sistema operacional em tempo real. A segunda camada, chamada de **middleware**, está situada entre o sistema operacional e a arquitetura de software do SDR. As funções do middleware são fornecer serviços, tais como, identificação, autenticação, nomeação, negociação, segurança e diretórios.

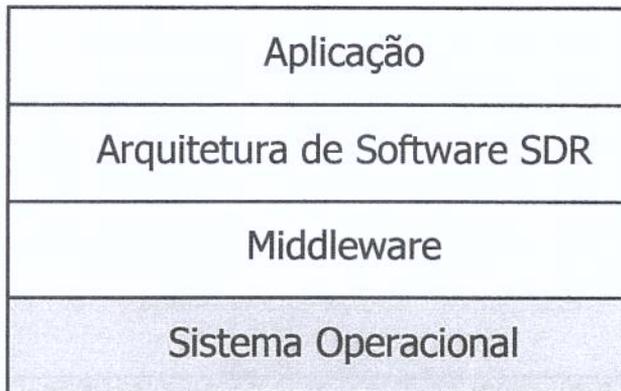


Figura 12 - Modelo em Camadas do SDR

A terceira camada, **arquitetura de software** para o SDR, descreve as funções do SDR, descritas em 3.4.2. A quarta camada, camada de **aplicação**, implementa a interface homem máquina para facilitar a seleção da forma de onda de operação do rádio.

### 3.4.2 Arquiteturas de Software para SDR

A arquitetura de software descreve os componentes de um sistema e suas iterações [40]. Componentes são definidos como elementos de computação básicos. Iterações entre componentes incluem as abstrações de comunicação de alto nível, tais como, passagem de mensagens e requisições de tarefas computacionais em outros elementos. A arquitetura de software tem metas diferentes para aplicações distintas, particularmente estamos interessados em arquitetura de software para dispositivos de comunicações, chamado de arquitetura de software de comunicações.

Existem diversas propostas de arquitetura de software de comunicações, projetadas para aplicações militares e comerciais, conforme mostrado na **Tabela 3** [41]. Destacamos a proposta do JTRS [49], a qual foi utilizada pelo Virginia Tech para implementação da arquitetura OSSIE [50]. Dentre as principais metas estabelecidas pelo JTRS destacamos duas: a construção de uma arquitetura comum para aplicações comercial e militar; e uma arquitetura com especificação aberta. Como vantagem, a mesma deverá permitir uma atualização tecnológica, através da inserção de novas funções, com o uso de software ou troca de módulos.

Nome do Padrão	Patrocinador	Arquitetura
<b>JTRS</b> <b>Joint Tactical Radio</b> <b>System</b>	Departamento de Defesa dos EUA (DoD)	Especificação completa disponível ao público em geral. SCA – Software Communications Architecture. Arquitetura Aberta.
<b>DOCSRA</b> <b>Distributed Object</b> <b>Computing Software</b> <b>Radio Architecture</b>	SDR Forum	Arquitetura Recomendada pelo IEEE.
<b>CPRI</b> <b>Common Public Radio</b> <b>Interface</b>	Ericsson AB, Huawei Technologies Co. NEC Corporation, Nortel Networks SA and Siemens AG.	Especificação das interfaces internas de estação rádio base entre REC – Radio Equipment Control e RE – Radio Equipment disponível ao público em geral.
<b>WWRF SDR</b>	WWRF WG3 SDR Group associado ao Wireless World Research Forum	Modelo de referência para SDR
<b>GNU Software Radio</b>	GNU	Arquitetura aberta.
<b>Outros</b>	Fabricantes: Pentek, Vanu, etc	Arquitetura Proprietária.

Tabela 3 - Padrões de Arquitetura de Software de Comunicações

### 3.4.3 Especificação do SDR baseado na SCA.

A arquitetura de software SCA é baseada em uma estrutura de software aberto, para administrar e interconectar a aplicação de recursos, em um ambiente de computação distribuído [53]. As principais características da especificação SCA são:

- i. Especificação da arquitetura de software aberta;
- ii. Padrão para a definição de serviços de rádio, tais como, instalação, definição de parâmetros, monitoramento e controle. Facilitando a interoperabilidade, a reprogramabilidade e operação multicanal/multimodo;
- iii. Padrão de Interface de Programação de Aplicação, do inglês, Application Programming Interfaces - API. Permite independência entre software e hardware:
  - a. Portabilidade do dispositivo (hardware) e da aplicação (software);
  - b. Rápida inserção de novas tecnologias;
  - c. Flexibilizar a introdução de novos produtos.

A arquitetura de software é baseada em um modelo de referência, com seus componentes e interconexões [34]. O modelo adotado está mostrado na **Figura 13**. A seguir, apresentamos uma descrição genérica da função de cada um dos componentes deste modelo de referência.

- 1) **MSG PROC & IO**. Processa fontes de informações multimídia (áudio, dados e imagens) e interface com dispositivos periféricos. As fontes de informações podem estar em pontos remotos em relação ao rádio e conectados ao mesmo através do componente de serviço e suporte de redes.
- 2) **INFOSEC**. Processam informações de segurança, implementado algoritmos de criptografia com as seguintes funções: evitar fraude, privacidade e integridade dos dados. O uso deste componente é opcional.
- 3) **LINK PROC - Serviços e Suporte de Rede**. Este componente processa as conexões do nó do rádio com serviços e com outros elementos de uma rede. Pode ser implementado com um dos sistemas de multiplexação digital, tais como, hierarquia PCM, hierarquia SDH ou rede LAN.
- 4) **MODEM**. Este componente processa a codificação e decodificação do canal. Algumas das funções de comunicações implementadas neste bloco são: modulador e demodulador do sinal banda base, recuperação de sincronismo de bit, equalização, algoritmos de linearização do amplificador de potência, filtragem dos dados, etc.
- 5) **RF**. Componente responsável pela conversão do sinal de RF para banda base ou frequência intermediária, permite ao SDR operar em múltiplas faixas de frequência. Algumas das funções implementadas nestes componentes são: amplificador de potência, amplificador de baixo ruído, diplexadores e/ou circuladores, etc. Uma das funções principais deste componente é o processamento de FI.
  - i. **Processamento de FI**. Este bloco é responsável pela canalização de subida e descida do rádio. Parte dela é implementada com técnicas digitais e parte com técnicas analógicas. A tendência é a mesma ser

toda implementada com tecnologia digital, no entanto a taxa de amostragem dos conversores de sinais analógicos para digitais (A/D) e de sinais digitais para analógicos limitam o avanço da FI em direção a antena. Em um SDR ideal estes conversores deverão ser colocados na saída/entrada da antena.

- 6) **ANTENAS.** Parte integrante do front-end, no software defined radio ideal, deverá permitir ao equipamento operar em múltiplas faixas do espectro de frequência.

A escolha da construção de componentes utilizando linguagem **orientada a objeto** foi essencial para satisfazer requisitos de interoperabilidade e reprogramabilidade, no caso em particular para implantação da plataforma OSSIE, foi utilizada a linguagem C++. Cada componente funcional da **Figura 13** corresponde a uma **classe**. As classes estão incluídas na biblioteca de forma de onda. A interface homem máquina efetua a seleção da forma de onda, dentre as diversas disponíveis na biblioteca, com a qual o rádio irá efetivamente operar.

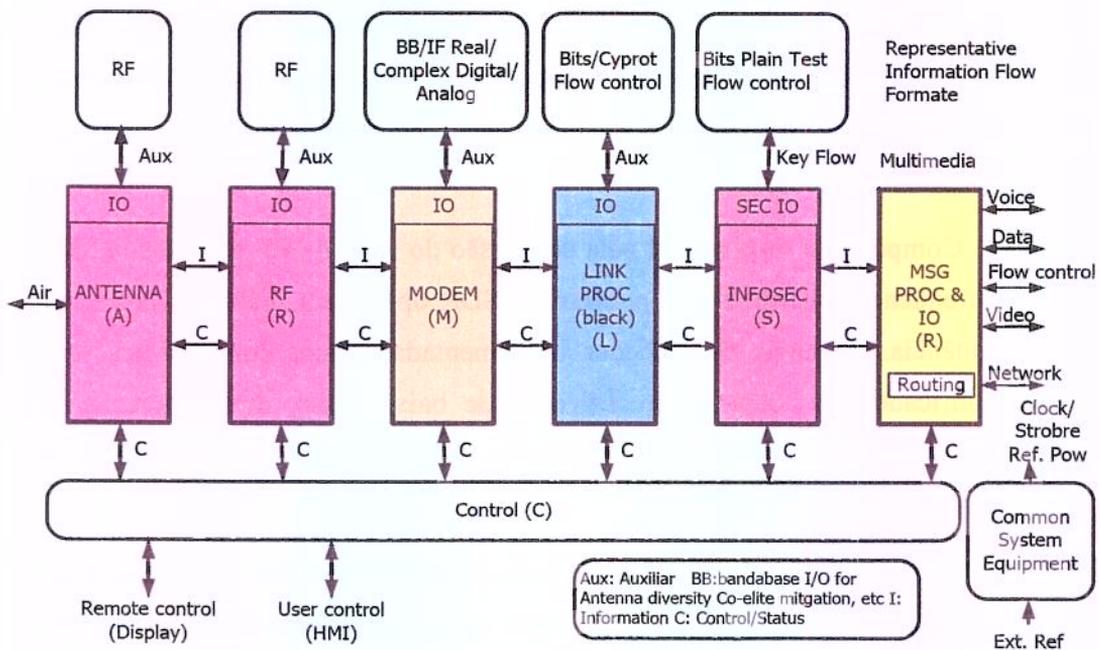


Figura 13 - Modelo de Referência para o SDR

A **Figura 14** apresenta o modelo em camadas para a arquitetura de software utilizando o padrão SCA [49], descritas a seguir:

- i. Core Framework (CF), ou simplesmente framework, implementa a arquitetura de software SCA;
- ii. Middleware CORBA fornece a base para interação entre os componentes. O SCA recomenda o uso do CORBA mínimo, padronizado pela organização não governamental Object Management Group – OMG, fornecendo um tratamento transparente de informação através dos diferentes componentes;
- iii. Sistema Operacional em Tempo Real, do inglês, Real Time Operating System - RTOS. O sistema operacional em tempo real deve ser compatível com a especificação POSIX 1013. O RTOS é implementado na primeira camada de abstração do hardware. O RTOS suporta aplicações e os serviços para o Core Framework.



Figura 14 - Modelo em Camadas - SDR/SCA

O ambiente de operação do SDR é composto pelo sistema operacional, middleware e framework.

A **Figura 15** mostra a relação entre o ambiente de operação do SDR e os componentes não pertencentes ao núcleo do SDR. A estrutura de software do SDR mostra que, os componentes não pertencentes ao núcleo, são abstraídos do hardware básico e todas as entidades são conectadas através de um barramento de software, utilizando Common Object Request Broker Adapter - CORBA. Os adaptadores são

fornecidos para permitir que componentes não CORBA, tais como, modems, dispositivos de segurança e componentes de entrada e saída façam uma interface com componentes CORBA, via o barramento CORBA.

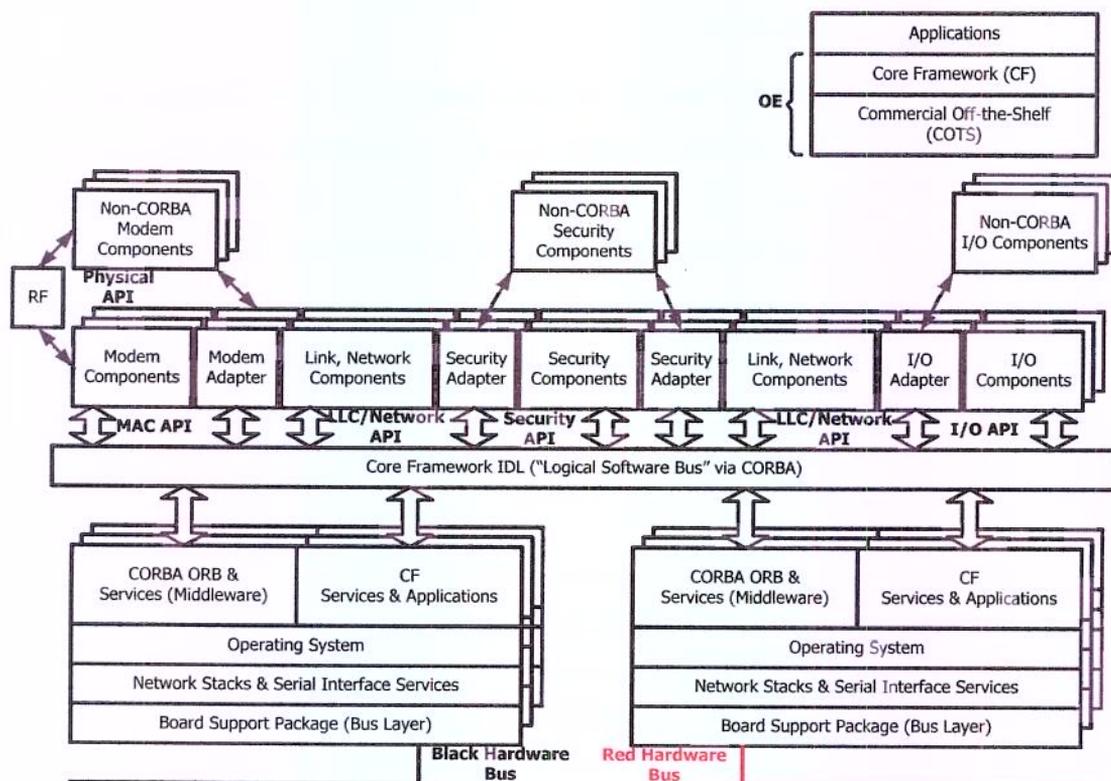


Figura 15 - Estrutura do Software para a especificação SCA.

A Figura 16 mostra a integração de todos os componentes do SDR baseados na arquitetura SCA.

A plataforma de hardware é composta basicamente por dois elementos, o hardware digital e o hardware de RF. O ambiente de software é composto dos seguintes blocos: RTOS; middleware; os drivers dos dispositivos do sistema operacional em tempo real; a camada de abstração de hardware; e finalmente a camada de aplicação, onde é feita a seleção da formas de onda.

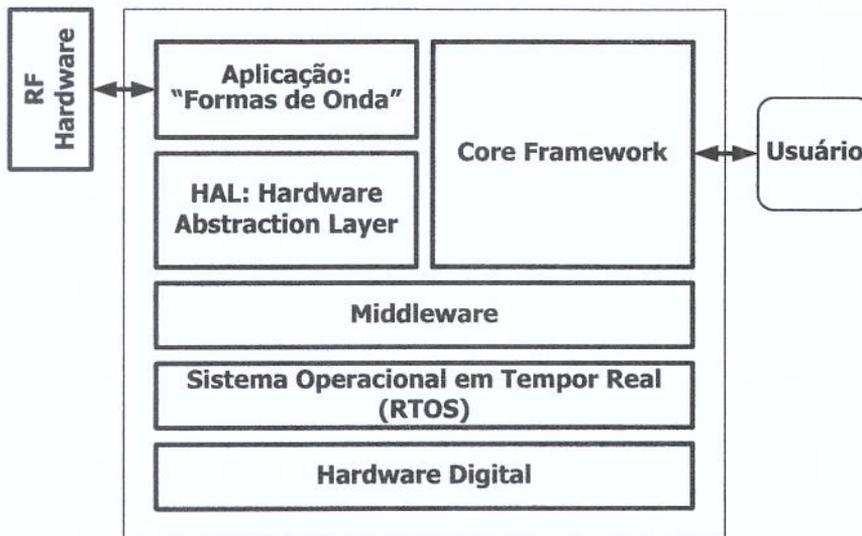


Figura 16 - Componentes do SDR

A especificação SCA limita-se a definir, os requisitos mínimos de integração do SDR, de maneira a permitir inovações e características proprietárias dentro de um domínio específico. Outras características importantes da especificação SCA são:

- i. Arquitetura de componentes distribuídos;
- ii. Separa as aplicações do ambiente de operação;
- iii. Permite a introdução de aplicações segmentadas;
- iv. Define interface comum para gerenciamento e disposição de componentes de software.

#### **Evolução da Tecnologia SDR.**

Os primeiros projetos de arquitetura de software para o SDR foram baseados em uma arquitetura proprietária.

Na segunda fase foi introduzido o conceito de arquiteturas de software padrão para o SDR, como por exemplo, a especificação SCA. No entanto nesta fase para aproveitar o hardware existente é necessário o desenvolvimento de adaptadores de hardware.

Na terceira fase, estão sendo padronizadas as APIs para a camada Hardware Abstraction Layer – HAL. Todo dispositivo para integrar a plataforma SCA nesta fase

deverá ser especificado e projetado para atender estas APIs, conforme descrito na especificação [49].

### Plataforma OSSIE.

**Open Source SCA Integrated Embedded** é o nome que recebeu o SDR implementado pelo MPRG do Virginia Tech. A plataforma **OSSIE** está em conformidade com o padrão SCA, [38] e [49].

### 3.4.4 Rádio Cognitivo baseado na arquitetura SCA

Como citado, nosso objetivo é a implementação de um rádio cognitivo baseado na plataforma SDR, cuja tarefa fundamental é instalar a forma de onda que melhor se adapta ao ambiente de operação do rádio. Esta operação deverá ocorrer de forma autônoma, para isto foram desenvolvidas duas propostas, descritas a seguir.

**Primeira Proposta.** A arquitetura de software da primeira proposta foi baseada na introdução de mais funcionalidades ao núcleo da arquitetura SCA, a **Figura 17** mostra a nova plataforma. O SDR com capacidade de rádio cognitivo, baseada na plataforma de OSSIE.

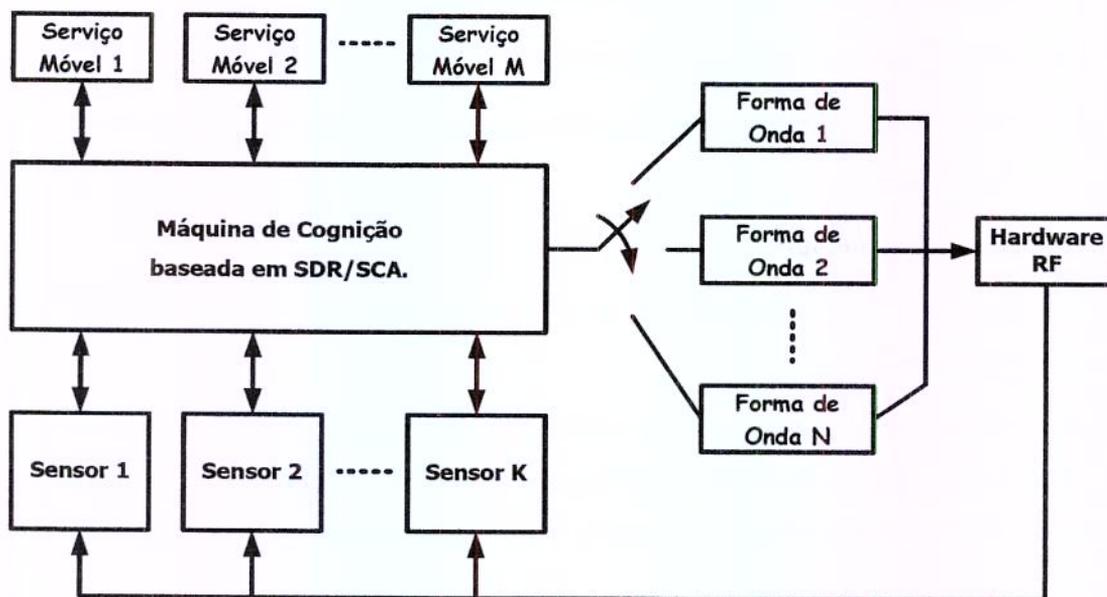


Figura 17 - Cognitive Radio baseado em SDR/SCA

Nesta plataforma, um conjunto de  $K$  sensores de RF passivos, associados com  $M$  diferentes tipos de serviços móveis, seleciona uma entre  $N$  formas de ondas para atender a um dos  $M$  serviços. A tarefa fundamental do algoritmo cognitivo é desenvolver um método de otimização para seleção de uma das formas de onda.

Foram desenvolvidas duas categorias de parâmetros: os dependentes do ambiente de operação do sistema; e os baseados nos serviços móveis disponíveis. A classe da qualidade de serviço (QoS) define o estado de operação do sistema. Por exemplo, com uma QoS default o equipamento fornece serviços básicos para o usuário, e na QoS mais eficiente o sistema opera na máxima taxa de dados. As determinações da disponibilidade para operação são baseadas em dois critérios: serviços e recursos. O primeiro ponto é qual o tipo de serviço que o usuário deseja e o segundo, os recursos disponíveis neste momento. Temos também uma terceira condição de operação do sistema, serviço arbitrado por eventos externos, por exemplo, na hora do rush ou em condições anormais, como desastres naturais ou causados pelo homem. Nestes casos a máxima taxa de dados é limitada, para permitir que todos os usuários tenham acesso aos serviços mínimos.

A **Figura 18**, mostra a incorporação das funções cognitivas na arquitetura do SDR/ SCA. O Cognitive Engine interage com o *RF Device*, *Domain Manager*, *I/O Device* definidos na estrutura de software SCA.

Durante os testes foi verificado que, a forma de onda deve ser totalmente desinstalada para em seguida ser instalada. Este fenômeno faz com o rádio apareça como “outage” para os demais elementos da rede. Assim, é muito importante um sistema de SDR com capacidade computacional suficiente alta, para reduzir o período de reinstalação, caso contrário, poderá ter conflitos na alocação do espectro.

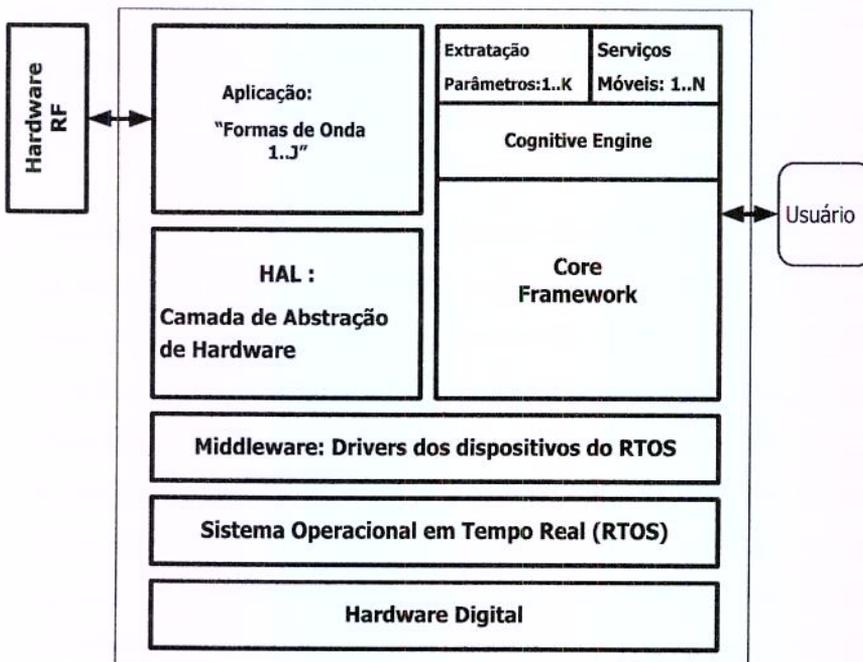


Figura 18 - Componentes da Arquitetura SCA modificados para Rádio Cognitivo

No projeto inicial os componentes de cognição foram embutidos na arquitetura OSSIE. No entanto, estudos e testes mostraram que:

- 1) Descaracterização da implementação do OSSIE como SCA conforme;
- 2) A tarefa de reconfiguração do SDR ficou lenta;
- 3) A introdução de novas tarefas, tarefas de cognição, na plataforma OSSIE são ineficientes, pois é necessário recompilar todo o código;
- 4) O sistema não é extensível.

**Segunda Proposta.** A segunda proposta separa a máquina de cognição do SDR, como mostrado na **Figura 19**. Neste modelo, temos o mesmo conjunto de K sensores de RF passivos, instalados na plataforma SDR e a máquina de cognição como uma atividade separada e independente do SDR. As inclusões destes sensores são previstas na recomendação SCA.

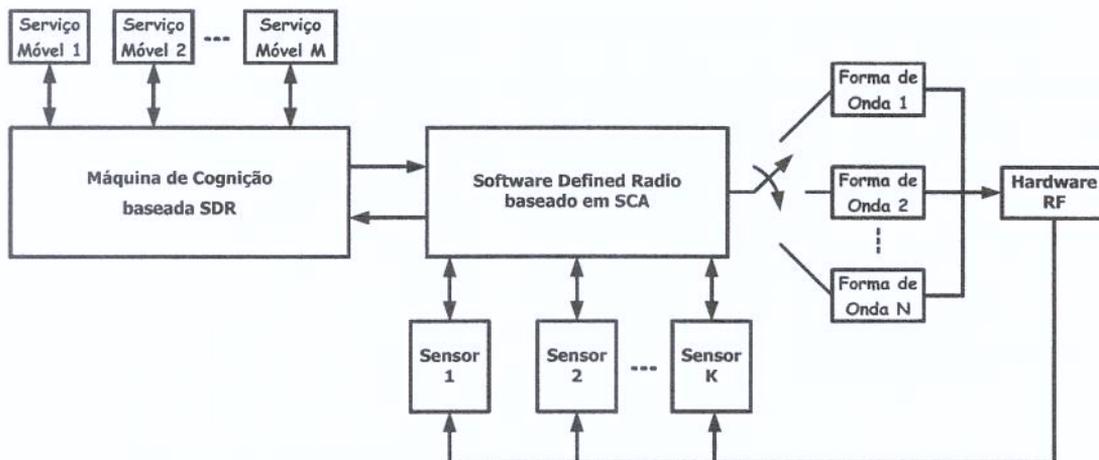


Figura 19 - Arquitetura do Rádio Cognitivo baseado no Framework.

Esta arquitetura se mostrou mais flexível e mais adaptada às eventuais mudanças na plataforma do SDR. Assim, a incorporação de novos algoritmos na máquina de cognição permite uma introdução gradual da tecnologia de rádios cognitivos.

A definição do nível de cognição a ser implantado depende da aplicação da rede cognitiva desejada. Há diversos padrões definidos para aplicações de redes wireless, desde redes de sensores trabalhando em baixas taxas, como a IEEE802.15, até as redes metropolitanas de alta velocidade IEEE802.22, [42]. Devido a sua característica modular o modelo proposto procura atender desde de redes simples, como redes de sensores, até as redes de alta velocidade.

A **Figura 20** mostra o modelo desta proposta em camadas. Na camada inferior, temos o rádio físico propriamente dito, operando com uma forma de onda instalada pelo SDR. Na segunda camada, temos o SDR, que faz todo o sensoriamento do ambiente e programa o rádio com a forma de onda determinada pelo rádio cognitivo.

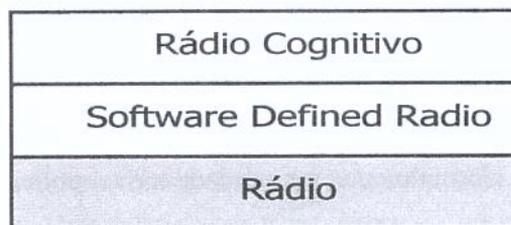


Figura 20 - Modelo em camadas do rádio cognitivo

Finalmente na terceira camada, temos o rádio cognitivo operando com algum grau de cognição. O grau de cognição determina o nível de controle exercido no SDR. Os níveis de controle podem ser graduados utilizando o padrão de camadas recomendado pela ISO e seu modelo de Interconexão de Sistema Aberto, OSI - Open System Interconnection.

### 3.5 Conclusões

As principais características do SDR são reconfigurabilidade, adaptabilidade e reuso de software. As questões do SDR referentes à evolução da arquitetura de hardware dependem fundamentalmente da evolução da tecnologia de semicondutores. Com referência a arquitetura de software, desde a proposta do JTRS, as questões estão bem definidas para os usuários do modelo SCA. Um senão, quanto à proposta do SCA, é a carga computacional, ainda muito pesada para aplicações comerciais, no entanto com a evolução da tecnologia de semicondutores isto deverá ser resolvido.

A otimização do espaço espectral do rádio, através da adoção da tecnologia de rádios cognitivos, pode contribuir significativamente para a expansão dos sistemas de comunicação wireless, tendo em vista os principais mercados: militar, segurança pública e comercial, e órgãos reguladores.

Sob a ótica dos usuários militares e do corpo policial, os rádios cognitivos surgem como um equipamento que irá permitir operações mais seguras e versáteis. Por exemplo, exército e marinha utilizam faixas de frequência para operações internas, e faixas diferentes para operações externas, necessitando de dois equipamentos para operações, através de uma função de cognição de reconhecimento de espectro, um único rádio poderá operar nas duas faixas. O corpo de policiamento utiliza rádio com faixas internas diferentes do usado pela defesa civil, para comunicarem entre si necessitam de um segundo equipamento. Com a adoção desta técnica, um único equipamento permitirá a operação nas diversas faixas. Normalmente, em unidade móvel policial atualmente temos de três a quatro rádios operando em diferentes faixas, tornando a operação vulnerável e difícil.

Sob a ótica dos órgãos reguladores, o desenvolvimento dos rádios cognitivos surge como uma alternativa para disponibilizar mais espectro de frequência, demandado atualmente pelas novas tecnologias da Teoria da Informação. Outro benefício para os órgãos reguladores é o policiamento do espectro. De longa data os órgãos reguladores são criticados pela sua ineficiência no policiamento do espectro, justificado pela limitação de recursos financeiros dos mesmos. O rádio cognitivo, dotado de uma ferramenta de sensoriamento, poderá operar também como uma ferramenta de policiamento do espectro.

Sob a ótica do usuário, Redes de Rádios Cognitivos – CNR, do inglês, Cognitive Radio Network são sistemas de rádio que, conhecendo as preferências do usuário e com capacidade de sensoriar as mudanças do ambiente, ajustam-se automaticamente para fornecer o melhor serviço disponível para o usuário. O espaço de aplicações para o rádio cognitivo é o das aplicações de um sistema de comunicação wireless global, com capacidade de comunicação de voz, dados e vídeo; em qualquer tempo e em qualquer lugar. Tais como, as redes WLAN operando no espectro não licenciado e o sistema Universal Mobile Telecommunications Systems - UMTS. Desde o início dos estudos da tecnologia UMTS, na metade dos anos 80 até hoje, ocorreu uma mudança profunda na sociedade com a introdução da tecnologia da informação, disponibilizando uma variedade de serviços e abrindo espaço para redes PANs, WLANs e MANs.

Há muitas questões em aberto para implementação de uso de rádios cognitivos e seu sucessor, as redes de rádios cognitivos, dentre os quais podemos citar:

1. Quais são os elementos cognitivos, isto é, quais os parâmetros operacionais que devem ter a capacidade de adaptação e flexibilidade?
2. Como a rede de rádios cognitivos pode ser utilizada para a detecção de usuários primários?
3. Qual é o compromisso entre a capacidade da rede de rádio cognitivo e a interferência causada nos usuários primários?
4. A qualidade do sistema será afetada pela incorporação das novas redes de rádios cognitivos?
5. Onde seu uso trará mais benefícios?

## **4 Uma Plataforma Multiagentes para Rádios Cognitivos**

Neste capítulo, iremos descrever um modelo computacional para a implementação de rádio cognitivo. O modelo proposto utiliza basicamente três tecnologias computacionais: SDR, agentes e frameworks. O modelo desenvolvido é chamado de “Uma Plataforma Multiagentes para Rádio Cognitivo”, do inglês “A MultiAgent Framework for Cognitive Radio”. A proposta deste modelo é uma arquitetura capaz de adaptar-se a evolução do nível de cognição.

A opção pela arquitetura de SDR já foi discutida no capítulo anterior. A tecnologia de agentes é usada para implementar algoritmos de inteligência artificial com o intuito de dotar o rádio com capacidade de cognição. A tecnologia de frameworks

associada com a tecnologia de projeto de software baseada em padrões, “design patterns”, é usada para construir um software reutilizável e extensível.

## 4.1 Modelo Computacional do Rádio Cognitivo

O modelo computacional formulado é original e deverá ser utilizado dentro da plataforma OSSIE, [50].

### 4.1.1 Rádio Cognitivo baseado em SDR

O diagrama de blocos da **Figura 19** mostra os principais elementos para a implementação do rádio cognitivo, utilizando a tecnologia SDR. A principal função do SDR é a instalação de uma forma de onda, em tempo real. A arquitetura do SDR está baseada na tecnologia de arquitetura de comunicação de software (SDR/SCA).

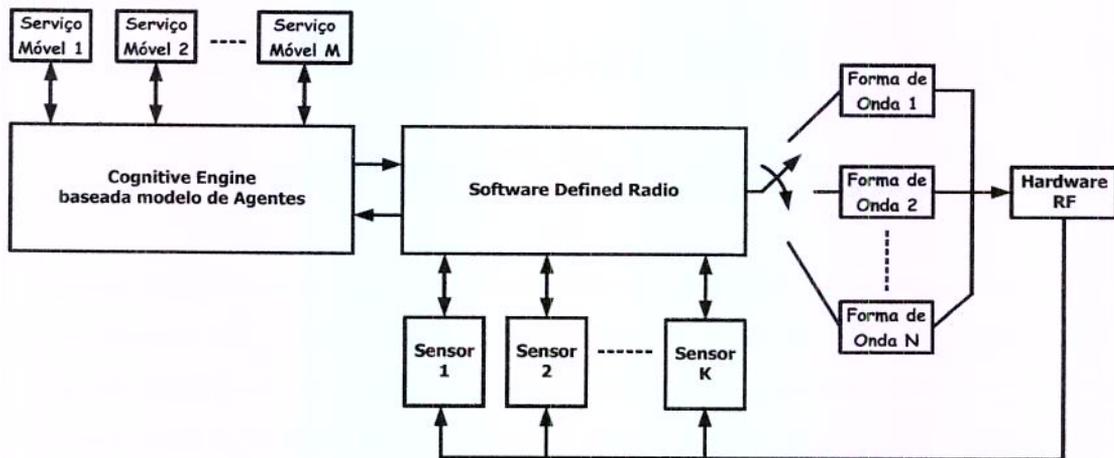


Figura 21 - Arquitetura do Rádio Cognitivo.

Neste modelo, um conjunto de  $K$  sensores de RF, associados com  $M$  diferentes tipos de serviços, seleciona uma entre  $N$  formas de ondas para atender a um dos  $M$  serviços. A tarefa fundamental do algoritmo cognitivo é desenvolver um método de otimização para seleção de uma das formas de onda.

## 4.1.2 Rádios Cognitivos utilizando Modelo de Agentes

A seguir será descrito o **modelo para desenvolvimento de programas de computadores** [15], [18], [46], [52], [56] e [57], desenvolvidos para **operar de forma cognitiva em um ambiente wireless**. Estes dispositivos são denominados **agentes autônomos de software**, tratados apenas como **agentes**.

### 4.1.2.1 Conceito de Agentes

O conceito de agentes é baseado em dois princípios ortogonais: o primeiro é a capacidade do agente para **execução autônoma**; e segundo, a habilidade de desenvolver **raciocínio orientado a um domínio** [7].

O ambiente de operação do agente é definido concomitante com a definição do domínio de operação, composto tanto de dispositivos eletrônicos quanto da interface homem/máquina. O processamento **do agente é orientado a um domínio**. Um agente conhece certos conceitos, estrutura de dados, regras e interfaces, mas não é necessariamente capaz de interpretar informação fora de seu campo.

Um agente contém um conjunto de regras, capaz de transformar condições de entrada em decisões. Ele opera autonomamente, pela virtude de ser persistente, e é capaz de operar em um ambiente em transformação.

O modelo ideal é o **agente inteligente de software**. Um agente de software pode ser definido como um processo autônomo direcionado a metas. O agente é cômico de seu ambiente, reagindo e alterando o seu ambiente. Pode cooperar com outros agentes, para executar suas tarefas, tais como, agentes de software ou humanos.

Agentes, podem ser vistos como, um sistema capaz de interagir independentemente e efetivamente com seu ambiente, através de sua percepção própria (transdutores e sensores) e atuadores, de forma a realizar alguma tarefa. Concluindo, **agentes são entidades cognitivas, ativas e autônomas**.

### 4.1.2.2 Modelos de Agentes

**Agente** é um sistema computacional, situado em um ambiente, capaz de agir autonomamente para atingir suas metas. O agente **percebe** o ambiente através de

**sensores**, reage de acordo com o nível de cognição, e **modifica** com **atuadores** [7], tal como mostrado na **Figura 22**. Sob o ponto de vista da ciência da computação, um sistema computacional é composto de entradas, processamento e saídas. Sob o ponto de vista de inteligência artificial, um agente autônomo é composto de sensores, cognição e atuadores.

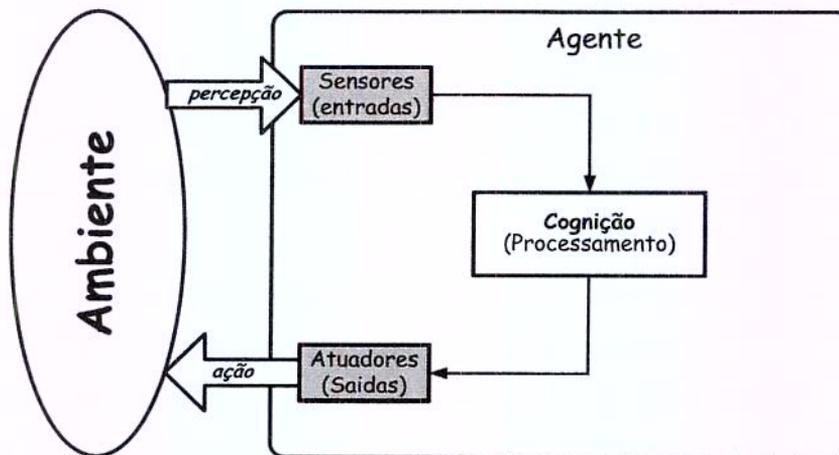


Figura 22 - Agente interagindo no ambiente.

Os agentes muitas vezes são denominados de agentes de software, que por definição, são programas de computadores. O desenvolvimento de programas convencionais utiliza métodos procedurais, enquanto programas para o modelo de agentes utilizam métodos de inferência.

A estrutura do programa agente é similar a um software orientado a objeto, na prática, agentes podem ser implementados em linguagens tais como, C++, Java, etc. A diferença de programa agente, em relação a outros programas fortemente encapsulados, é o seu comportamento determinado por três fatores: interfaces; ambiente operacional e regras de encapsulamento; e procedimentos e tratamento de eventos. Deve-se definir claramente: o domínio de operação do agente, suas atribuições, e como ele se relaciona com outros agentes.

A arquitetura de agente define um mapa com detalhes internos próprios do modelo de agente utilizado, suas estruturas de dados, as operações que ele pode realizar sobre as estruturas, e o fluxo de controle entre as estruturas de dados.

### 4.1.3 Framework para o Rádio Cognitivo

A definição da arquitetura de software, para o rádio cognitivo, tem como o objetivo desenvolver um software reutilizável e extensível, [5], [19] e [48]. A **Figura 23**, mostra um modelo para desenvolvimento de software reutilizável e extensível. A base do modelo utiliza linguagem orientada a objeto, utilizando classes, que por sua vez utilizam “design patterns” para implementar funcionalidades, designs patterns combinados formam um framework, frameworks são controlados pelos componentes. Os componentes são definidos na aplicação. O objetivo da utilização deste modelo é acompanhar a evolução do rádio cognitivo. A evolução está condicionada na evolução da arquitetura do SDR, em direção ao modelo de arquitetura de hardware ideal, e a flexibilização do uso do espectro de frequência, em direção a adoção do novo modelo de alocação de espectro.

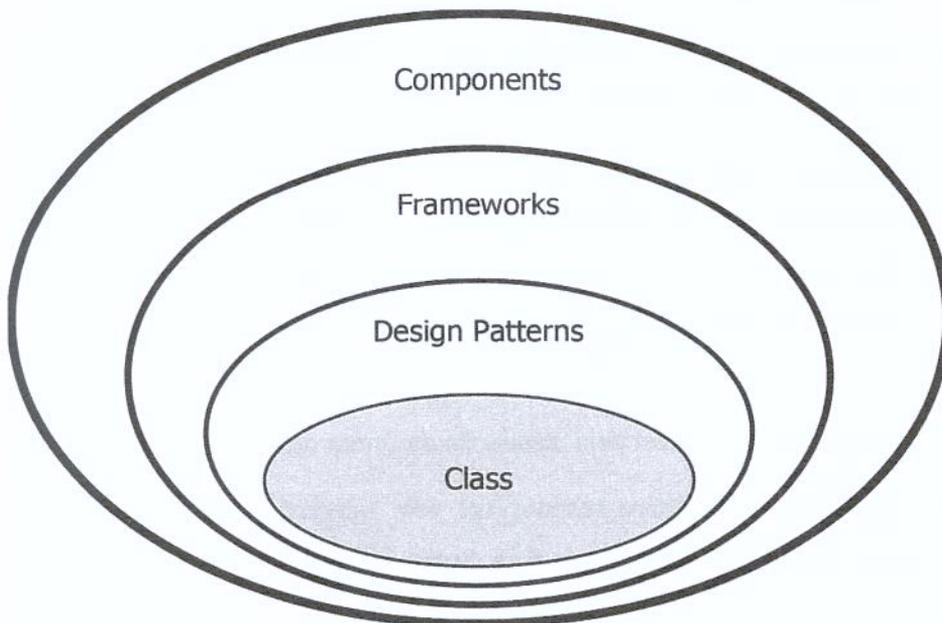


Figura 23 - Modelo de desenvolvimento de software.

A especificação do framework leva em consideração basicamente o ambiente de aplicação, no caso, a proposta é um framework para operar como um rádio cognitivo utilizando o modelo de agentes. A especificação é um detalhamento, por escrito, do modelo funcional de operação do framework, no caso o modelo funcional de operação do rádio cognitivo.

#### 4.1.3.1 Meta Pretendida

**Demanda por novos serviços**, que requerem maiores taxas de dados e a **escassez do espectro** de frequência, devido ao modelo de alocação do espectro, impulsionam a criação dos **sistemas de comunicação wireless autônomos**.

Para atender os requisitos acima mencionados, atualmente, há diversas propostas para operação dos sistemas autônomos de comunicação wireless em bandas ociosas, onde reconhecidamente há disponibilidade para operação oportunista. As bandas pretendidas são: as bandas sem licença; bandas de guarda em faixas licenciadas, como o espectro de TV; e bandas de celulares ociosas.

#### 4.1.3.2 Definições básicas

Os três dispositivos básicos relacionados ao escopo de comunicação sem fios de interesse são rádio, SDR e rádio cognitivo.

**Rádio**, qualquer dispositivo que recebe e transmite sinais de rádio frequência, desde telefones celulares até computadores equipados com WiFi. O rádio é o responsável pela operação efetiva do sistema de comunicação, e está relacionado com a operação em tempo real do sistema wireless. O rádio possui um hardware reprogramável utilizando o SDR.

**SDR**, dispositivo responsável pela instalação da forma de onda no rádio.

**Rádio Cognitivo**, dispositivo responsável pela interação com o ambiente, na procura do espaço de solução ótimo. Isto é, a forma de onda que mais se adapta ao ambiente.

#### 4.1.3.3 Definição do Rádio Cognitivo

O rádio cognitivo será desenvolvido em função do ambiente de operação de comunicações wireless, no caso, para ser utilizado na última milha do sistema de telecomunicações. Ele tem um conhecimento completo do ambiente, e através de técnicas

de sensoriamento do ambiente é capaz de interagir com ele, alterando seu estado. O rádio cognitivo opera em ciclos, denominado de ciclos cognitivos.

#### 4.1.3.4 Arquitetura do Rádio Cognitivo baseado em SDR

O mais alto nível de cognição do rádio cognitivo considera a implementação do SDR ideal, como mostrado na **Figura 24**. Nele poderá ser instalada uma forma de onda qualquer, independente da banda de operação.

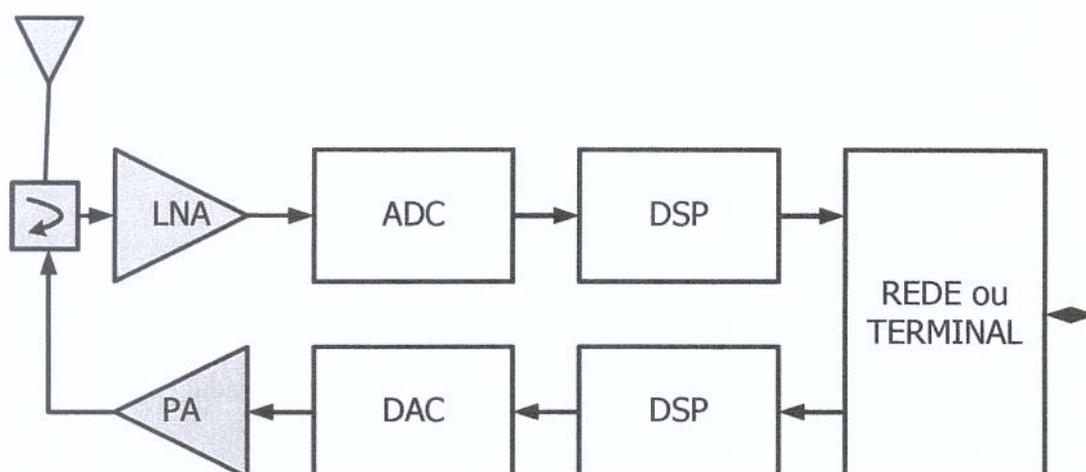


Figura 24 - SDR Ideal.

O SDR ideal é composto dos seguintes blocos. A interface do sinal de RF com o espaço livre é realizada no front-end constituído dos seguintes componentes: antena; duplexador; amplificador de potência – PA; e amplificador de baixo ruído – LNA. Após o front-end, no SDR ideal, o sinal é tratado digitalmente passando pelos conversores: conversor analógico para digital – ADC; e conversor digital para analógico – DAC. Todo o processamento do rádio é digital, realizado através de dispositivos de processamento digital de sinais – DSP. O tratamento do sinal banda base é realizado no bloco de rede ou terminal.

#### 4.1.3.5 Modelo em Camadas

A Figura 25 mostra o modelo em camadas do **Cognitive Radio**.

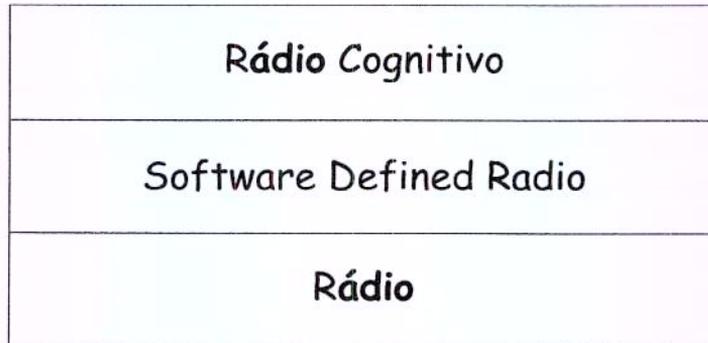


Figura 25 - Modelo do CR em Camadas.

#### 4.1.3.6 Seqüência de Operação do Rádio Cognitivo.

1. **Power-up.** Descreve a condição de inicialização do rádio cognitivo. O rádio cognitivo opera no **Estado Consciente**. Durante o power-up o rádio cognitivo deverá determinar a condição do ambiente para programar o rádio:
  - a. Programa a forma de onda básica de instalação do **SDR**;
  - b. Analisa a **Classificação de Canais**. Identifica os buracos de espectro disponíveis. **Negocia com outros “agentes”** através de um canal de serviço caso não haja buraco disponível.
2. **Escolha da Forma de Onda/ Serviço.** Pode ser automática ou manual:
  - a. Automática: Escolhe a forma de onda para obter o serviço com taxa máxima;
  - b. Manual: Interage com o usuário para determinar dentre os serviços disponíveis o de sua preferência, a partir do serviço de sua preferência instala a forma de onda correspondente.
3. Reprogramar a forma de onda utilizando SDR.

4. Passa do **Estado Consciente** para **Estado Dormente**. Os agentes cognitivos, dotados da capacidade de sensoriar o ambiente, optam pela instalação de uma nova forma onda.
5. Monitoramento da operação do Rádio:
  - a. Sentido de **Autopreservação** detecta uma ameaça à operação do rádio;
  - b. **Sistema de Classificação da Operação** identifica ações a serem tomadas e tenta resolver ainda no estado de dormência;
  - c. Ações no estado de dormência não foram suficientes para solucionar a ameaça à operação do rádio:
    - i. O rádio cognitivo passa do **Estado de Dormência** para o **Estado Consciente**;
    - ii. Refaz a **Classificação do Canal**;
    - iii. **Escolhe a Forma de Onda/Serviço** possível;
    - iv. Retorna ao estado 3, para reprogramar a forma de onda.

#### 4.1.3.7 Definição das Metas Individuais.

- a. **Estado de Dormência.** Monitora continuamente o ambiente através dos sensores definidos no SDR. Os parâmetros monitorados alimentam o sentido de **autopreservação** para manter o rádio em operação contínua.
- b. **Estado Consciente.** Executa um ciclo completo de cognição. Somente neste estado é permitido ao Rádio Cognitivo reprogramar o SDR que por sua vez instala uma nova forma de onda.
- c. **Autopreservação.** Dispara um gatilho quando ocorre uma ameaça à continuidade de operação do rádio. O sentido de autopreservação opera no estado de dormência e é inerente ao ambiente cognitivo. Por exemplo, o sensor RSSI nos celulares tradicionais é um exemplo clássico de sentido de autopreservação na área de sistemas wireless. Quando o sensor RSSI detecta que o nível do sinal recebido está abaixo do limiar, ele imediatamente inicia

- um processo de negociação com as estações de rádio base para realocar o canal de operação e manter o rádio operando.
- d. **SDR.** Instala a forma de onda no rádio físico, e monitora o ambiente através de sensores. A reprogramação do SDR é realizada dentro do estado de **Consciência**.
  - e. **Classificação de Canais.** Estima o estado do canal. A estimativa do estado do canal auxilia o processo de seleção da forma de onda ótima para ser instalada pelo SDR.
  - f. **Escolha da Forma de Onda/ Serviço.** Seleciona a forma de onda ótima para ser instalada pelo SDR. A seleção da forma de onda é baseada em um dos muitos algoritmos de inteligência artificial para identificar a forma de onda mais adequada. Por exemplo, utilizar um algoritmo genético para obter o espaço ótimo de soluções baseado naquele estado de canal.
  - g. **Negociar na Rede.** Negocia com outros agentes que compõem a rede desde o acesso a um quadro dentro de um sistema TDM, até tipos de protocolos em cada uma das camadas. Uma das linguagens propostas para a comunicação entre agentes é a XML. Por exemplo, negociar o protocolo da camada de transporte mais adequado do tipo, TCP/IP ou protocolo proprietário.

## 4.2 Modelo de Agentes aplicados ao Rádio Cognitivo.

O nó cognitivo da rede de rádios cognitivos, no escopo da inteligência artificial, será modelado como um agente, [18] e [46]. No modelo de agentes, quanto maior o grau de interação e a capacidade de adaptação do agente com o ambiente, tanto maior seu nível de cognição. Da mesma forma, quanto maior o grau de interação e a capacidade de adaptação do rádio cognitivo com o ambiente, maior será seu nível de cognição.

No escopo do ambiente rádio, o grau de interação e a capacidade de adaptação, são nivelados pela complexidade e capacidade de adaptação do protocolo. Da mesma

forma, o nível de cognição do rádio cognitivo será medido pelo grau de interação e a capacidade de adaptação do protocolo. Quanto mais adaptativo e mais flexível o protocolo maior o nível de cognição.

Após Mittola [31], apresentamos a proposta de uma nova tabela para classificar as tarefas de acordo como o nível de cognição. Como mostrado na **Tabela 4**, reduzimos os níveis de cognição de nove níveis para sete níveis, incluindo o nível zero, por dois motivos: primeiro, julgamos que havia muitas tarefas comuns em alguns níveis; e segundo, o número de níveis propostos é o mesmo do modelo de cognição baseado em agentes, utilizados para propor uma nova arquitetura de rádios cognitivos.

Nível	Aptidão	Tarefas Cognitivas
6	Coopera. Adapta protocolos.	Propor e negociar novos protocolos autonomamente.
5	Conhece. Adapta plano.	Modificar planos de acordo com as mudanças do ambiente autonomamente.
4	Adapta. Negocia com a rede.	Negociar com a outra ponta da rede, planos e alternativas. Determinar em conjunto uma nova estrutura do ambiente.
3	Raciocina. Criar ambiente.	Adaptar a arquitetura interna ao ambiente. Buscar acesso às redes.
2	Consciente. Interage com o ambiente.	Aprender com o ambiente (espaço espectral do rádio – espaço, frequência e tempo). Adaptar forma de onda as mudanças do ambiente.
1	Lógico.	Selecionar faixa de RF, interface aérea e protocolo de acordo com uma lógica.
0	Pré-programado.	Nenhuma.

Tabela 4 - Características das Tarefas do Rádio Cognitivo

A seguir, faremos um estudo de casos de aplicação da arquitetura de rádios cognitivos, baseados em agentes e frameworks, propostos de acordo com o nível de cognição descritos na **Tabela 4**. A implementação do rádio cognitivo é semelhante a um programa de computador qualquer, portanto deveremos fazer uma relação benefício/custo entre flexibilidade, desempenho e potência.

Com respeito à implementação do rádio cognitivo, utilizando a tecnologia de SDR, ainda há um entrave na implementação do hardware. A tecnologia de hardware de SDR, apesar de estar em estágio avançado de desenvolvimento não contempla o SDR ideal. Ao diagrama de blocos da **Figura 24**, são acrescentados os blocos conversor para baixo digital, do inglês, Digital Down Converter – DDC e conversor para cima digital, do inglês, Digital Up Converter - DUC. A **Figura 26**, mostra a implementação de um SDR real, com alguns estágios de frequência intermediária ainda na forma analógica. No diagrama de blocos temos um SDR operando com FI digital na faixa de 140 MHz, limitando a banda passante de operação do rádio.

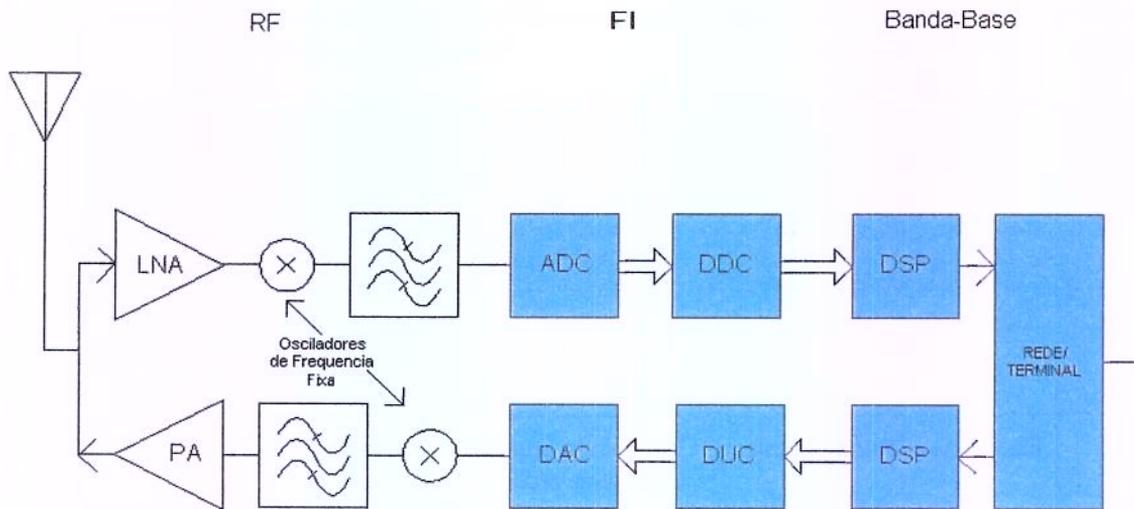


Figura 26 - SDR Real

De forma a definir o que é cognitivo ou não, o FCC [37], apresentou um sumário das metas básicas esperadas com a adoção da tecnologia de rádio cognitivo, sob o aspecto de otimizar o uso do espectro de frequência.

Na **Tabela 5** são descritas as principais funções realizadas por um rádio cognitivo. Estas funções são utilizadas para atribuir funções aos agentes. Esta tabela, em conjunto como o modelo de agentes desenvolvidos em [46], será utilizada para desenvolver o modelo de agentes para rádios cognitivos.

<b>Tecnologia de Rádios Cognitivos</b>	
<b>Otimizar o Espectro de Frequência</b>	A capacidade do rádio em alterar sua frequência de operação otimiza o uso, sob certas circunstâncias.
<b>Seleção Dinâmica de Frequência</b>	Habilidade de sensoriar sinais de transmissores próximos no esforço de escolher o ambiente de operação ótimo.
<b>Adaptar a Modulação</b>	Habilidade de modificar as características da forma de onda para explorar oportunidades de uso do espectro.
<b>Controle da Potência do Transmissor</b>	Permitir a transmissão com potência máxima quando necessário e restringir a potência do transmissor para níveis mais baixos para permitir o compartilhamento do espectro.
<b>Conhecer a Posição Geográfica</b>	Habilidade do dispositivo para determinar sua localização e de outros transmissores, assim como determinar se o mesmo tem a permissão para transmitir nesta área selecionando os parâmetros operacionais apropriados tais como potência, frequência, etc.
<b>Negociar Uso de Espectro</b>	O rádio cognitivo poderá incorporar um mecanismo que poderá permitir o compartilhamento de espectro sob os termos de um pré-acordo com o usuário licenciado. Rádios cognitivos poderão eventualmente habilitar parceiros para negociar o uso do espectro em redes ad-hoc ou em tempo real sem a necessidade de um pré-acordo entre as partes.

Tabela 5 - Tecnologia de Rádios Cognitivos

O **Rádio Cognitivo com Nível 0**, não apresenta nenhum nível de raciocínio. Possui características previamente programadas e não interage com o ambiente durante sua operação. O rádio cognitivo com nível 0 representa um sistema de rádio pré-programado, tal como, as estruturas de rádios convencionais existentes atualmente: rádio digital, software radio ou mesmo SDR. O rádio cognitivo nível 0 não tem um modelo baseado em raciocínio. Seja ele um rádio digital, ou um SDR, neste nível, a instalação da forma de onda poderá ser feita durante o processo de produção ou mesmo em campo,

respectivamente, mas nenhuma forma de onda pode ser reinstalada por um processo autônomo.

#### 4.2.1 Rádio Cognitivo Nível 1

O rádio cognitivo nível 1 corresponde ao nível de cognição 1, estabelecido na Tabela 4. O rádio cognitivo nível 1 é baseado no agente tabela. A lógica seleciona uma das formas de onda, pré-armazenadas em tabela, conforme mostrado na Figura 27. Tem a grande desvantagem de que, para um número muito grande de formas de onda o sistema torna-se ineficiente, por dois motivos: primeiro, requer uma grande capacidade de memória; e segundo algoritmos de busca em tabela podem tornar o tempo de reinstalação da forma de onda muito longo. Esta arquitetura não possui autonomia, nem flexibilidade, sendo aplicada em ambientes com as seguintes características: observável, determinístico, episódico, estático, discreto e compacto.

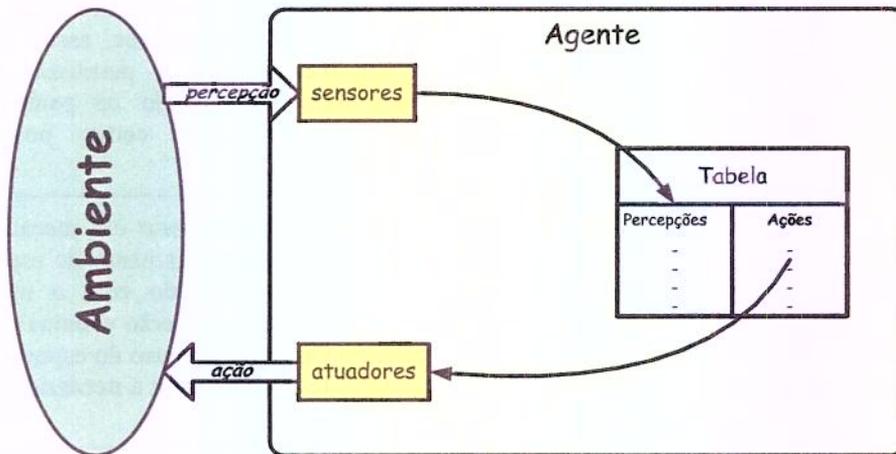


Figura 27 – Rádio Cognitivo Nível 1 – Agente Tabela

#### 4.2.2 Rádio Cognitivo Nível 2

O rádio cognitivo nível 2 corresponde ao nível de cognição 2, estabelecido na Tabela 4. O rádio cognitivo nível 2 possui ciência do ambiente de operação. O conjunto de sensores do ambiente de rádio frequência monitora continuamente as condições do ambiente e através do executor instala a forma de onda ótima para as condições medidas. A implementação deste nível é baseada no agente reativo, como mostrado na Figura 28.

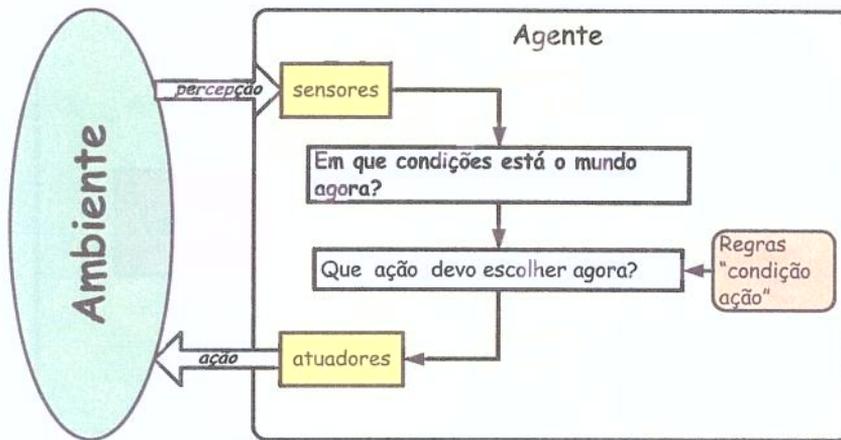


Figura 28 - Rádio Cognitivo Nível 2 – Agente Reativo.

Estas arquiteturas simplesmente reagem ao ambiente, sem executar nenhum processo de raciocínio, tem como vantagem: simplicidade, economia, tratabilidade computacional e robustez contra falhas. No entanto, existem umas séries de desvantagens intrinsecamente relacionadas à arquitetura puramente reativa, tais como:

- Como ela não mantém um modelo interno do mundo, ela deve conter uma quantidade grande de informações para determinar uma ação aceitável;
- Sem informações do modelo do mundo, a composição de seu processo decisório fica com pouca consistência.

Esta arquitetura representa uma evolução em relação ao processo decisório, comparado com o agente baseado em tabelas. Esta arquitetura apresenta um processo único de percepção/ação (reflexo). A ação é uma função direta das entradas dos sensores. Esta função pode ser um conjunto de regras condição/ação (*fuzzy* ou binária), uma rede neural ou uma função matemática, tal como mostrado na **Figura 29**.

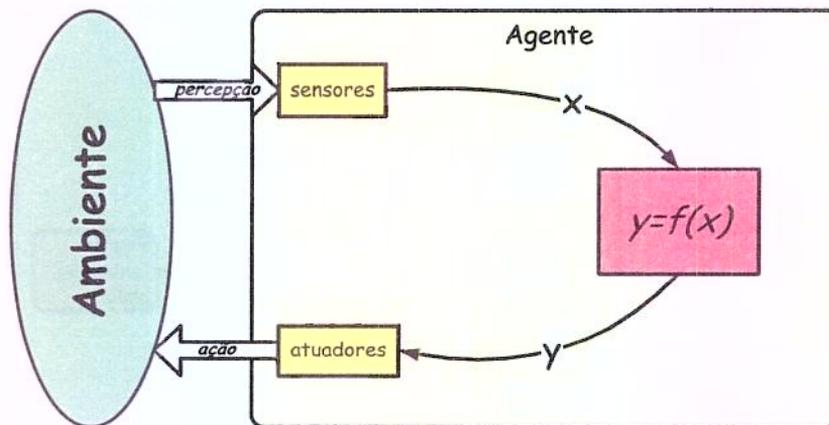


Figura 29 - Rádio Cognitivo Nível 2 – Agente Matemático

Esta arquitetura não pode armazenar uma seqüência perceptiva e possui pouca autonomia para alterar o processo decisório. São aplicados em ambientes dinâmicos, onde é imprescindível o modelo “condição/ação”. Aplicada em ambientes observáveis, episódicos e pequenos. A **Tabela 6** apresenta as vantagens e desvantagens da arquitetura reativa.

Arquitetura Reativa	
Vantagens	Desvantagens
Comportamentos reativos são normalmente simples de projetar.	Implementação de um grande conjunto de comportamentos é uma tarefa difícil.
Paralelismo, simplicidade de comportamentos individuais e ligação direta “sentir-actuar” permitem operação em tempo real.	Comportamentos reativos não garantem sucesso na execução da tarefa. Ex: pontos de campo nulo.
Processamento local da informação sensorial.	Difícil definição de um conjunto mínimo de comportamentos reativos no caso geral.
Prototipagem rápida para poucos comportamentos.	

Tabela 6 - Vantagens e Desvantagens do Agente Reativo.

O processo decisório pode ser baseado em um sistema especialista, tal como uma rede neural do tipo backpropagation, previamente treinada com as características do canal. O sistema de disparo do ciclo cognitivo pode ser a medida de erro da taxa de bits. E o atuador seleciona uma das formas de onda previamente programada.

O processo de escolha pode ser um sistema especialista baseado em uma rede neural do tipo Hopfield, que aprende continuamente com as variações das características do canal. A entrada do sistema especialista é um conjunto de sensores do ambiente RF. O sistema de disparo do ciclo cognitivo pode ser a medida de taxas de erros ou mesmo a detecção de um desvanecimento profundo no canal. E o atuador seleciona uma das formas de onda previamente programada: GSM, IS-95, IS-136, GPRS, 3G(WCDMA), alteração modulação do WiFi, etc.

### 4.2.3 Rádio Cognitivo Nível 3

O rádio cognitivo nível 3 corresponde ao nível de cognição 3, estabelecido na Tabela 4. As principais características desta arquitetura são: raciocinar, criar e aprender com o ambiente. Esta arquitetura é capaz de adaptar uma forma de onda as mudanças do ambiente. A implementação deste nível é baseada no agente modelo, como mostrado na Figura 30.

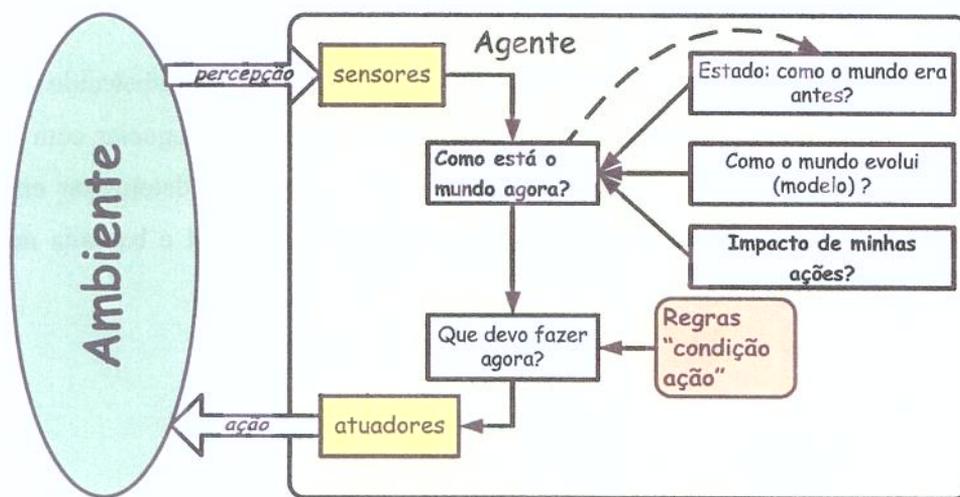


Figura 30 - Rádio Cognitivo Nível 3 – Agente Modelo.

Um agente puramente reativo, com uma observação parcial do ambiente, pode cair em deadlocks ou loop infinitos. Por exemplo, o processo de cognição seleciona uma banda de operação indisponível e trava o sistema. A forma mais efetiva de lidar com observabilidade parcial é lembrar e imaginar a parte do mundo não observável; mantendo um estado interno dependente da história passada que reflita, ao menos em parte, os aspectos não observáveis do estado atual.

O **nível 3** de cognição representa um sistema de rádio baseado em um modelo de raciocínio de inferência. O rádio cognitivo tem a capacidade de aprender com o ambiente, reprogramar sua lógica de processo de decisão é escolher uma das formas de onda que melhor se adaptam ao meio ambiente, criando um novo agente. O novo agente determina o estado do mundo num momento determinado através de:

- Informações perceptuais atuais, tal como o agente reativo;
- Seu estado interno;
- Informação a respeito de como o mundo evolui independente de suas ações, modelo do mundo;
- Informações a respeito do impacto/efeito de suas próprias ações no mundo, e, como isto, atualiza seu estado interno.

#### **4.2.4 Rádio Cognitivo Nível 4**

O rádio cognitivo nível 4 corresponde ao nível de cognição 4, estabelecido na **Tabela 4**. As principais características desta arquitetura são: adaptar e negociar com a rede. Negociar com a outra ponta da rede, planos e alternativas, para determinar em conjunto uma nova estrutura do ambiente. A implementação deste nível é baseada no agente objetivo, como mostrado na Figura 31.

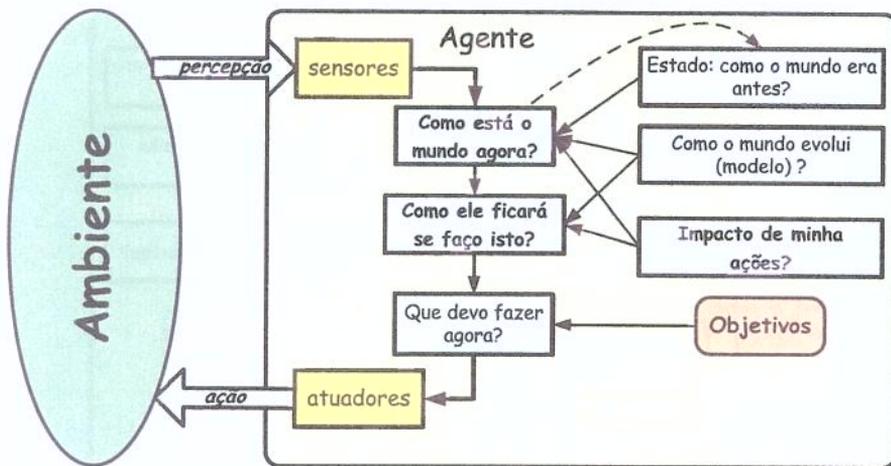


Figura 31 - Rádio Cognitivo Nível 4 – Agente Objetivo.

Além do estado interno, este modelo de agente precisa de algumas informações a respeito de metas, indicando situações desejáveis. Assim, podem combinar as informações de impacto de suas ações com seus objetivos, de modo a fazer considerações acerca do futuro (predições) e decidir melhor suas ações. O agente considera longas seqüências de ações encadeadas para poder atingir suas metas: busca e planeja. Estas são subáreas de inteligência artificial que visam determinar a seqüência de ações que levam o agente ao objetivo.

O nível 4 representa um sistema de rádio, onde o rádio cognitivo é capaz de procurar dentre as diversas faixas de operação e determinar onde há possibilidade de estabelecer uma comunicação. Ele pode determinar onde tem buracos no espectro para operar como um usuário sem licença ou mesmo em espectro licenciado.

#### 4.2.5 Rádio Cognitivo Nível 5

O rádio cognitivo nível 5 corresponde ao nível de cognição 5, estabelecido na Tabela 4. As principais características desta arquitetura são: conhecer e adaptar planos, isto é, ela modifica planos de acordo com as mudanças do ambiente autonomamente. A implementação deste nível é baseada no modelo de agente utilidade, como mostrado na Figura 32.

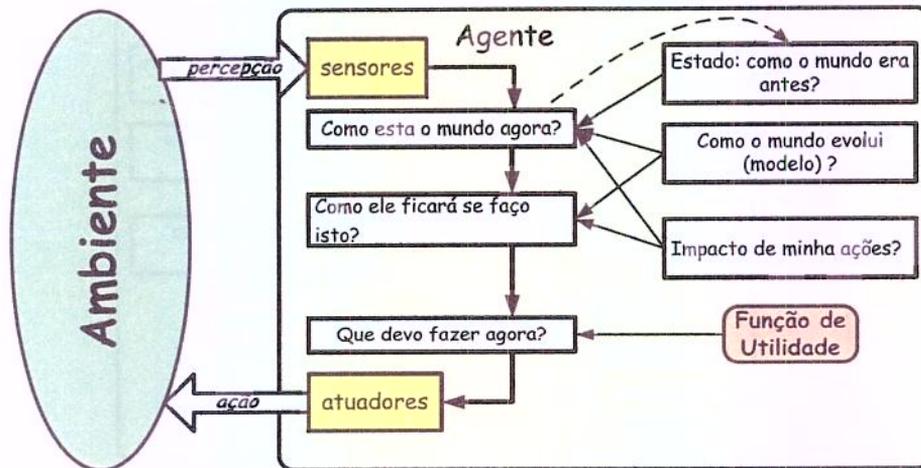


Figura 32 - Rádio Cognitivo Nível 5 – Agente Utilidade.

O modelo de agente utilidade estabelece uma métrica para avaliar o desempenho geral. Este modelo permite decisões racionais na ocorrência de:

- a. Objetivos conflitantes: neste caso a função de utilidade define um compromisso adequado entre eles;
- b. Múltiplos objetivos: nenhum dos quais se tem certeza de ser atingido. A função de utilidade permite um balanceamento entre a possibilidade de sucesso com a importância de cada objetivo.

O nível 5 representa um sistema de rádio onde o rádio cognitivo é capaz de negociar dentro da rede, como, por exemplo, participar de um leilão de frequências. Pode também, baseado em teoria de jogos, encontrarem o nível de potência que permitirá sua inclusão dentro da rede.

#### 4.2.6 Rádio Cognitivo Nível 6

O rádio cognitivo com nível 6 corresponde ao nível de cognição 6, do rádio cognitivo estabelecido na Tabela 4. As principais características desta arquitetura são: cooperar e adaptar protocolos. Este modelo cria e negocia novos protocolos autonomamente. A implementação deste nível é baseada no modelo de agente inteligente como mostrado na Figura 33.

Finalmente, temos o modelo que mais se aproxima da cognição humana. Este agente pode ser aplicado em qualquer ambiente, pois tem características de aprendizado. A arquitetura é mostrada na **Figura 33**.

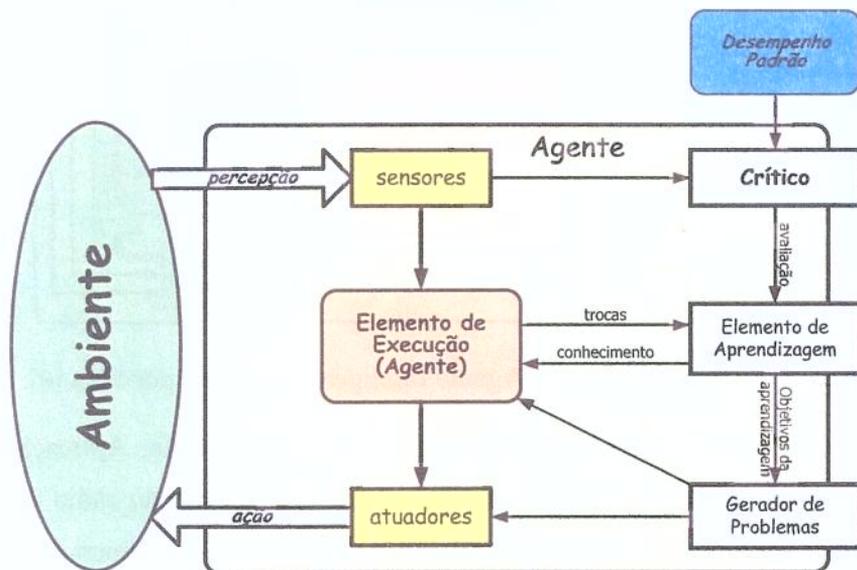


Figura 33 - Rádio Cognitivo Nível 6 – Agente Inteligente.

Este modelo, proposto por Russel & Norvig, apresenta grande flexibilidade, pois o mesmo engloba as arquiteturas de agentes para rádios cognitivos de 0 até 5, descritos anteriormente, [46]. As variações dos mais diversos tipos de características são determinadas pelos elementos de conhecimento, permitindo a inclusão de uma rede neural, uma árvore de decisão ou qualquer outro algoritmo baseado em conhecimento.

Stan Franklin, [18], propôs um modelo muito similar ao proposto por Russel & Norvig, tal com mostrado na **Figura 34**. Em relação ao modelo anterior este modelo explicita os dispositivos de memorização.

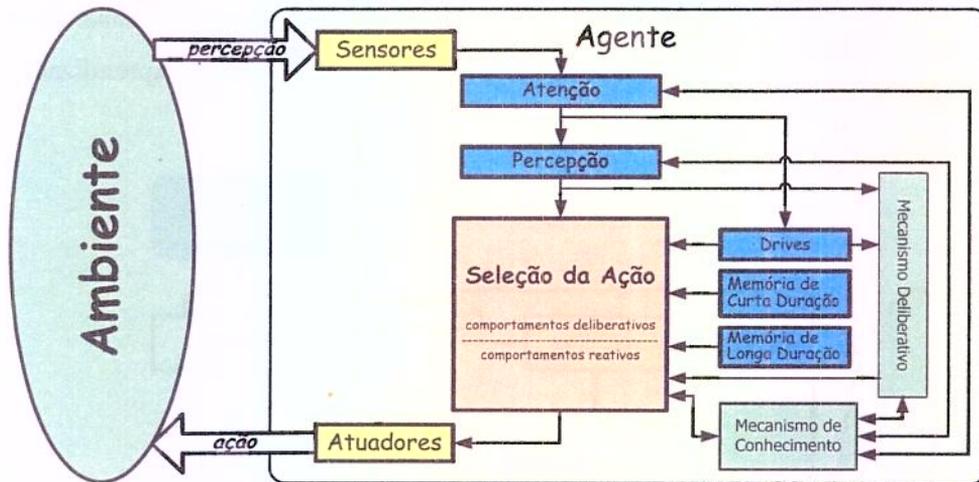


Figura 34 - Rádio Cognitivo Nível 6 – Agente Inteligente proposto por Stan [6].

O nível 6 representa a introdução da máquina de conhecimento. Aplicação do conhecimento em rádio cognitivo inclui automaticamente, a estrutura do rádio e suas mudanças. O rádio cognitivo aprende com o ambiente, e terá capacidade de memória para manter um histórico de operação, relacionada com a última posição geográfica onde ele se encontrava. As funções como “Padrões de Uso e Questões Legais”, “Negociação com Outros Agentes” e “Interface com Usuário”, quando implementadas sugerem uma rede com altíssimo nível de cognição.

#### 4.2.7 Redes de Comunicação baseada em Rádios Cognitivos

A implementação de rádios cognitivos, baseados em agentes, permitirá definir uma arquitetura de redes de computadores com multiagentes, [42]. Para definir um sistema com arquitetura multiagente, devemos primeiramente definir qual o domínio do sistema multiagentes. Nós estamos particularmente interessados em agentes capazes de operar dentro do domínio de um sistema wireless utilizado nos mais diversos padrões existentes IEEE 802.11a/b/g/n, IEEE 802.22, GSM, etc.

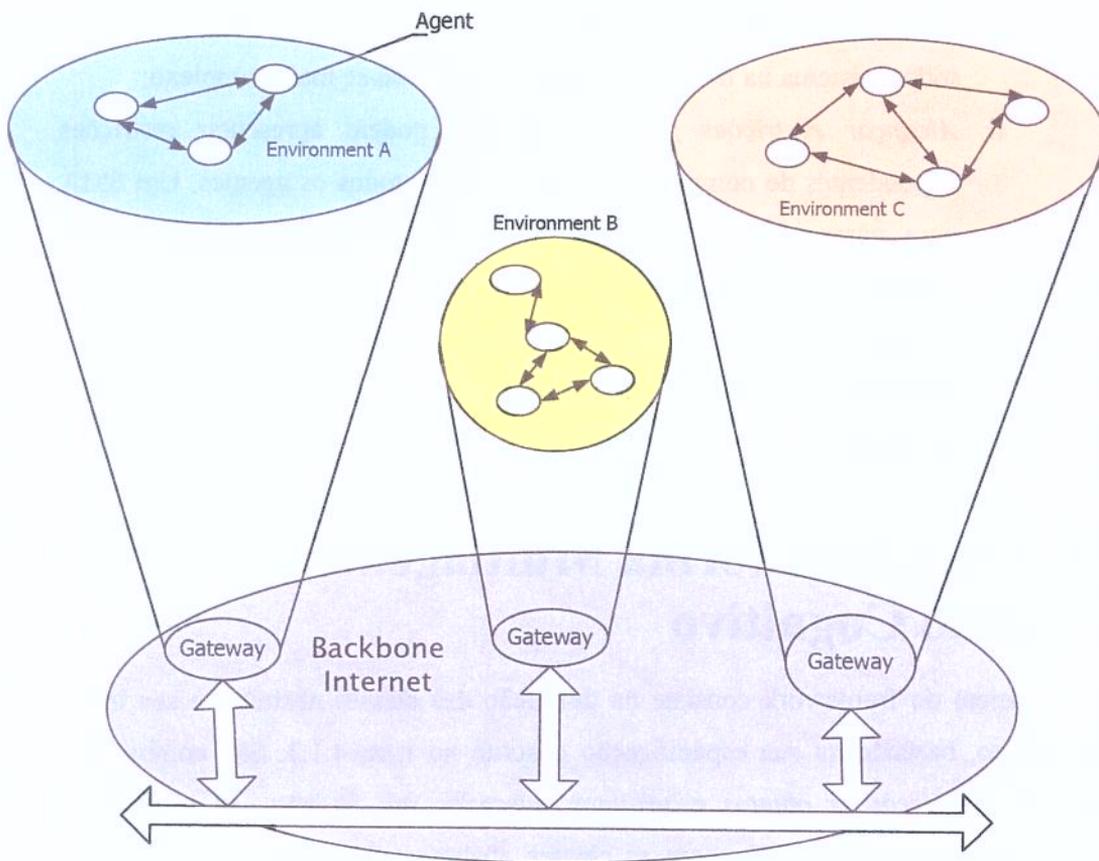


Figura 35 - Redes de Rádios Cognitivos

O rádio cognitivo tem como objetivo a resolução dos seguintes problemas de uma rede de computadores wireless: alocação do espectro de frequência; controle de potência de transmissão; escolha da forma de onda; escolha do protocolo de comunicações; ou mesmo negociação do protocolo de comunicações.

#### 4.2.8 Comunicação Entre Agentes

Agentes se comunicam para alcançar melhores resultados para si próprios, ou para a sociedade na qual eles existem. A comunicação permite aos agentes coordenarem suas ações e comportamentos, resultando em sistemas mais coerentes. Existem vários motivos pelos quais a coordenação é essencial em sistemas multiagentes, dentre eles podemos citar:

- i. *Visão Global do Sistema.* Nenhum agente possui uma visão global de todo o sistema na medida em que o SMA torna-se mais complexo;
- ii. *Alcançar restrições globais.* Sistemas podem apresentar restrições dependentes do comportamento coletivo de todos os agentes. Um SMA para gerenciamento de redes, por exemplo, deve ser capaz de se recuperar após uma falha;
- iii. *Agentes possuem habilidades distintas.* Agentes com habilidades e capacidades diferentes devem trabalhar em conjunto para resolver problemas.

## 4.3 Uma Plataforma Multiagente para Rádio Cognitivo

O projeto do framework consiste na definição das classes abstratas e seu inter-relacionamento, baseado na sua especificação descrita no item 4.1.3. São combinadas técnicas de *orientação a objetos e projetos baseados em padrões*. O projeto do framework é um diagrama UML, com as classes abstratas. São definidas também as funções das classes abstratas.

### 4.3.1 Framework para Rádio Cognitivo

O centro do framework é a *classe abstrata agent*, que é o responsável pelo controle de todas as tarefas do rádio cognitivo. De modo a alcançar seus objetivos, os agentes precisam executar ações. Essas ações são adicionadas a um agente por meio de informações recebidas do SDR, como, por exemplo: comparar se o BER recebido está abaixo do limite mínimo, caso contrario, o agente utiliza o Modelo de Markov escondido para selecionar a melhor forma de onda, baseado no protocolo em uso; outra opção poderia ser o controle da potência de uma determinada forma de onda.

A entrada e saída na plataforma são realizadas através das classes abstratas: *sensor* e *effector*. A classe abstrata, “sensor”, interfaceia com o componente gerado no SDR responsável pelo sensoriamento do ambiente. A classe abstrata, “effector”, faz a



#### **4.3.1.2 Classe *EvaluateEnvironment***

Esta classe é responsável pela avaliação contínua do ambiente, através da avaliação das medidas de temperatura interferente, taxa de erros de bits, razão sinal interferente.

#### **4.3.1.3 Classe *LearningSystem***

Esta classe é responsável pela implementação do sistema de todos os níveis de cognição do Rádio. Os primeiros grupos de funções desta classe são os algoritmos de redes neurais, algoritmos genéticos, algoritmos para representação do conhecimento, armazenamento de informações e medida de desempenho.

#### **4.3.1.4 Classe *EffectorWaveform***

Esta classe é responsável pelo controle do SDR. Basicamente ela instala formas de onda, desinstala forma de ondas e mantém um cadastro das formas de onda disponíveis para o SDR implementado.

#### **4.3.1.5 Classe *EffectorNegociator***

Esta classe é responsável pela implementação do mecanismo de negociação com outros agentes da rede. Os algoritmos de negociação são classificados de acordo com nível de negociação desejada, no nível mais baixo os algoritmos de jogos de Markov até os de mais altos como os jogos estocásticos.

#### **4.3.1.6 Classe *NetworkConnector***

Implementa os serviços de conexão entre agentes para negociação, desde questões da camada física até a camada de aplicação do rádio cognitivo.

#### **4.3.1.7 Classe *LegacySystem***

Trata das funções legais do uso do espectro de frequência, tais como, usuário legal, segundo usuário, direito de uso.

#### 4.3.1.8 Classe *GUIInterface*

Esta classe é uma abstração de uma camada de interface gráfica entre o rádio cognitivo e o usuário, para seleção do serviço disponível ao invés do serviço desejado. Também faz a interface com o usuário para o serviço de bilhetagem.

#### 4.3.1.9 Classe *LyfeCycle*

Esta classe trata das questões do ciclo de nascimento e morte do rádio cognitivo, dentro da sua rede de rádio cognitivo.

## 4.4 Conclusões

O modelo computacional proposto para a implementação do rádio cognitivo, utilizando agentes e frameworks, é inovador. A vantagem deste modelo, em relação aos demais [6] e [44] é sua capacidade evolucionária, e sua desvantagem é alta carga computacional. Apresentamos o modelo de referência para implementação do rádio cognitivo. Ele pode ser utilizado, para implementação desde o rádio cognitivo de nível 0 até o rádio cognitivo de nível 6. Obviamente existem limitações, como arquitetura de hardware do SDR, mudanças na política de alocação de espectro, etc. Como na construção de qualquer outro framework, o seu desenvolvimento e refinamento são tarefas de anos.

A **Figura 37** apresenta um road-map parcial, baseado no modelo de agentes e framework, para o desenvolvimento do rádio cognitivo. Este road-map proposto está baseado na nossa pesquisa e no modelo de implementação proposto neste trabalho.

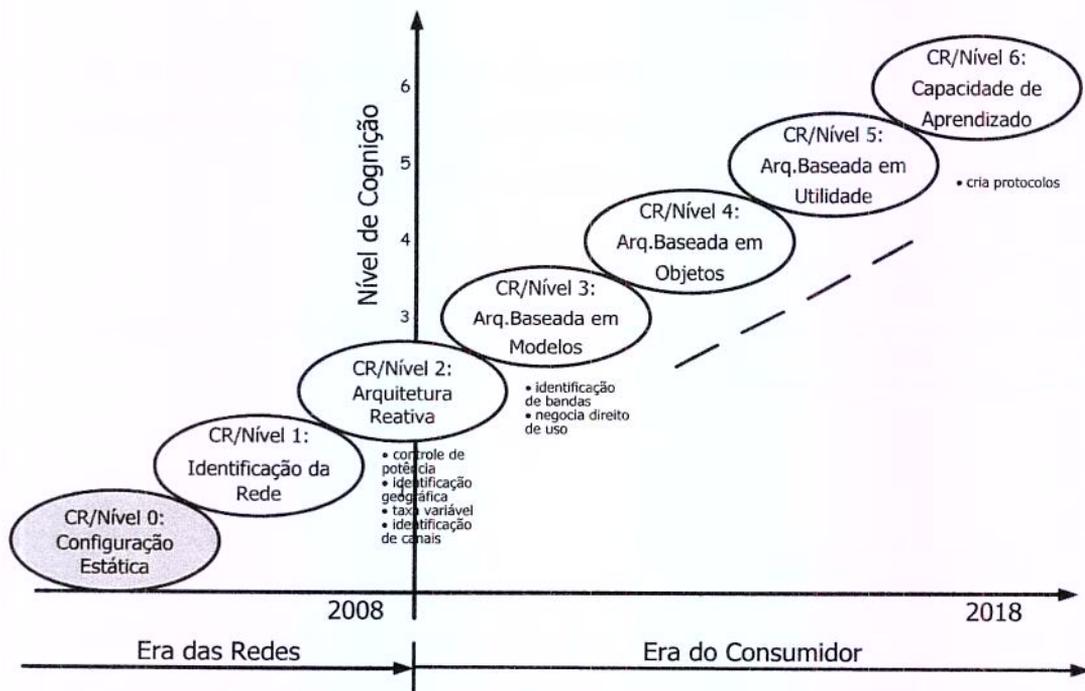


Figura 37 – Road-Map do Rádio Cognitivo

## 5 Estudo de Caso

Neste capítulo, iremos descrever uma aplicação para o modelo de referência, “Uma Plataforma Multiagentes para Rádio Cognitivo”, descrita no capítulo 4. Desenvolveremos parcialmente um rádio cognitivo de nível 2, operando como usuário não licenciado, dentro das faixas de guarda na banda licenciada para estações de TV. A rede cognitiva, ou rede de usuário secundária, irá operar como segundo usuário em um espectro não licenciado. Este modelo de operação é chamado de compartilhamento oportunista, pois a rede cognitiva irá ocupar faixas não ocupadas do espectro licenciado. Como pode ser observado, na carta de alocação de espectro de frequência na maioria dos países, encontramos muitas faixas de frequências tecnicamente alocadas, mas que nunca são utilizadas.

A implementação será parcial, devido à complexidade computacional à implementação completa foge do escopo deste trabalho. Serão apresentadas as questões relevantes da caracterização da rede cognitiva, a caracterização do ambiente, o algoritmo para identificação de canal vago, algoritmo de controle de potência, e detecção de espaço espectral em bandas de TV utilizando redes neurais.

## 5.1 Rede de Rádios Cognitivos

Estudaremos uma rede de rádios cognitivos, formada com os canais de guarda da banda licenciada. Uma rede secundária é estabelecida quando no mínimo dois usuários secundários observam o mesmo canal desocupado. No novo modelo de alocação de espectro proposto [55], dispositivos licenciados poderão ocupar temporariamente estes canais para formar uma rede, [6], [12], [22], [26], [35], [44] e [55]. Os usuários, que formam a rede de rádios cognitivos, serão chamados usuários secundários. Dentre as bandas espectrais licenciadas, encontramos espaços espectrais em branco, na banda de estações de TV. Na banda licenciada para as emissoras de TV, nas faixas de VHF e UHF, há um conjunto de espaços de frequências utilizadas como faixa de guarda para os sistemas de televisão. Cada canal ativo ocupa 6 MHz e são deixadas lacunas no espectro, com a largura de um ou mais canais, assim estes canais estão tecnicamente alocados, mas não utilizados.

Os usuários secundários fazem uma ocupação oportunista do espectro. Através de, um algoritmo de busca de buraco no espectro, eles procuram uma faixa de espectro desocupado para se instalar, como mostrado na Figura 38.

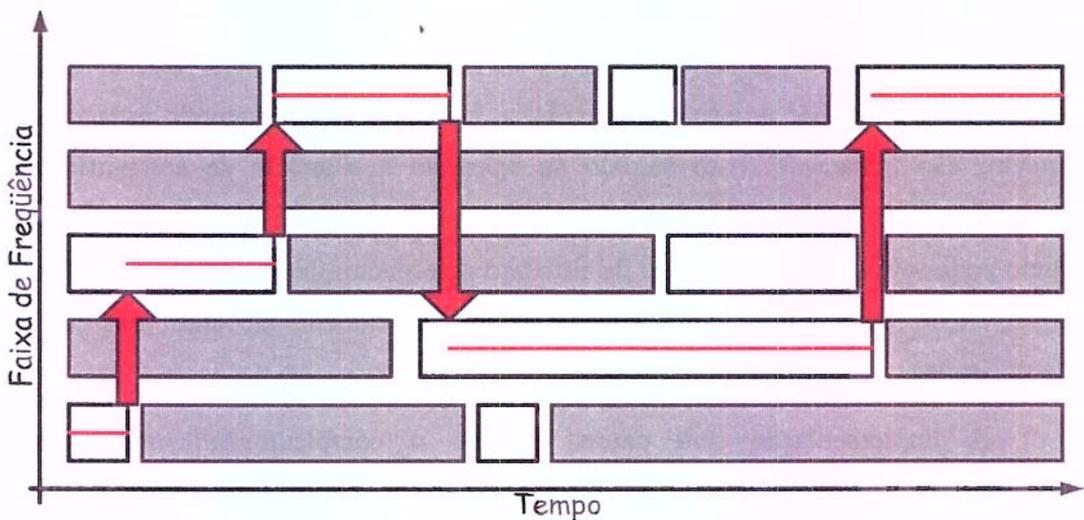


Figura 38 - Uso Oportunista do Espectro de Frequência

### 5.1.1 Modelo da Rede de Rádios Cognitivos

A rede cognitiva é formada por um conjunto de nós cognitivos, que são os rádios cognitivos transmitindo e recebendo, distribuídos em uma área geográfica, cujo modelo de operação é mostrado na **Figura 39**. As atividades de cognição são basicamente: Identificar, alocar, usar e liberar uma lacuna no espaço espectral do rádio.

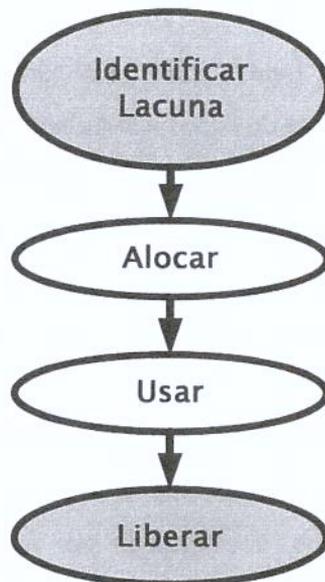


Figura 39 - Operação do Nó Cognitivo

Vamos particularizar nosso modelo da rede cognitiva [29], baseado na busca oportunista de espaço de canais na dimensão de frequência, do espaço espectral do rádio, conforme definido a seguir:

“Dada uma banda do espectro, constituída de  $N$  canais homogêneos com largura de faixa  $B$ , ocupada por usuários licenciados, ou usuários primários (UP). Dadas  $M$  redes cognitivas secundárias, constituídas por usuários secundários (US), procurando por oportunidade de comunicação. O padrão de uso da rede primária, em cada canal, é assumido ser um processo aleatório ON/OFF, com períodos de ON e OFF independentes. O período de ON indica que o canal está sendo ocupado pelo usuário primário, e o período de OFF, indica uma oportunidade de ocupação do espectro pela rede cognitiva secundária”.

### 5.1.1.1 Protocolo básico de uma rede cognitiva.

No início de cada quadro, o usuário secundário com dados para transmitir, escolhe um conjunto de canais para sensoriar e alocar, dentro de uma banda de espectro licenciado. As decisões de sensoriamento e acesso são feitas de forma que, a taxa de transmissão do usuário secundário respeite o limite de interferência, suportada pela rede de usuários primária.

Após a escolha de um canal livre, dentre os  $N$  canais alocados nesta banda, o usuário secundário transmite um pacote de dados e simultaneamente escuta o canal. Caso não ocorra colisão, detectada pelo seu próprio receptor, no final de cada quadro ele aguarda receber uma confirmação de recepção de pacote, do usuário receptor. O usuário transmissor aguarda um caractere informando o sucesso, ou não da transmissão. Um exemplo de caractere é o código ACK, enviada pelo usuário receptor. A colisão ocorre quando, dois usuários tentam acessar o mesmo canal simultaneamente. Se ocorrer uma colisão, os usuários secundários executam um loop de temporização aleatório para acessarem o canal novamente. Fazem novamente o sensoriamento do canal e realizam uma nova transmissão. Normalmente, é estipulado um número máximo de colisões consecutivas, após as quais a rede é considerada inoperante. A estrutura básica de quadro é mostrada na **Figura 40**.

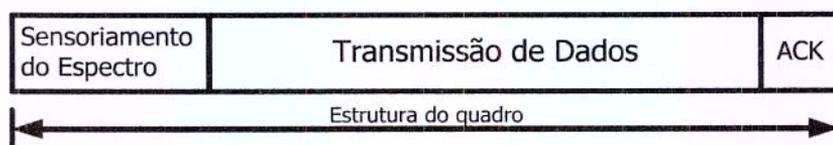


Figura 40 - Estrutura do Quadro para Rede Cognitiva

A disponibilidade de um canal  $N$ , observado por um usuário secundário, varia com o tempo e dependente da localização. A alocação de canais, na rede secundária, pode ser através de uma seleção aleatória, ou através de uma seleção coordenada. Iremos tratar apenas da seleção aleatória.

### 5.1.1.2 Distribuição Temporal da Disponibilidade de Canal para uso Oportunista.

A disponibilidade temporal [9], de uma banda espectral para uso oportunista, define a probabilidade de bloqueio da rede [39]. O acesso a um dos  $N$  canais, pela rede secundária, pode experimentar dois tipos de bloqueio:

1. Os  $N$  canais estão ocupados por usuários primários, ou redes cognitivas secundárias, ou ambos;
2. Chegada de um usuário primário, enquanto o canal está sendo utilizado por uma rede secundária oportunista.

No protocolo descrito acima, “escuta depois fala”, o período de utilização do espectro, pela rede secundária, é dado pela equação 1:

$$T_{US} = \frac{T_{off}}{T_{on} + T_{off}} \quad \text{Equação 1}$$

Onde,  $T_{off}$  é o período de não utilização do espectro pela rede primária, e  $T_{on}$  é o período de utilização do espectro pela rede primária.  $T_{on}$  é também denominado de probabilidade média de bloqueio.

A probabilidade de bloqueio, da rede secundária, depende do padrão de atividade dos usuários primários. Por exemplo, se as atividades dos usuários são previsíveis e periódicas, tais como estações de TV, então a disponibilidade do canal, para uso por redes secundárias, é também previsível e periódica. Se a utilização, por usuários primários, segue uma distribuição exponencial e período médio ON/OFF, a probabilidade de bloqueio é dada pela equação 2:

$$P_{Bloqueio} = N \frac{e^{-\frac{T_{on}t}{N}}}{T_{on}} \quad \text{Equação 2}$$

Onde,  $t$  é o tempo de bloqueio mínimo dos  $N$  canais, tendo o menor período de disponibilidade dos  $N$  canais, dentro da banda espectral.

Este modelo pode ser aplicado, por exemplo, para determinar a probabilidade de bloqueio exercida pelos usuários de microfones sem fio nas faixas de TV.

### 5.1.1.3 Distribuição Espacial da Rede de Usuários Secundários

Dois usuários secundários, próximos um do outro, têm a mesma chance de observar os mesmos canais disponíveis, após [29]. Por conseguinte, quando eles estão distantes as observações são provavelmente independentes. A seguir é apresentado um modelo para quantificar esta probabilidade.

Dado um canal  $N$ , com uma área circular com raio  $R$ , utilizada por uma rede primária. O modelo de alocação de espectro na dimensão do espaço de volume segue a figura do círculo. Este modelo deverá prever áreas de sobreposição, ao invés de áreas de sombreamento. A distribuição de usuários secundários nesta área segue uma distribuição de Poisson, com densidade  $\lambda$ . Esta consideração é tipicamente usada no estudo das redes wireless [24]. A probabilidade  $P(US_A)$ , do usuário  $US_A$  observar a disponibilidade de canal dentro do disco  $R$  é dada pela equação 3:

$$P(US_A) = e^{-\lambda\pi R^2} \quad \text{Equação 3}$$

Considere outro usuário secundário  $US_B$ , distante  $d$  do usuário  $US_A$ , tal como mostrado na **Figura 41**.

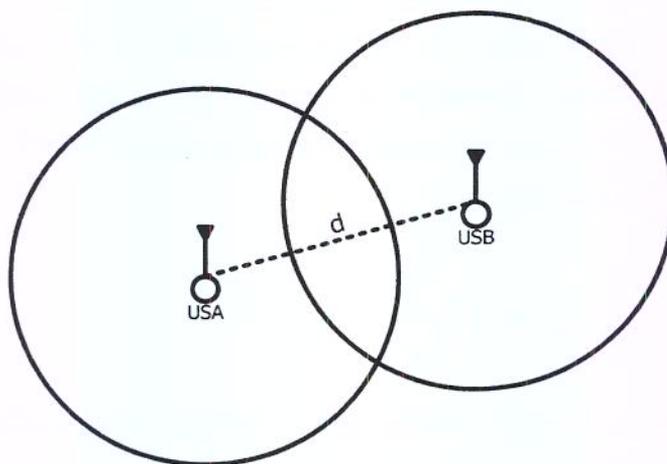


Figura 41 - Distribuição Espacial entre Usuários Secundários

A probabilidade de  $US_B$ , observar a disponibilidade do mesmo canal que o usuário  $US_A$  observou, é dada pela equação 4. O cálculo de  $P(US_B/US_A)$  considera a distância  $d$  entre  $US_A$  e  $US_B$ . Dado que,  $US_A$  observou a disponibilidade do canal, não há atividade do usuário primário. Portanto, na área de sobreposição das áreas de  $US_A$  e  $US_B$ , não há atividade primária, e  $US_B$  observa a disponibilidade de canal se e somente se não há usuários primários, dado pela equação 4.

$$P(US_B/US_A) = \begin{cases} e^{[-\lambda(\pi R^2 - A)]}, & 0 \leq d \leq 2R \\ P(US_B), & d \geq 2R \end{cases} \quad \text{Equação 4}$$

Onde,  $A = 2R^2 \cos^{-1}\left(\frac{d}{2R}\right) - d\sqrt{R^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}$  é a área de sobreposição entre os usuários  $US_A$  e  $US_B$ .

A correlação espacial relativa, entre os usuários  $US_A$  e  $US_B$ , em função das probabilidades  $P(US_B/US_A)$  e  $P(US_B)$ , é dada pela equação 5:

$$\eta_{USB/A} = \frac{P(US_B/US_A)}{P(US_B)} \quad \text{Equação 5}$$

Se  $US_B$  observa a disponibilidade, independente de  $US_A$ , então  $\eta_{USB/A}$  é igual a 1.

Quanto maior o valor de  $\eta_{USB/A}$  tanto maior a correlação geográfica. A **Figura 42** ilustra este grau de correlação, após [29]. No eixo x é mostrada a distância normalizada  $d/R$ , e no eixo y a correlação espacial  $\eta_{USB/A}$ . É estabelecido um valor de  $R=1$  e são mostrado alguns valores de  $\lambda$ . Da **Figura 42** conclui-se que:

1. Quanto mais próximos dois nós secundários estiverem tanto maior a probabilidade deles observarem a mesma disponibilidade de canal, isto é, uma alta correlação espacial;
2. Quanto mais distantes dois nós secundários estiverem tanto menor a probabilidade deles observarem a mesma disponibilidade de canal. Um valor de  $\lambda$  alto indica uma alta correlação normalizada, isto é, tanto  $P(US_B/US_A)$  quanto  $P(US_B)$  são pequenos, diminuindo a probabilidade de dois usuários secundários observarem o mesmo canal disponível.

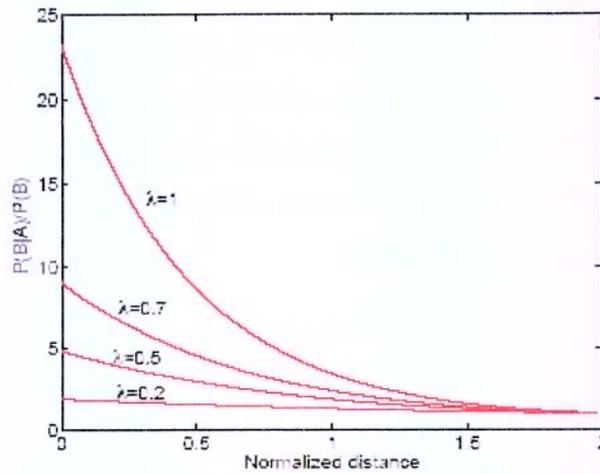


Figura 42 - Correlação Espacial entre Usuários Secundários [29].

### 5.1.2 Temperatura Interferente

O FCC distribuiu simultaneamente um “Notice of Inquiry” e um “Notice of Proposed Rulemaking” [41], para explorar o conceito de temperatura interferente. Isto permitirá aos transmissores sem licença, sem causar interferência danosa, compartilhar faixas licenciadas nos receptores primários. A interferência danosa, por parte dos transmissores secundários, irá causar quebra de serviço na rede primária. Com respeito à transmissão, este conceito foi introduzido com o intuito de limitar a emissão de potência dos rádios cognitivos, que irão operar em bandas espectrais licenciadas como usuário não licenciado. Com respeito ao sensoriamento do espectro, a temperatura interferente estabelece um limiar de operação dos nós das redes, e auxilia a identificar a ocupação de uma dada faixa espectral. A temperatura interferente estabelece o valor máximo de potência transmitida pelo usuário secundário, sem ultrapassar o limite pré-estabelecido.

O conceito de temperatura interferente é idêntico ao conceito de ruído térmico. É uma medida da potência e da largura de faixa ocupada pelo ruído, [10]. A temperatura interferente é dada pela equação 6.

$$T_I(f_c, B) = \frac{P_I(f_c, B)}{k \cdot B} (\text{° Kelvin}) \quad \text{Equação 6}$$

Onde,  $P_I(f_c, B)$  é a potência de interferência medida em Watts, em torno da frequência  $f_c$ , com largura de faixa de  $B$  (Hertz), e  $k$  é a constante de Boltzmann igual  $1,38 \times 10^{-23}$  (Joules/Kelvin).

A temperatura interferente é um valor de referência, normalizado pelo órgão regulador, estabelecido para assegurar o funcionamento da rede primária. A diferença entre, o valor de referencia e a soma do ruído térmico mais ruído interferente, é o valor de potência máxima a ser emitido pelo usuário da rede secundária. A Figura 43 mostra o conceito de temperatura interferente de espectro licenciado. O usuário do espectro licenciado opera em um nível acima da temperatura interferente.

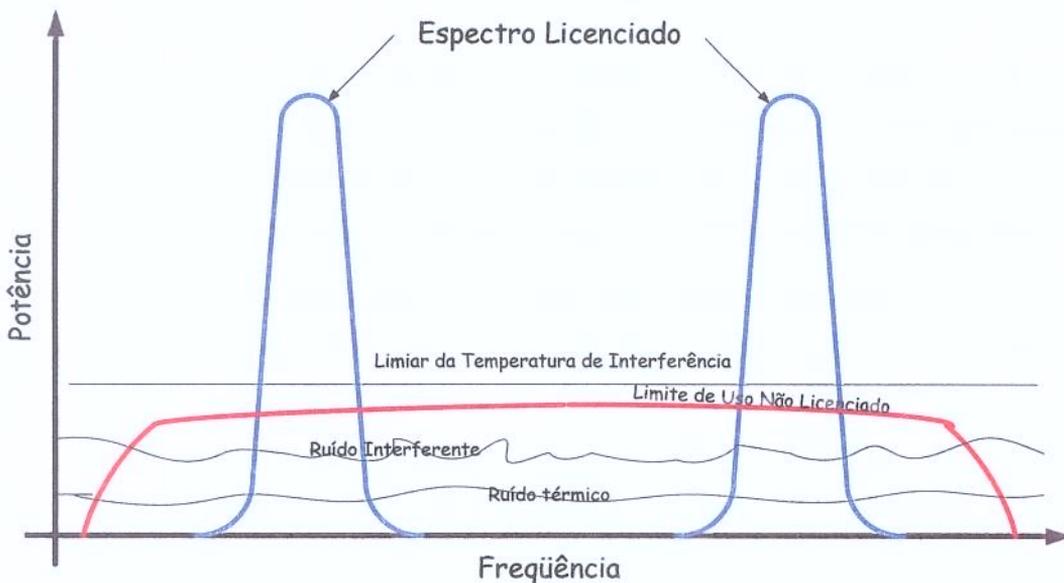


Figura 43 - Temperatura Interferente

Para uma dada área, o órgão regulador deverá estabelecer um *limite da temperatura interferente*,  $T_L$ . Este valor será a máxima interferência tolerável naquela área, para aquela banda de frequência. Os transmissores não licenciados devem assegurar que a emissão do seu sinal, acrescidos à interferência local, não excede ao limite da temperatura interferente preestabelecido, como mostrado pela equação 7.

$$\left( T_I(f_i, B_i) + \frac{\beta_L \cdot P_{US}}{kB_i} \right) \leq T_L(f_i), \quad \forall 1 \leq i \leq n \quad \text{Equação 7}$$

Onde,  $P_{US}$  é potência média do transmissor do usuário não licenciado, na frequência  $f_c$  e largura de faixa  $B$ , do  $i$ -ésimo canal.  $\beta_S$  é um parâmetro que representa a atenuação devido ao desvanecimento e perdas, entre o transmissor não licenciado e receptor licenciado.

### 5.1.2.1 Capacidade Teórica do Canal

A capacidade teórica do canal, após [11], baseado no teorema de Shannon é dada pela equação (8).

$$C = B \log_2(1 + SIR) = B \log_2 \left( 1 + \frac{\beta_S \cdot P_{US}}{k \cdot B \cdot T_I} \right) \quad \text{Equação 8}$$

Onde,  $C$  é a capacidade do canal em bits/Hertz,  $B$  é a largura de faixa em Hertz,  $T_I$  é a temperatura interferente medida no receptor secundário e  $\beta_S$  é um fator que representa a atenuação do sinal, entre o transmissor secundário e o receptor secundário.  $\beta_S$  varia entre 0 e 1, quanto menor este valor, maior a faixa de atenuação do rádio cognitivo.

A adoção da temperatura interferente limita a potência transmitida a um limiar preestabelecido  $T_L$ , com potência equivalente  $P_L$ . A potência máxima emitida pelo usuário secundário, vista pelo receptor primário, deverá ser a diferença entre a potência  $P_L$  e a potência interferente medida no receptor, acrescido de um fator  $\beta_L$ , que representada à atenuação entre o transmissor secundário e o receptor primário, dada pela equação 9.

$$\beta_L \cdot P_{US} = P_L - P_I \Rightarrow P_{US} = \frac{kB}{\beta_L} (T_L - T_I) \quad \text{Equação 9}$$

Substituindo a equação 9 na equação 8, temos que a largura de faixa necessária em função da taxa de bits, dada pela equação 10.

$$B = \frac{C}{\log_2 \left( 1 + \frac{\beta_S}{\beta_L} \cdot \frac{T_L - T_I}{T_I} \right)} \quad \text{Equação 10}$$

### 5.1.2.2 Múltiplo Acesso por Temperatura Interferente – ITMA

ITMA é um novo método de multiplexação, baseado na temperatura interferente [12]. O protocolo da camada de acesso ao meio (MAC) do ITMA é mostrado na **Figura 44**. Para transmitir um pacote de dados, o rádio cognitivo primeiro mede a temperatura interferente  $T_I$ , utilizada para calcular a largura de faixa disponível. A largura de faixa é calculada pela equação 10. Se a largura de faixa do canal disponível é maior do que a largura de faixa máxima, especificada por  $B_{max}$ , então o pacote é transmitido.

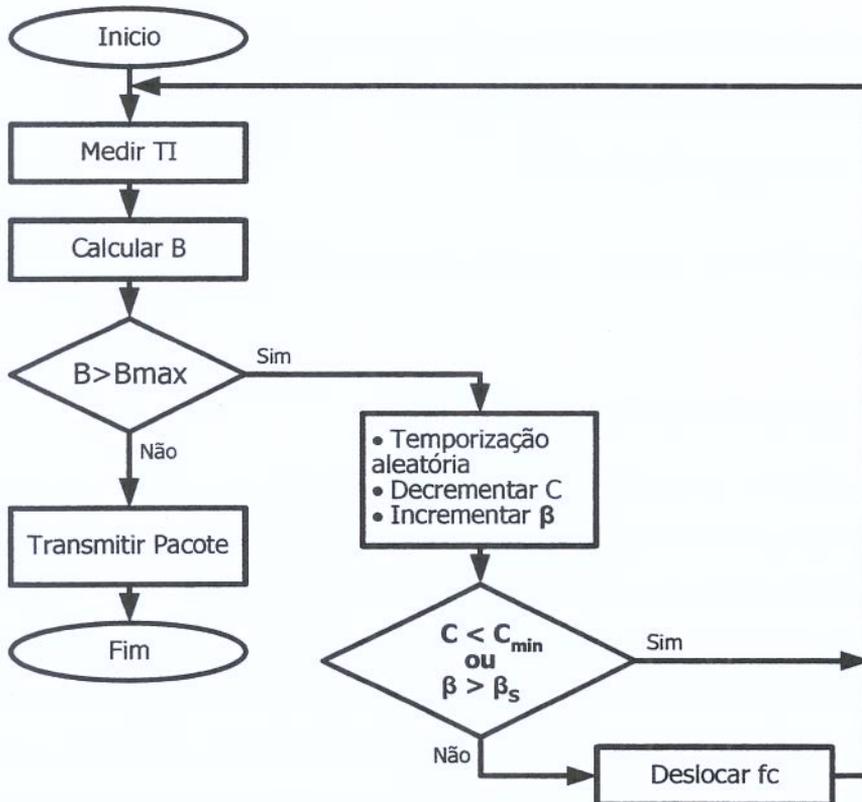


Figura 44 - Protocolo da camada MAC do ITMA [8].

Caso o valor da largura de faixa não for suficiente, o rádio cognitivo tem as seguintes opções:

1. Simplesmente esperar e monitorar novamente o espectro, até o instante em que  $T_I$  diminua a um valor adequado para transmissão;

2. Decrementar  $C$ , diminuindo a taxa de bits. Este procedimento é dependente do tipo de serviço;
3. Aumentar  $\beta_S$ , diminuindo a área de cobertura do rádio cognitivo. Este procedimento deve considerar a distância do nó receptor e o desvanecimento ou sombreamento que o mesmo está sujeito;
4. Se  $C < C_{min}$  e  $\beta > \beta_{max}$  durante certo tempo preestabelecido para a transmissão de pacotes, será estabelecida uma condição de atraso excessivo e deve-se mudar a frequência central de pesquisa, para uma nova frequência.

A seleção da frequência central, obtida com a medida da frequência central da temperatura interferente, é dada pela equação 11.

$$f_c = \arg \max_{f \in F} (T_L |f| - T_I |f|) \quad \text{Equação 11}$$

Este procedimento otimiza a escolha do canal de transmissão, dentro de uma banda espectral.

### 5.1.3 Operação na Faixa Espectral de TV

Como definido anteriormente, estamos interessados em operar nas faixas de guarda de 54 MHz até 72 MHz, da banda alocada para as emissoras de TV [16]. Esta banda é classificada como licenciado exclusivo. A largura de faixa dos canais é de 6 MHz, com uma ou mais faixas de guarda de 6 MHz, entre eles. O sistema é simplex e o usuário transmite sinais de vídeo modulados em VSB, e sinais de áudio em FM, com suas respectivas subportadoras e sinais de sincronismo. Há dois tipos de licença, para uso comercial ou comunitário, que definem a potência de transmissão máxima permitida.

A análise do espectro ocupado, baseada no trabalho do Professor Steven Ellingson, do Virginia Tech/MPRG [14], é descrita a seguir. Os dados foram levantados durante uma semana de medições nos limites da cidade de Columbus, Ohio. Foram realizadas medidas na área urbana e rural. A **Figura 45** mostra o arranjo utilizado para o levantamento dos dados.

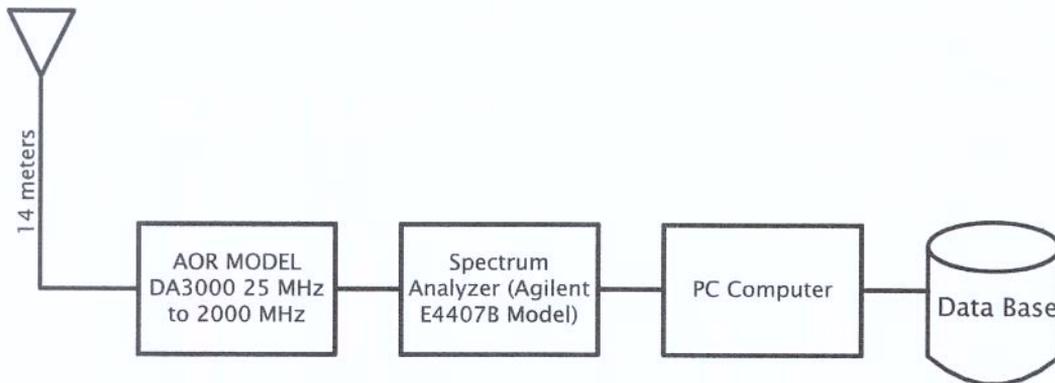


Figura 45 - Arranjo para Levantamento do Espectro em Columbus Ohio [14].

O levantamento foi realizado na faixa do espectro de DC até 270 MHz, em três segmentos contínuos de 90 MHz, separados em 3001 canais de 30 kHz. A **Figura 46** mostra a densidade espectral de potência, para a faixa de 0 até 90 MHz. O sinal no topo da figura/vermelho mostra o máximo da densidade espectral de potência; no meio/azul, mostra a média da densidade espectral de potência; e na parte inferior/verde, temos a média utilizando uma carga casada ao invés da antena, a resolução utilizada, como previamente citada, é de 30 kHz.

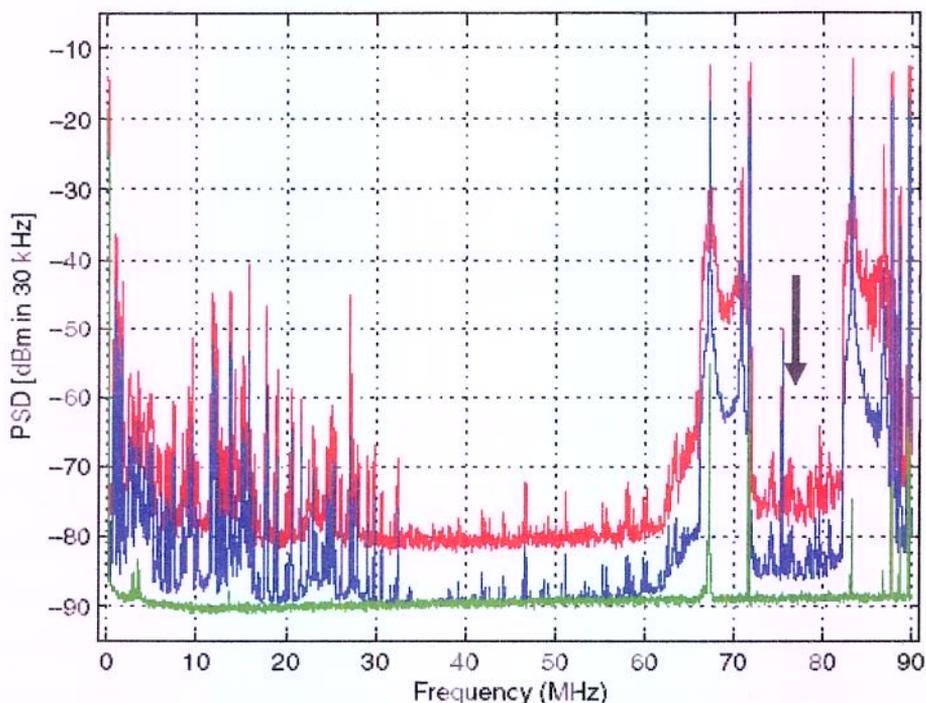


Figura 46 - Densidade Espectral de Potência de 0-90 MHz após [14].

A **Figura 46** mostra que, a densidade espectral de potência, possui amplitude significativa nas faixas de espectro alocadas para os canais de TV, 4 e 6. No caso, o sinal composto de TV (vídeo, cor e áudio) com suas subportadoras de 67,25 MHz; 70,83 MHz e 71,75 MHz; e 83,25 MHz; 86,83 MHz e 87,75 MHz, para os canais 4 e 6, respectivamente. Observamos que o canal 5, na faixa de 76 a 82 MHz, está livre e disponível para uso, indicado pela seta.

Não foi observada muita diferença entre a densidade espectral de potência média e máxima, sugerindo um alto ciclo de ocupação para os canais em uso. A faixa do espectro de 30 até 54 MHz apresenta uma baixa densidade espectral de potência e a princípio podem ser utilizadas para uso oportunista. No entanto, esta faixa deve ser evitada, pois são tecnicamente alocadas para os sistemas de comunicações de aviação e enlace de descida de satélites.

O FCC publicou o “Unlicensed Operation in TV Broadcast Bands” [16], descrevendo as propostas de uso das bandas de guarda de TV para os serviços faixa larga sem fio, tal como o IEEE802.22. O FCC definiu um critério para determinar canais da

banda de TV vagos, deixados como faixa de guarda, com o propósito de permitir ao dispositivo não licenciado identificar estes canais.

Todos os serviços de TVs analógicas e digitais, TV Classe A, e TVs de baixa potência, deverão ser protegidos contra interferência. Define-se um contorno, dentro do qual, é assegurada a operação da rede primária. O nível do sinal, que define o contorno, para a proteção varia dependendo do tipo de estação, isto é, analógica ou digital e em qual banda a estação de TV opera, tal como mostrado na **Tabela 7**.

Tipo de Estação	Contorno de Proteção		
	Canal	Contorno (dBu)	Curva de Propagação
TV analógica	VHF baixo (2 - 6)	47	F(50,50)
	VHF alto (7 - 13)	56	F(50,50)
	UHF (14 - 69)	64	F(50,50)
Analógica Classe A, TV de baixa potência.	VHF baixo (2 - 6)	62	F(50,50)
	VHF alto (7 - 13)	68	F(50,50)
	UHF (14 - 69)	74	F(50,50)
TV Digital	VHF baixo (2 - 6)	28	F(50,90)
	VHF alto (7 - 13)	36	F(50,90)
	UHF (14 - 69)	41	F(50,90)
TV Digital Classe A	VHF baixo (2 - 6)	43	F(50,90)
	VHF alto (7 - 13)	48	F(50,90)
	UHF (14 - 69)	51	F(50,90)

Tabela 7 - Contorno de Proteção do Serviço de TV [16].

A proposta deste critério, chamado de área de serviço da rede primária, define a área onde os dispositivos não licenciados não devem causar a interferência danosa.

Se a interferência ocorre ou não, depende da relação sinal desejado/indesejado - D/U (desired-undesired), este é o valor mínimo de um serviço aceitável para o usuário licenciado, ou usuário primário. O valor desta relação depende do tipo de estação, da faixa de frequência e da natureza do sinal indesejado. Comparando, a potência de operação do serviço faixa larga digital não licenciado, com o serviço de televisão, teremos um sinal de potência muito baixo, que deverá aparecer como um ruído. Definido como C/I, não deverá afetar o serviço de TV. As restrições para os serviços dos dispositivos licenciados deverão estar limitadas às interferências, co-canal e canal adjacente nas operações de acesso fixo, e co-canal nas operações móveis.

A potência de emissão do dispositivo não licenciado associada à interferência de canal adjacente, na situação de pior caso, deverá estar abaixo de  $D/U$ . A situação de pior caso ocorre no limiar da área de serviço da estação de TV, onde o sinal de TV é bastante fraco. Na prática, esta interferência deve ser eliminada pelos efeitos de ruído ambiente, blindagem de construções, paredes, etc. A **Tabela 8** mostra os valores propostos para a relação  $D/U$ .

Tipo de Estação	Contorno de Proteção		
	Canal	Razão D/U (dB)	Curva de Propagação
TV analógica, Analógica Classe A, TV de baixa	Co-canal	34	F(50,10)
	Adjacente Superior	-17	F(50,50)
	Adjacente Inferior	-14	F(50,50)
TV Digital e TV Digital Classe A	Co-canal	23	F(50,10)
	Adjacente Superior	-26	F(50,50)
	Adjacente Inferior	-28	F(50,50)

Tabela 8 - Relação D/U para o serviço de TV [16].

### 5.1.3.1 Probabilidade de Quebra de Serviço dos Receptores Primários

A seguir, iremos apresentar uma nova proposta para controle de potência a ser implementada no rádio cognitivo, através do conceito de  $D_U$ , [16]. O valor de  $D_U$ , presente na entrada do receptor primário, é a razão entre a potência transmitida pelo usuário primário e a transmitida pelo usuário secundário. Esta razão, representa o menor valor presente na entrada do receptor primário sem quebra de serviço por interferência.

$D_U$  estabelece o limite inferior da probabilidade de outage<sup>6</sup>, quanto menor o valor tanto maior a proteção aos usuários primários, a **Tabela 8** mostra valores mínimos de  $D_U$ , para os serviços de TV nas faixas de VHF e UHF. O controle da potência de transmissão do transmissor secundário, utilizando a relação  $D_U$ , permite maximizar a probabilidade de acesso dos usuários não licenciados, através da rede secundária [27], [28] e [31].

O estudo do caso proposto utiliza as faixas de guarda banda das estações de TV, como usuários licenciados. Neste ambiente, as características de emissão do usuário primário são bem definidas e conhecidas, tendo muito pouca variação ao longo de anos e são de conhecimento público. As características de emissão de uma estação de TV são potência, canal de utilização e tipo de transmissão.

A área efetiva de cobertura de uma estação de TV, determinada pelo raio  $R$ , é proporcional a potência de transmissão, dada por  $P_{TV}$  e  $\alpha_p$ . O parâmetro  $\alpha_p$  representa as perdas de propagação do sinal, entre transmissor e receptor primário, como mostrado no círculo pontilhado da **Figura 47**. O raio  $R$  é dado pela equação 12.

$$R \propto P_{TV}^{1/\alpha_p} \quad \text{Equação 12}$$

A **Figura 47** descreve um nó fixo da rede cognitiva cocanal, fora da área de cobertura da estação de TV, a uma distância  $d$  da mesma.  $d-R$  é a menor distância entre o nó da rede secundária e um receptor primário, posicionado na borda da área de cobertura da estação de TV, onde não há quebra de serviço causada por interferência da rede secundária.

---

<sup>6</sup> **Probabilidade de outage** é uma medida do desempenho de sistemas definida através da razão sinal/interferência; Sinal to Interference Ratio - SIR. A SIR em dB estabelece o limiar inferior de operação do receptor, e é dada por:  $P_{outage} = P_r \{SIR(dB) < x_{limiar} (dB)\}$ .

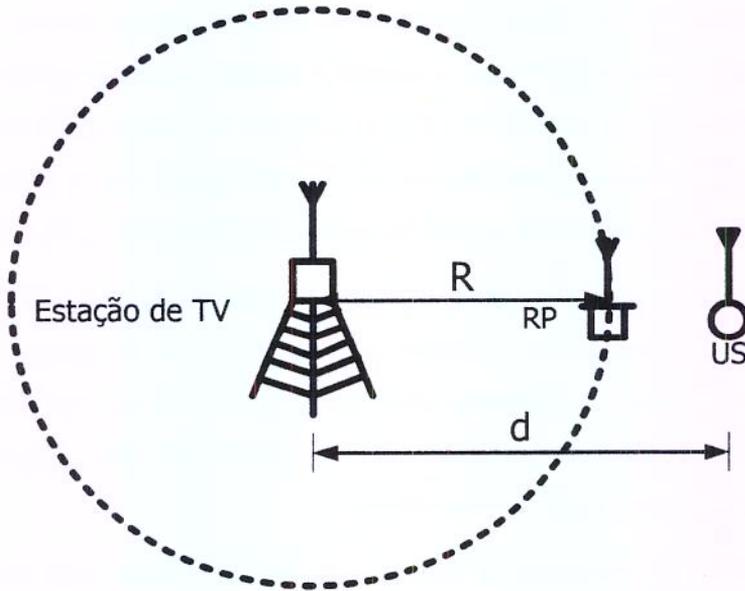


Figura 47 - Ambiente de Operação Oportunista

A relação  $D_U$ , presente na entrada do receptor primário, é a relação entre o sinal transmitido pela estação de TV e o sinal emitido pelo transmissor secundário, sendo dado pela equação 13.

$$D_U = \frac{R^{-\alpha_p} \cdot P_{TV}}{(d - R)^{\beta_s} \cdot P_S} \quad \text{Equação 13}$$

onde,  $\beta_s$  é o parâmetro que representa perdas de propagação do sinal entre o transmissor secundário e o receptor primário.  $d$  é um valor calculado a partir dos parâmetros previamente definidos para a aquela área. Manipulando a equação 13 obtemos a expressão para o calculo de  $d$ , dado pela equação 14.

$$d = \frac{10^{\left[ \frac{D_U(\text{dB}) - \log \frac{P_{TV}}{P_S} + \alpha_p \log R}{\beta_s} \right]} + R}{\beta_s} \quad \text{Equação 14}$$

onde,  $D_U(\text{dB})$ ,  $P_{TV}$  e  $R$  são previamente fixados. A potência de operação do transmissor secundário, em relação à borda da área de cobertura, é limitada através de um controle. A relação entre a potência emitida pelo usuário licenciado, o usuário oportunista e a distância entre eles é mostrada na **Figura 48**.

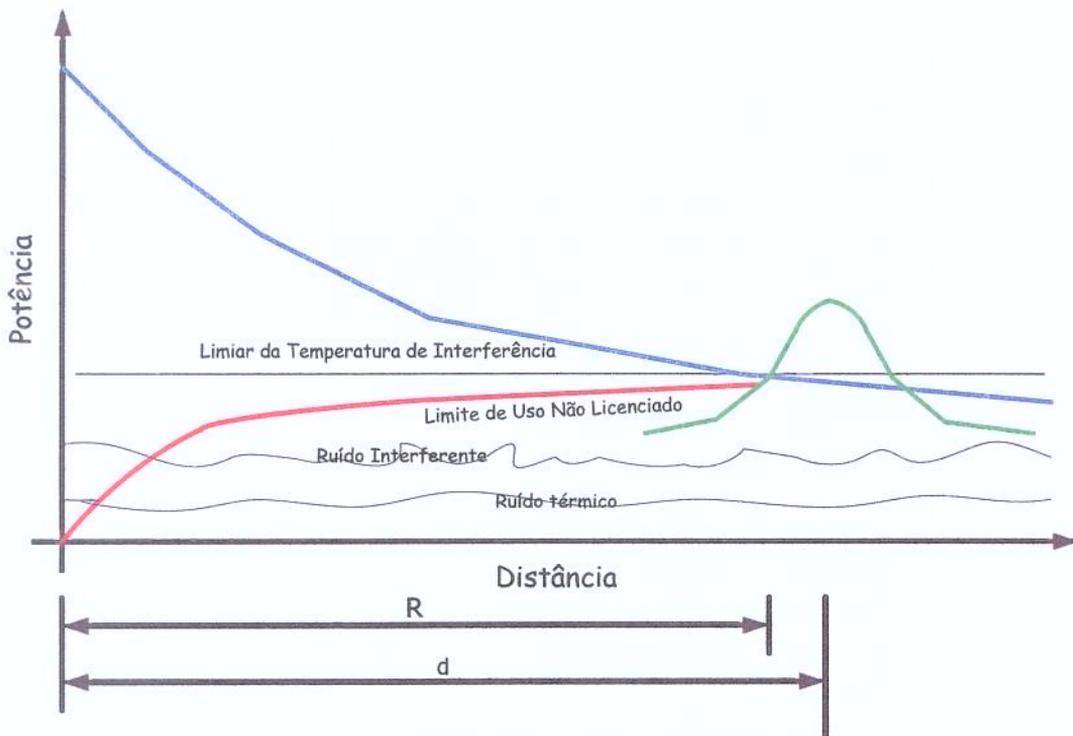


Figura 48 - Separação dos Usuários com Relação à Potência

O controle de potência no usuário secundário é implementado através do algoritmo mostrado na **Figura 49**. É realizada uma medida da distância entre, a estação de TV e nó secundário, através de um algoritmo de medida de energia.

Dadas as características, tanto da estação de TV quanto do rádio cognitivo, calcula-se o valor de  $d_{min}$  utilizando a equação 13. Este valor é comparado com o valor medido, e se for maior, deverá ser reduzida a potência do transmissor do usuário secundário. Este processo se repete até encontrar a potência de transmissão adequada, que não cause quebra de serviço no receptor primário.

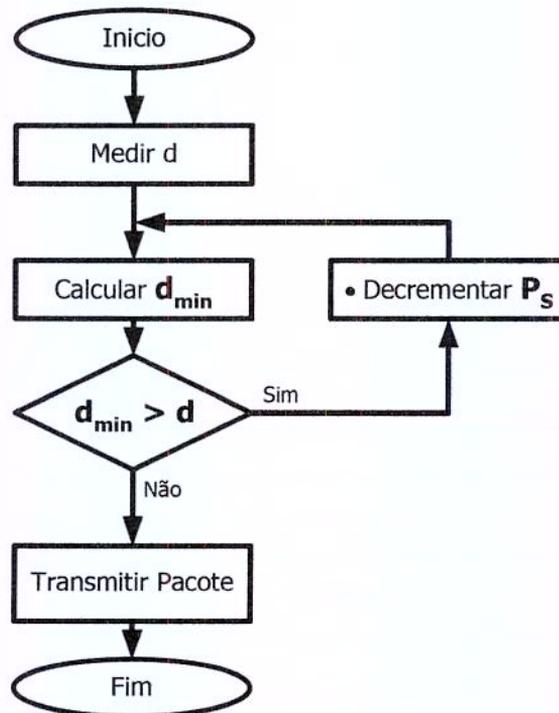


Figura 49 - Controle de Potência

Por exemplo, uma dada estação de TV operando no canal 2, potência de transmissão 100K Watts, raio de cobertura 120 km. Um usuário secundário fixo com potência máxima de 4 Watts e com relação  $D_U(\text{dB}) = 34 \text{ dB}$ , poderá operar com potência máxima, situado no mínimo a 10 km da borda de cobertura. Caso ele se encontre a 7,5 km, o sistema de controle da potência em um passo de 3 dB, reduz a potência do rádio para 2 Watts.

## 5.2 Sensoriamento do Espectro de Frequência.

O sensoriamento do espectro é a atividade principal do rádio cognitivo, seu papel é fundamental no desempenho do uso oportunista do espectro, [8], [22] e [28]. O sensoriamento tem como objetivo, encontrar lacunas dentro de uma faixa espectral e nela estabelecer uma transmissão. O sensoriamento classifica o estado do canal de acordo com seu nível de atividade:

1. Canal ocupado por usuário primário licenciado;
2. Canal ocupado por usuário secundário não licenciado;
3. Canal desocupado.

A classificação mais simples consiste em, medir o nível de energia atual da banda espectral, e compará-la com um limiar de decisão pré-estabelecido. Se o nível de energia estiver abaixo do limiar preestabelecido, o mesmo estará desocupado e pronto para uso. No entanto, uma escolha inadequada do limiar de detecção poderá resultar na condição de falso alarme em duas hipóteses: primeiro, detectar um canal ocupado quando o mesmo está desocupado; se segundo, o pior caso, detectar um canal desocupado quando o mesmo está ocupado, falsa negativa, [49]. Portanto, preestabelecer o limiar influencia diretamente a capacidade do sistema, tais como:

- Estipulando-se um limiar de detecção alto, reduzimos a probabilidade de falso alarme e a capacidade do sistema, no entanto aumentamos à segurança do receptor primário;
- Caso contrário, estipulando-se um limiar de detecção baixo, diminuimos a segurança do receptor primário, no entanto, aumentamos a probabilidade de falso alarme e a capacidade do sistema.

Há três aspectos fundamentais para a escolha do dispositivo de classificação do estado do espectro:

- 1) A qualidade de detecção da presença de usuário primário:
  - a. A probabilidade de não detecção do usuário primário;
  - b. A probabilidade de falso alarme.
- 2) O tempo de processamento gasto pelo dispositivo para classificar o estado do canal;
- 3) O tempo necessário para limpar o espectro, usuário primário detectado enquanto o usuário secundário utilizava o canal.

As falhas de propagação, devido ao sombreamento e desvanecimento por multipercurso, afetam a classificação do estado do canal . O sombreamento pode levar a uma detecção falsa de lacuna em branco no espectro, pois o dispositivo licenciado do

usuário oportunista poderá não ser capaz de detectar o usuário primário. O desvanecimento multipercurso, do sinal transmitido pelo usuário primário, poderá ser ou não ser acrescido coerentemente no receptor, e pequenas mudanças na posição relativa do comprimento de onda degradam a qualidade da detecção do usuário secundário.

A seguir, é apresentado um conjunto de recomendações para a implementação do dispositivo de sensoriamento do espectro de frequência, para aplicações em uso oportunista:

- **Sensoriamento contínuo do espectro.** Periodicamente o rádio cognitivo deve varrer o espectro, para monitorar o estado do espaço em uso, ou então dos espaços que não estão sendo utilizados por usuários licenciados, para maximizar o uso dos canais;
- **Tempo mínimo de detecção.** Detecção instantânea de lacuna não caracteriza oportunidade de espaço em branco. São necessárias diversas monitorações contínuas da mesma lacuna, verificando se a temperatura de ruído permanece abaixo de certo limiar, para assegurar a disponibilidade. Na instalação da rede esta monitoração deve ocorrer na ordem de segundos. Este procedimento visa auxiliar a falsa detecção de lacuna;
- **Detecção em diferentes posições dentro da área de operação.** Detecção de uma lacuna deve ser observada por dois ou mais usuários, para a formação da rede e caracterização como uso oportunista. Detecção de lacuna por um único usuário não caracteriza o mesmo para uso oportunista, pois o detector pode estar realizando uma falsa detecção de lacuna devido aos seguintes fatores:
  - Nó cognitivo com limiar de sensoriamento limitado;
  - Nó cognitivo estar experimentando uma área de sombreamento;
  - Sinal transmitido pelo usuário primário passando por um desvanecimento profundo.
- **Largura de faixa do espaço detectado.** A largura de faixa da lacuna detectada, deve ser suficiente para a transmissão na taxa de bits estabelecida para o serviço;

- **Interferência nos usuários licenciados ou primários da banda.** A rede cognitiva não deve interferir na operação dos dispositivos primários da banda. Por exemplo, em uma banda de TV, o sinal transmitido pelo usuário secundário, não deve causar interferência acima do limiar estabelecido para interferência cocanal e canal adjacente;
- **Temperatura Interferente.** Os nós cognitivos da rede recém formada devem operar abaixo do limiar da temperatura interferente.

A Figura 50 mostra o conceito de busca lacunas no espectro, isto é, a busca do ponto inicial e final onde o nível do sinal está abaixo da temperatura interferente. No início do sensoriamento é definindo a frequência inicial da banda espectral, no caso o ponto  $f_0$ , e a largura de faixa do canal a ser varrido. Se o tamanho do canal for muito pequeno é obtida uma ocupação ótima do espectro, no entanto aumentamos o tempo de varredura da banda. Estabelecendo um canal muito grande, diminuimos o tempo de varredura da banda, no entanto, podemos não detectar lacunas na mesma.

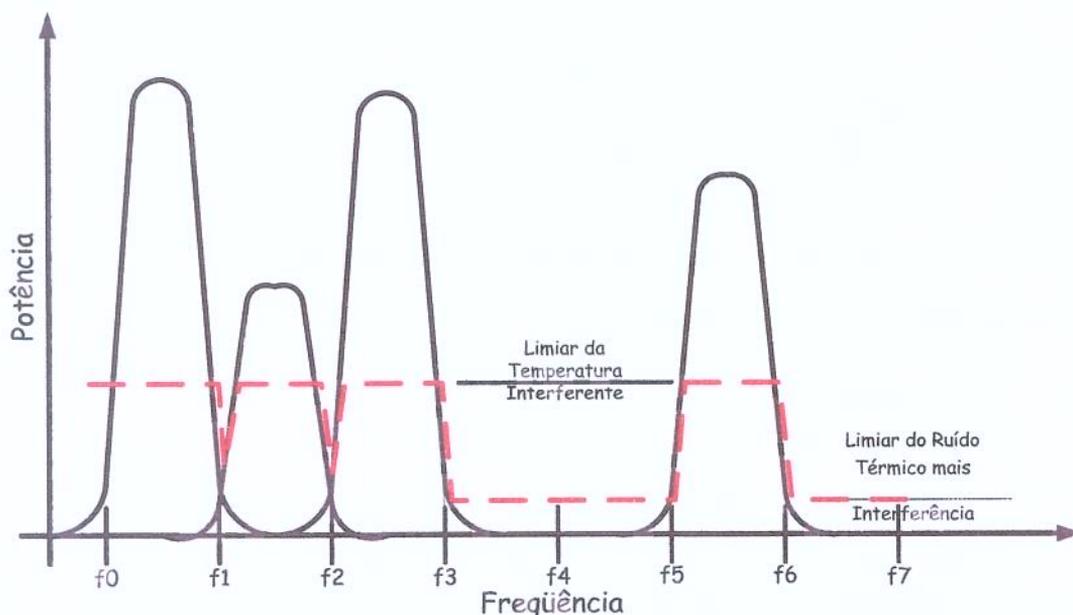


Figura 50 - Busca de Buracos no Espectro de Frequência

No caso da Figura 50, identificamos duas lacunas, a primeira entre as frequências  $f_3$  e  $f_5$ , e segunda entre as frequências  $f_6$  e  $f_7$ , onde poderemos instalar uma rede de rádios cognitivos.

A soma do ruído térmico mais o ruído interferente, linha em vermelho/tracejada na Figura 50, representa a energia medida e comparada com a temperatura interferente para classificar a ocupação do espectro.

Na literatura encontramos os seguintes métodos propostos [8] e [9]:

1. Detector com filtro casado;
2. Detector de energia não coerente;
3. Detector de sinais ciclo estacionários.

### 5.2.1 Detector com Filtro Casado

Este detector, estima a energia de um canal utilizando a técnica de filtro casado, é um detector ótimo, pois maximiza a relação sinal ruído [8]. Assumindo um perfeito conhecimento do sinal  $X(t)$ , transmitindo em um dos N canais da banda espectral, o sinal na saída do filtro casado indica a presença ou ausência do sinal, conforme mostrado pela equação 15.

$$\sum_{k=1}^N y(n) \frac{x(n)}{\|x\|} \begin{cases} > \frac{\|x\|}{2} \Rightarrow H_1, \text{ sinal presente} \\ < \frac{\|x\|}{2} \Rightarrow H_0, \text{ sinal ausente} \end{cases} \quad \text{Equação 15}$$

Onde,  $H_1$  é a hipótese do sinal presente e  $H_0$  é a hipótese do sinal ausente.

As desvantagens deste método são:

- Necessidade de conhecer à priori as características do sinal tais como: tipo e ordem de modulação; modelo do pulso; formato do pacote; sincronismo de portadora e de bit; e equalização do canal. O problema do conhecimento à priori das características do sinal pode ser solucionado utilizando redes neurais [27].
- Disponibilizar receptor dedicado a cada classe de usuário primário.

As vantagens deste método são:

- Tempo de detecção baixo;

- Operação em ambiente hostil, pois tem uma alta relação sinal ruído.

### 5.2.2 Detector de Energia

Uma versão simplificada do detector com filtro casado é o detector de energia não coerente ou simplesmente detector de energia. O detector de energia é uma técnica quase ótima. Assumindo um conhecimento mínimo do sinal, determina-se a presença ou ausência comparando o sinal detectado com um limiar pré-estabelecido, tal como mostrado pela equação 16.

$$\sum_{k=1}^N [y(n)]^2 \begin{cases} > N \left( \sigma^2 + \frac{P}{2} \right) \Rightarrow H_1, \text{ sinal presente} \\ < N \left( \sigma^2 + \frac{P}{2} \right) \Rightarrow H_0, \text{ sinal ausente} \end{cases} \quad \text{Equação 16}$$

Onde,  $N$  é densidade espectral de potência com ruído branco Gaussiano,  $H_1$  é a hipótese do sinal presente, e  $H_0$  é a hipótese do sinal ausente.

A implementação é similar a de um analisador de espectro, o sinal  $X(t)$  é amostrado e a seguir são extraídas as médias dos bins de frequência utilizando a transformada rápida de Fourier (FFT), como mostrado na **Figura 51**. Após a FFT, é realizada uma média dos bins de frequência, antes de ser aplicado no comparador. O comparador de limiar, utilizando a equação 16, decide sobre a presença ou ausência de sinal nesta faixa do espectro.

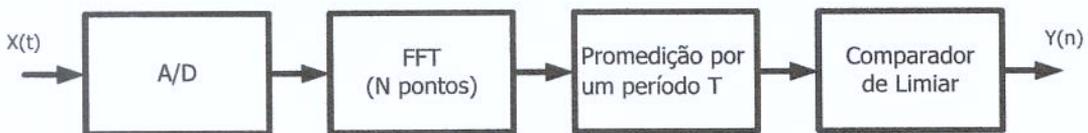


Figura 51 - Detector de energia não coerente.

A carga de processamento é proporcional ao tamanho da FFT, dado por  $N$  e o tempo de observação/ promediação, dado por  $T$ . O valor de  $N$  determina a resolução da detecção na presença de sinais. O aumento do número de promediações maximiza a relação do sinal ruído SNR, do canal analisado.

As desvantagens deste método são:

- Dependência do conhecimento do limiar de comparação. O valor do limiar é altamente susceptível a mudanças no nível de ruído. Embora possa ser utilizado um limiar adaptativo à presença de qualquer interferência dentro da faixa poder confundir o detector de energia. Além disto, para desvanecimento seletivo não há uma regra clara de como estabelecer o valor do limiar;
- Não diferenciam entre sinais modulados, ruído e outros sinais interferentes. Assim, ele não poderá discriminar o ruído da ocupação do canal por outro usuário secundário;
- Não funciona quando o canal está sendo utilizado por sistemas que empregam as técnicas de espalhamento espectral.

As vantagens deste método são:

- Simplicidade de implementação, pois não necessita de receptor dedicado;
- Tempo de detecção médio;
- Eficiente para sinais faixa estreita.

### 5.2.3 Detector de Sinais Ciclo Estacionários

O detector de sinais ciclo estacionários é baseado no princípio que, o sinal modulado mesmo contendo a aleatoriedade da informação não perde suas características periódicas tais como, média, autocorrelação, periodicidade [20]. As detecções destas estatísticas no receptor são utilizadas para extrair parâmetros tais como, fase da portadora, largura do pulso, etc. O processo de análise está baseado em duas funções: a função de autocorrelação e a densidade espectral de potência. A função de correlação espectral é mostrada pela equação 17.

$$S_x^\alpha(f) = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \lim_{\Delta \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta t} \int_{-\Delta t/2}^{\Delta t/2} \frac{1}{T} X_\tau(t, f + \alpha/2) X_\tau^*(t, -\alpha/2) \cdot dt \quad \text{Equação 17}$$

A implementação do detector de sinais ciclo estacionários é mostrada **Figura 52** [25]. O sinal  $X(t)$  é amostrado pelo conversor A/D, em seguida é calculada a transformada de Fourier (FFT) de N pontos. O sinal na saída da FFT,  $X(f)$ , é

correlacionado antes de ser aplicado ao comparador de limiar, para extrair as suas características.

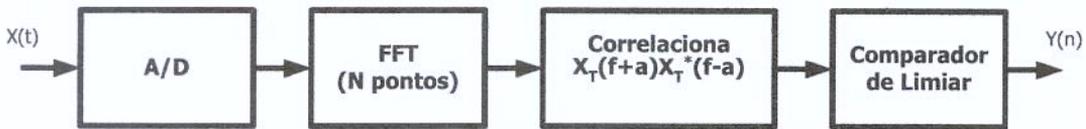


Figura 52 - Detector de Sinais Ciclo Estacionários.

A saída do detector de sinais ciclo estacionários,  $Y(n)$ , é um vetor com as estatísticas de sinal  $X(t)$ , tais como, número de sinais, tipos de modulação, taxa de símbolos e interferência.

As desvantagens deste método são:

- Tempo de detecção alto;
- Carga computacional.

As vantagens deste método são:

- Resistência à interferência. Identifica a presença de sinais mesmo quando ele é recebido com uma SNR muito baixa, ou mesmo negativa;
- Distingue usuários primários de usuários secundários.

#### 5.2.4 Sensoriamento Cooperativo do Espectro

Sensoriamento cooperativo é o compartilhamento, entre os nós cognitivos da rede, dos valores da amplitude do sinal em uma faixa espectral, supostamente considerada lacuna. A qualidade da detecção de lacunas no espectro está sujeita à degradação devido aos seguintes fatores: desvanecimento por multipercurso; sombreamento; e distorção no ajuste do nível de comparação. Estes fatores levam a uma detecção falsa, ou falsa negativa, que contribuem para a diminuição da qualidade da rede de rádio cognitivo, [6] e [8]. O sensoriamento cooperativo poderá solucionar em parte o problema, reduzindo a interferência nos receptores dos usuários primários.

A decisão de classificar se o espaço espectral está vago ou não é tomada em conjunto. No entanto, o sensoriamento cooperativo gera dois processamentos adicionais:

- Ponderar as medidas recebidas de outros nós da rede, pois a intensidade é função da posição geográfica do nó fornecedor da medida.
- Acrescentar um canal de controle, um canal banda estreita, para troca de informações entre os usuários.

Nesta arquitetura um nó da rede coleta todas as medidas e distribui os canais para os usuários. A sobrecarga associada com este esquema é compensada pela melhora nos resultados de sensoriamento, assim como as variações do canal.

### **5.2.5 Localização Geográfica**

Para as aplicações de redes cognitivas, operando na banda espectral das estações TV, a identificação da localização geográfica aperfeiçoa o sensoriamento do espectro. Para se instalar em uma determinada área, inicialmente o nó cognitivo deverá identificar sua posição geográfica utilizando, por exemplo, o sistema de posicionamento global (GPS). Através de um banco de dados, previamente armazenado, classificam os canais que estão ocupados dentro daquela área licenciada para as estações de TV.

A desvantagem deste método é o custo adicional do GPS e a degradação em operações indoor.

### **5.2.6 Detecção de Lacunas na Banda de TV utilizando Redes Neurais.**

Desenvolvemos outra técnica para identificar as faixas ocupadas por estações de TV, em uma área geográfica qualquer. A ocupação do espectro pelos canais licenciados de TV é bem definida, tanto em frequência quanto em tempo. Por exemplo, a estação de TV que ocupa o canal 2 utiliza a frequência inicial de 54 MHz até 60 MHz, largura de faixa de 6 MHz, por um longo tempo, pois o processo de troca de canal é lento.

O método desenvolvido utiliza rede neural do tipo back-propagation. Através da rede é possível realizar a classificação de lacunas, para uma faixa espectral fixa de 6 MHz. A rede utilizada é uma rede de três camadas tal como mostrada na **Figura 53**.

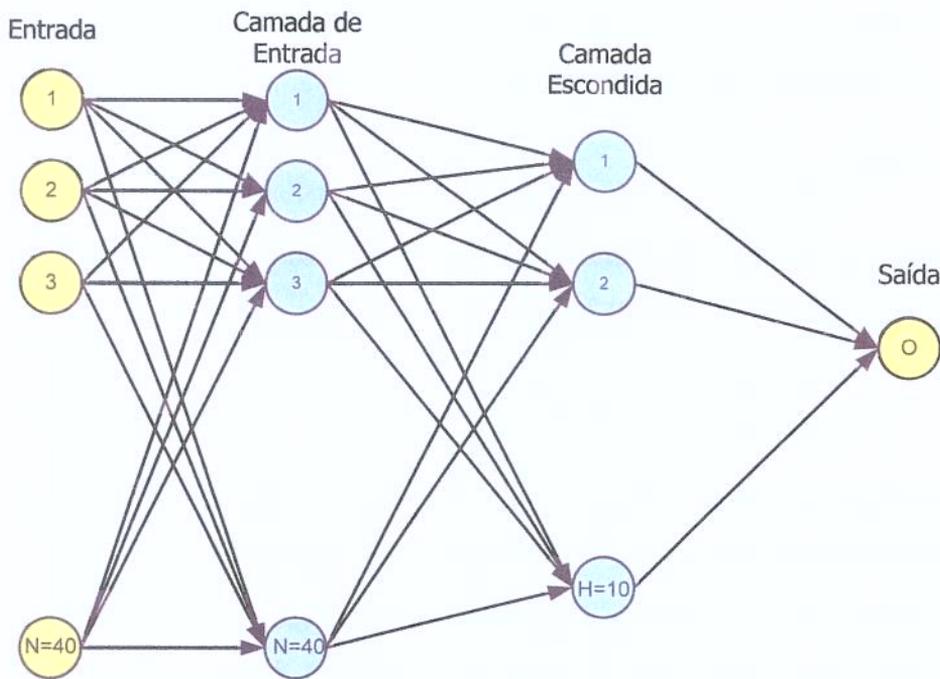


Figura 53 - Arquitetura da Rede Back-propagation

### 5.2.6.1 Neurônio

Para facilitar a descrição do algoritmo implementado, vamos analisar a arquitetura das camadas de neurônios. O neurônio é o processador básico da rede neural. Todo neurônio tem uma saída, que esta relacionada com o estado do neurônio – sua ativação, a saída alimenta diversos outros neurônios. Todo neurônio recebe varias entradas, chamadas de *sinapses*. Estas entradas são ponderadas através de pesos. A ativação do neurônio é calculada aplicando-se a *função limiar*, para a soma de produtos dos sinais de entrada com seus respectivos pesos. Portanto, o sinal na saída de cada neurônio é dado pela equação 18

$$N(n) = \sum_{i=0}^{M-1} w(i) \cdot x(i) + l(N) \quad \text{Equação 18}$$

Onde,  $w(i)$  são os pesos correspondentes a cada entrada dos neurônios,  $x(i)$  são os valores das entradas, tal como a densidade espectral de potência, ou da saída de outro neurônio para as camadas internas e  $l(N)$  é a função de ativação de cada neurônio. A

função de ativação mais comum, implementada no algoritmo de rede neural para o classificador, é a sigmóide, definida pela equação 19.

$$l(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad \text{Equação 19}$$

Para cada camada da rede neural, podemos definir a saída a partir da expressão geral da camada, definida pela equação 20.

$$y(n) = \sum_{n=0}^{N-1} \left[ \sum_{i=0}^{L-1} w_n(i) \cdot x(i) + l(N) \right] \quad \text{Equação 20}$$

Onde, na somatória mais interna temos o processamento de um neurônio individual e na somatória mais externa à representação de todo o processamento da camada.

Na primeira camada ou camada de entrada, onde é aplicada a densidade espectral de potência, escolhemos uma camada de entrada com 40 pontos, de forma que temos uma amostra a cada 150 kHz dentro de um canal de 6 MHz, pois o levantamento foi feito em canais separados de 30 kHz. A segunda camada, ou camada escondida, é utilizada como um redutor de dimensionalidade, no caso faz uma redução de 4:1. Finalmente, a camada de saída com um único neurônio, onde teremos o resultado da classificação: espectro ocupado ou não, por uma estação de TV. A saída da rede neural é o resultado de lacuna ocupada ou não.

O treinamento foi realizado com o banco de dados fornecido pelo Professor Steven W. Elligson do Virginia Tech. Foi isolada a densidade espectral de potência, em faixas de 6 MHz, nas bandas espectrais dos canais ocupados nas medidas citadas em [5], canal 4 e 6 como mostrados **Figura 46**.

Foi desenvolvido um “script” no Matlab, para calcular os coeficientes da rede neural. A rede neural é implementada com equação (18), na linguagem C++ para compor a classe *EvaluateChannel* descrita no item 5.3.2. A rede back-propagation apresentou bom desempenho, para encontrar lacunas em bandas do espectro com ocupação comportada, tais como as lacunas nas bandas de TV.

A vantagem deste método, em relação ao detector de energia, é sua independência em relação ao desvanecimento, pois são utilizados valores normalizados da densidade

espectral de potência. O processo de detecção de faixas espectrais ocupadas por canais de TV normalmente é um processo de ciclo lento, assim o problema da alta taxa de processamento normalmente encontrada na implementação de redes neurais é minimizado.

A vantagem deste método, em relação ao sistema utilizando GPS, é a redução do custo do equipamento, e eliminação da necessidade de atualização do banco de dados de estações de TV.

A desvantagem é, a dependência do conhecimento a priori do tipo de modulação para o treinamento da rede back-propagation.

## **5.3 Implementação do Multiagente Framework para Rádio**

A seguir, são descritos os detalhes da implementação parcial, da plataforma multiagentes para rádio cognitivo, o arranjo de implementação e a descrição do diagrama UML, de um rádio cognitivo nível 2.

### **5.3.1 Descrição da Implementação do Rádio Cognitivo**

Para validação do modelo e estratégia adotada, implementamos o rádio cognitivo utilizando os recursos de hardware e software descritos a seguir.

O hardware utilizado para implementação é um computador do tipo IBM-PC, Pentium4, com um HD de 160 GBytes e memória RAM de 1 GByte.

O software implementado possui quatro camadas como apresentado na Figura 54, descritas a seguir:

1. Na primeira camada, ou camada inferior, está implementado o sistema operacional, utilizamos o sistema operacional LINUX Fedora 4. O ambiente de desenvolvimento é o “gcc+”. A plataforma de software defined radio, OSSIE, foi inicialmente desenvolvida para os sistemas operacionais: LINUX e Windows/XP. No entanto, atualmente, há suporte somente para a plataforma LINUX.

2. Na segunda camada, está implementado o middleware utilizando o CORBA. Há diversos middlewares grátis disponíveis na Internet. Utilizamos o CORBA omniORB versão 4.1 [59]. A plataforma OSSIE, está adaptada para três CORBA's: o omniORB; o CORBA ACE/TAO [60] – também uma plataforma aberta e grátis; e ORB da Primatech [62] – plataforma proprietária e não disponível para uso livre, implementada utilizando processadores digitais de sinais [1] - [4].
3. Na terceira camada está implementado o software defined radio, OSSIE, desenvolvido pelo MPRG do Virginia Tech. A plataforma OSSIE é um software aberto e grátis, escrito em linguagem C++. Utilizamos a versão 1.0.
4. Na quarta camada está implementado o rádio cognitivo, a qual denominaremos MFCR – do inglês, “A Multiagent Framework for Cognitive Radio” e é a primeira versão implementada – MFCR Versão 1.0. E a implementação está baseada no modelo de agentes e frameworks. No apêndice A, está mostrado a implementação do modelo *Agent*, descrito no diagrama UML do item 5.1.3.

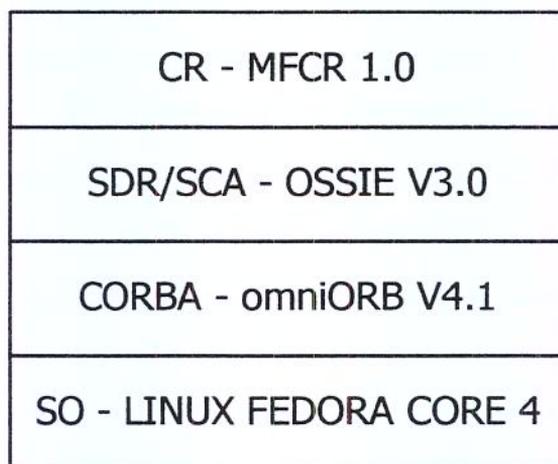


Figura 54 - Modelo em Camadas de Implementação do Rádio Cognitivo.

### 5.3.2 Arranjo para levantamento de dados do espectro de TV.

A **Figura 55**, mostra o arranjo para levantamento de dados do espectro de TV. Este arranjo, disponível no laboratório do MPRG do Virginia Tech, utiliza como plataforma o software defined radio OSSIE.

O arranjo faz as medidas do espectro de TV através de um analisador de espectro conectados ao computador utilizando o padrão GPIB.



Figura 55 - Arranjo para levantamento do espectro de TV, usando o OSSIE.

### 5.3.3 Rádio Cognitivo nível 2

Como proposto, fizemos uma implementação parcial do rádio cognitivo nível 2, para validarmos duas inovações de nosso trabalho.

A primeira, o controle de potencia através de, medida da distancia entre o usuário primário e o usuário secundário, utilizando como referencia o nível  $D_U$ , descrito no item 5.1.3.1. Este programa faz parte da classe *EffectorWaveform*. Esta classe faz a reprogramação da forma de onda a ser utilizada pelo usuário secundário, através da classe *Effector*. A classe *Effector*, controlada pela classe *Agent*, faz a reprogramação da forma de onda utilizando o software defined radio.

A segunda, a procura de lacuna no espectro de TV, utilizando uma rede neural do tipo back-propagation, descrita no item 5.2.6. Este programa faz parte da classe *EvaluateChannel*. É realizada uma medida do nível de energia do espectro, utilizando um detector de energia sub-ótimo, descrito no item 5.2.2. Os dados sensorizados pelo software defined radio são transferidos para a classe *Sensor*. Sob controle da classe *Agent*, os dados são processados pela classe *EvaluateChannel* para classificar o estado do canal: ocupado ou não, pela rede neural.

A seguir, são descritas as classes implementadas no diagrama UML, do rádio cognitivo, mostrado na **Figura 56**. A classe abstrata *Agent*, baseada no padrão *factory*, implementa todos os serviços básicos do rádio cognitivo e instala as classes funcionais *EvaluateChannel* e *EffectorWaveform*:

- Implementa as interfaces com o SDR – OSSIE através das classes *Sensor* e *Effector*;
- A classe *Sensor* coleta informações do ambiente, tal como a densidade espectral de potência;
- A classe *Effector* instala a forma de onda selecionada, pela classe *EffectorWaveform* no SDR;
- A classe *EvaluateChannel* através do algoritmo de redes neurais, procura por canais vagos na banda de TV ; esta classe implementa o algoritmo de rede neural descrito no item 5.2.5, detecção de lacunas na banda de TV utilizando redes neurais;
- A classe *EffectorWaveform* através do algoritmo de controle de potência, mede a distancia do usuário secundário a borda da cobertura da estação de TV, e estabelece a potência máxima que o nó secundário poderá utilizar;
- A classe *Agent* possui uma subclasse denominada *SensorAgent* para controlar o sensor do SDR.

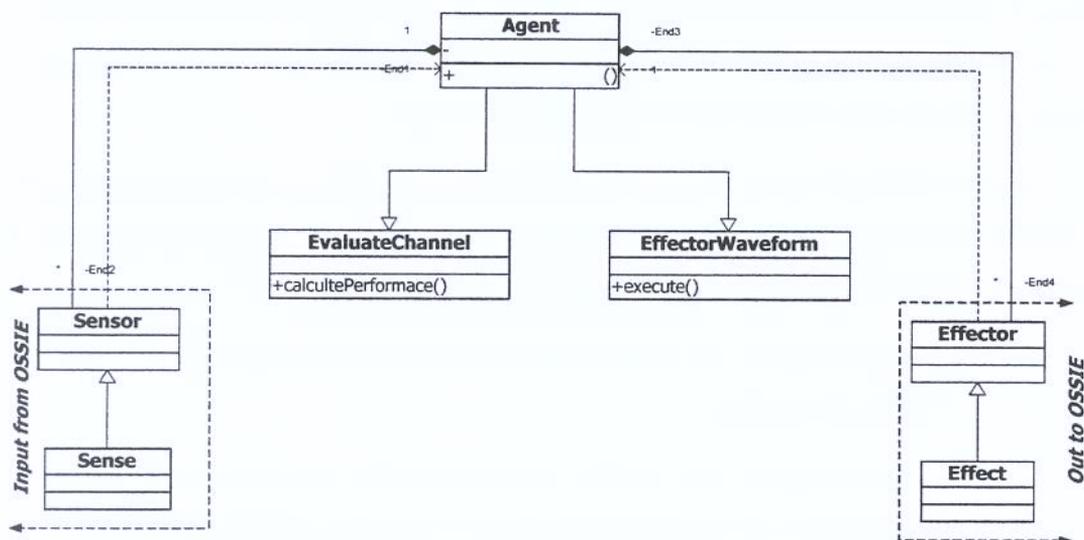


Figura 56 - Diagrama UML para Rádio Cognitivo nível 2.

O apêndice A, mostra a listagem do programa em C++, para a plataforma Windows/XP realizar o controle do SDR a partir do rádio cognitivo.

## 5.4 Conclusões

A rede cognitiva descrita considera o caso de seleção do canal dentro de uma banda do espectro de forma aleatória, outra proposta é a escolha do canal de uma forma coordenada. Estudos mostram uma melhora do desempenho espectral da rede, quando adotada a escolha de canal coordenada [6].

O conceito de temperatura interferente, introduz um novo método de multiplexação, o ITMA. A adoção deste conceito, para a seleção do canal, precisa ser mais explorada, pois o valor de temperatura interferente  $T_I$  será estabelecido por região pelo órgão regulador, no caso o FCC. E a questão é: Como será a manutenção do mesmo?

A faixa espectral em uso pela rede secundária deverá ser monitorada continuamente e caso, a rede primária apareça, a rede secundária deverá ser desfeita

instantaneamente. Surgem duas questões críticas, o tempo de detecção do surgimento da rede primária e o tempo de desocupação pela rede secundária. A redução do tempo de detecção pode ser obtida aumentando o limiar de detecção, rede mais tolerante a falso alarme. O tempo necessário para desocupar a faixa do espectro pode ser reduzido através do sensoriamento cooperativo. Todos os nós cognitivos serão informados instantaneamente sobre a detecção de um usuário primário.

Com o intuito de aumentar o nível de cognição do rádio, sugerimos a escolha de um método de sensoriamento capaz de classificar em quatro os estados do canal, com ênfase a implementação do detector de sinais ciclo estacionários:

1. Canal ocupado por usuário licenciado, e indisponível para uso por um tempo indefinido;
2. Canal ocupado por usuário não licenciado, pertencente à outra rede secundária e indisponível para uso por um tempo indefinido;
3. Canal ocupado por usuário não licenciado, pertencente à mesma rede cognitiva e indisponível temporariamente para uso;
4. Canal desocupado, e com limiar atual abaixo do limiar de referência e disponível para uso.

O modelo de rádio cognitivo nível 2 descrito neste capítulo, foi parcialmente implementado utilizando a arquitetura OSSIE. O estudo de caso apresentado, foi realizado considerando um rádio cognitivo implementado utilizando o hardware do SDR ideal. Ou seja, opera em qualquer banda e em qualquer frequência, com canalização totalmente digital.

## 6 Conclusões Finais

A reformulação do modelo de espectro de alocação, tecnicamente alocado para um novo modelo, já é eminente em alguns países. Nos Estados Unidos existem diversas empresas atuando junto ao FCC para a adoção deste novo modelo, que deve contribuir de forma significativa para abrir espaço no espectro de frequência, assim como a desregulamentação do mercado. Isto não é consenso pois existem também muitos grupos contrários do novo modelo. Não é de meu conhecimento nenhum movimento dentro da ANATEL para estudos deste novo modelo.

Quanto à questão tecnológica para o desenvolvimento de rádios cognitivos estamos em fase inicial, no entanto a adoção do padrão IEEE802.22 deverão aumentar visibilidade desta tecnologia. O desafio tecnológico na área de SDR de obter a implementação do SDR ideal é grande, assim como dos processadores e memórias para implementação desta nova tecnologia.

## 6.1 Sumário dos Resultados

- Análise do modelo de alocação de espectro e comparação com o novo modelo proposto.
- Utilização de uma plataforma de SDR baseada em uma arquitetura de software padronizada – SCA.
- Utilização de ferramentas de software padronizadas.
- Desenvolvida uma nova plataforma de software baseadas nos conceitos de: classes; design patterns; frameworks; e componentes.

## 6.2 Sumário de Contribuições

- Análise, estudo e implementação parcial de um rádio cognitivo para uso não licenciado na banda de TV.
- Análise, estudo e implementação dos algoritmos para implementar o modelo de temperatura interferente para determinar canais vagos no espectro.
- Análise, estudo e implementação dos algoritmos para implementar o controle de potência do transmissor secundário, com o objetivo de evitar a quebra de serviço do receptor primário.
- Modelo de referência para implantação de rádio cognitivo “Uma plataforma multiagente para implementação de rádios cognitivos” ou “A Multiagent Platform for Cognitive Rádios”.
- Análise, estudo e implementação dos algoritmos para determinar posição geográfica utilizando redes neurais para as aplicações como usuário não licenciado no espectro licenciado para TV’s.

## 6.3 Questões em aberto da tecnologia.

### **Classificação dos níveis de cognição.**

A classificação dos níveis de cognição para o rádio cognitivo é assunto controverso. Neste trabalho fizemos uma proposta de classificação através de níveis de cognição, considerando a demanda de recurso computacional necessária pelo agente.

### **Como renumerar os usuários primários.**

Há diversos estudos mostrando que, o espectro está mal utilizado em determinadas áreas geográficas por certos períodos de tempo. A baixa utilização e o crescimento da demanda sugerem a criação do conceito de usuário secundário, permitindo que partes não utilizadas do espectro tornem-se temporariamente disponíveis em certas horas para propósitos comerciais. A criação da figura do usuário secundário é uma idéia bastante interessante que poderá sanar a demanda do espectro. No entanto não há vantagens para as operadoras de telecomunicações já instaladas.

### **Questões de ordem políticas e econômicas**

1. Quais são as condições para o usuário primário compartilhar o espectro?
2. Quais são as condições para o usuário secundário existir?
3. Como o usuário primário e o secundário encontrarão um ao outro?
4. O que tem para ser negociado, e como?

### **Vantagens da adoção da tecnologia de rádio cognitivo**

1. Os rádios cognitivos podem ser ferramentas eficientes para eliminar e resolver o problema geral das questões de acesso, em partes do espectro.
2. Aumentar a utilização do espectro atual, isto é, preencher partes do espectro não utilizado, ao lado do espectro ocupado.
3. Aumentar o desempenho das redes de dados sem fio através do aumento da taxa de dados e qualidade do sistema
4. Maior adaptabilidade e menos coordenação necessária entre redes sem fio.

## 6.4 Proposta de Trabalhos Futuros

O assunto SDR, rádio cognitivo e SDR mais rádio cognitivo combinados, oferecem grandes desafios para os próximos anos. Eles devem auxiliar a implementação de novos sistemas de telecomunicações.

1. Estudo do impacto econômico da adoção desta nova tecnologia, tendo em vista as seguintes vantagens:
  - a. Redução do custo dos equipamentos.
  - b. Maior disponibilidade de serviços.
2. Avançar na implementação do grau de cognição.
3. Desenvolvimento de novos algoritmos para implementações das facilidades básicas dos rádios cognitivos:
  - a. Determinação de buracos no espectro.
  - b. Classificação da estrutura do canal.
4. Estudar o crescimento dos efeitos de interferentes causados pelo uso mais efetivo do espaço espectral do rádio nas três dimensões básicas:
  - a. Interferência co-canal na dimensão de espaço geográfico.
  - b. Interferência intersimbólica causado pela propagação multipercurso na dimensão de tempo.
  - c. Interferência de canal adjacente causada na dimensão de frequência.
5. Estudar o efeito das perturbações do ambiente na estabilidade do rádio. Diferentes perturbações requerem diferentes reações ou compensações. Isto significa que grandes variações de potenciais perturbações irão requerer uma grande variedade de compensações que o sistema deverá ser capaz de executar.

## 6.5 Artigos publicados com esta tese.

1. Aguayo, C., Reed, J. H. and Portelinha, F. M. “Design and Implementation of an SCA Core Framework for a DSP Platform” *Software Defined Radio Technical Conference and Product Exposition*, November 13-16, 2006 - Orlando, Florida.
2. Aguayo, C., Portelinha, F. M. and Reed, J. H. “Part 1: Design and implementation of an SCA Core Framework for a DSP Platform”, *Military Embedded Systems*, March/April 2007.
3. Aguayo, C., Portelinha, F. M. and Reed, J. H., “Part 2: Design and implementation of an SCA Core Framework for a DSP Platform”, *Military Embedded Systems*, to be published.
4. Aguayo, C., Portelinha, F. M. and Reed, J. H., “Implementation of an SCA Core Framework on a TI C6416 Platform”, *TI Developer Conference*, February 28 - March 2, 2006 – Dallas, Texas.

# 7 Apêndice A

A rotina descrita a seguir refere-se ao controle de instalação de forma de onda no SDR. Esta rotina é o programa principal do rádio cognitivo, plataforma OSSIE-CR/SDR.

A listagem abaixo mostra a implementação da classe *agentEffector* para controlar o SDR a partir do rádio cognitivo.

```

/*****
Copyright 2005, Virginia Polytechnic Institute and State University

This file is part of OSSIE Sample Waveform for Radio Cognitive control

OSSIE Sample Waveform is free software; you can redistribute it and/or modify
it under the terms of the GNU General Public License as published by
the Free Software Foundation; either version 2 of the License, or
(at your option) any later version.

OSSIE Sample Waveform is distributed in the hope that it will be useful,
but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of
MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the
GNU General Public License for more details.

You should have received a copy of the GNU General Public License
along with OSSIE Sample Waveform; if not, write to the Free Software
Foundation, Inc., 59 Temple Place, Suite 330, Boston, MA 02111-1307 USA

agentEffect.cpp

written by: Francisco M. P. and M. Robert

This is the main file for the testing interface used for some of the basic functionality
of OSSIE.

This program creates a Domain Manager, and a (custom) Resource Factory. The DM
automatically mounts and inspects
the children directories for waveforms. Whatever waveforms exist are then listed and
the user is given the option
to install, uninstall, run, or stop the given waveform.

Note: before program execution, naming_service with multicast must be running

7/16/05

*****/

#include <ace/Iostream.h>
#include <fstream>
#include <process.h>

#include "Open_DM.h"
#include "orb_wrap.h"
#include "ResourceFactory_i.h"
#include "DeviceManager_impl.h"

int main( int argc, char** argv )
{
    std::ifstream NBCFile ("NodebooterConfigurationFile.txt");

```

```

char ORBIPandPort[255];
char ORBFlagForIPandPort[255];
NBCFile >> ORBFlagForIPandPort >> ORBIPandPort;

int _argc=2;
char ** _argv=new char*[2];
_argv[0]=ORBFlagForIPandPort;
_argv[1]=ORBIPandPort;
NBCFile.close();

// initialize ORB (note that this will be done by several objects)
// multiple inits are done by different objects to provide a reference point
// note: given that we're using a static ORB, all references point to the same ORB
ORB_WRAP::orb = CORBA::ORB_init( _argc, _argv );
{
// instantiate an ORB. Given the nature of the interface (which needs access to app
factory lists and the file
// manager), a new class had to be derived from the parent DM class to allow this
additional functionality.
// Given the local nature of the calls needed on the DM from the interface, no
additional IDL was necessary
Open_DM myDomainManager( _argc, _argv);
cout << "Domain Manager successfully instantiated" << endl;

// instantiate the Device Manager. The parameter for the constructor is the respective
//Device Configuration Descriptor (DCD) which contains all the Devices that will be
//under this Device Manager's control. Although, we tried to leave the implementation
//of the DeviceManager class in the CF as general as possible, the implementation of
//Device manager is platform/application/implementation dependant
DeviceManager_impl myDeviceManager("/DeviceManager_DCD.xml");
cout << "Device Manager successfully instantiated" << endl;

// instantiate the Resource Factory. This class had to be described for this particular
system because hard-coded
// filenames and object names were used. This information would generally be
available in an XML file, but for the
// sake of clarity, it was kept hard-coded for this example implementation
ResourceFactory_i myResourceFactory("/DomainName1/ResourceFactory1");
cout << "Resource Factory successfully instantiated" << endl;

// housekeeping stuff
int exit_value=0;
int application_installed=0;
int running_application=0;
int menu_viewed=0;
int maximum_number_applications=0;
cout << endl;

// access to the file manager is needed to figure out what applications are
available
CF::FileManager* _DM_fm=myDomainManager.getFileMgr();
// get a list of all SADs in the system
CF::FileSystem::FileInformationSequence* _fileSeq = _DM_fm->list("_SAD.xml");

// create handle to application
CF::Application_ptr _app = CF::Application::_nil(); // interface control
loop
while( !exit_value )
{
needed if (!menu_viewed) // menu is re-drawn only when a new one is
{
if (!application_installed)
{ // list all the available SADs
CF::FileSystem::FileInformationType* _fit = _fileSeq->get_buffer();
char name_SAD[255];
maximum_number_applications=_fileSeq->length();
cout << "\nApplication list:\n";
for(unsigned int i = 0; i < _fileSeq->length(); i++ )
{
strcpy(name_SAD, _fit->name);
}
}
}
}
}

```

```

        cout << " " << i+1 << ": " << name_SAD << endl;
        _fit++;
    }

    cout << "\n\n - install application number n\n";
    cout << "x - exit\n";
}
else if ((application_installed==1)&&(running_application==0))
{
    cout << "s - start application\n";
    cout << "u - uninstall application\n";
}
else if (running_application==1)
{
    cout << "t - stop application\n";
}
menu_viewed=1;
cout << "selection:"<<flush;
}
// Keyboard input
if (cin.peek() != EOF)
{
    char ch_hit = cin.get();

    if (!application_installed)
    {
        if ((ch_hit>=49)&&(ch_hit<=49+maximum_number_applications-1))
        {
            // 49 is the ASCII value for '1'. This would set the
            int application_selection=ch_hit-49;
// selection application to the appropriate index

// find the application associated with requested SAD
CF::FileSystem::FileInformationType* _fit = _fileSeq-
>get_buffer();

        char name_SAD[255];
        maximum_number_applications= _fileSeq->length();
        for( int i = 0; i < application_selection; i++ )
            _fit++;
        strcpy(name_SAD, _fit->name);

// install application in DM
myDomainManager.installApplication( name_SAD );
cout << name_SAD << " successfully installed onto Domain
Manager\n";

// dummy variables
CF::Properties _appFacProps(0);

//Specify what component should be deployed on particular devices
CF::DeviceAssignmentSequence _devSeq(10);
_devSeq.length(7);
_devSeq[0].componentId =
CORBA::string_dup("AssemblyControllerBasic_01");
_devSeq[0].assignedDeviceId =
CORBA::string_dup("GenericBox_dev");
_devSeq[1].componentId =
CORBA::string_dup("CollectDataBasic_01");
_devSeq[1].assignedDeviceId =
CORBA::string_dup("GenericBox_dev");
_devSeq[2].componentId =
CORBA::string_dup("ProcessDataBasic_01");
_devSeq[2].assignedDeviceId =
CORBA::string_dup("GenericBox_dev");
_devSeq[3].componentId =
CORBA::string_dup("ossieAssemblyController");
_devSeq[3].assignedDeviceId =
CORBA::string_dup("GenericBox_dev");
_devSeq[4].componentId =
CORBA::string_dup("ossieModBPSKResource");
_devSeq[4].assignedDeviceId =
CORBA::string_dup("GenericBox_dev");

```

```

        _devSeq[5].componentId =
CORBA::string_dup("ossieChannelResource");
        _devSeq[5].assignedDeviceId =
CORBA::string_dup("GenericBox_dev");
        _devSeq[6].componentId =
CORBA::string_dup("ossieDemodResource");
        _devSeq[6].assignedDeviceId =
CORBA::string_dup("GenericBox_dev");

//    local variable for list of Application Factories returned by DM
        CF::DomainManager::ApplicationFactorySequence
_applicationFactories;

//    get the list of available Application Factories from DM
        _applicationFactories=myDomainManager.getAppFacSeq();

//    create Application from Application Factory

        cout<<_applicationFactories[0]->name() <<endl;
        try
        {
            _app = _applicationFactories[0]->create(
_applicationFactories[0]->name(), _appFacProps, _devSeq );
        }
        catch( CF::ApplicationFactory::CreateApplicationError& )
        {
// Even though the exception is caught, it does not mean that it is thrown
// print error msg here
// also, go to ApplicationFactory::verifyDeviceAssignments
// and make sure the exceptions params are set before thrown
        }

        cout << "Application created. Ready to run or uninstall\n";
        application_installed=1;
        menu_viewed=0;
    } // exit
    else if (ch_hit=='x')
    {
        exit_value=1;
        menu_viewed=0;
    }
    else if (ch_hit==10)
    {
    }
    else
    {
        cout << "selection:";
    }
}
else if ((application_installed==1)&&(running_application==0))
{
    if (ch_hit=='s') // start application
    {
        _app->start();
        cout << "Application started\n";
        running_application=1;
        menu_viewed=0;
    } // uninstall application
    else if (ch_hit=='u')
    {
//    uninstall Application from DM
        try
        {
            myDomainManager.uninstallApplication( _app->identifier() );
        }
        catch( CORBA::Exception& )
        {
// here would go code that handles the exception
        }
        cout << "Application uninstalled from Domain Manager" << endl;
    }
}

```

```

//      destroy all components associated with Application
        _app->releaseObject();
        _app=CF::Application::_nil();
        cout << "Application destroyed\n";

        application_installed=0;
        menu_viewed=0;
    }
    else if (ch_hit==10)
    {
    }
    else
    {
        cout << "selection:";
    }
}
else if (running_application==1)
{
    if (ch_hit=='t')                //      stop application
    {
        _app->stop();
        cout << "Application stopped\n";
        running_application=0;
        menu_viewed=0;
    }
    else if (ch_hit==10)
    {
    }
    else
    {
        cout << "selection:";
    }
}
}
}
//      service CORBA requests or timeout after 1 second if none are received
    ACE_Time_Value kb_poll_time=1;
    ORB_WRAP::orb->perform_work(kb_poll_time);
}

    cout << endl;
    cout << "End of test interface!" << endl;;

    myDeviceManager.shutdown();
    myResourceFactory.shutdown();
}

if (!CORBA::is_nil(ORB_WRAP::orb))
    ORB_WRAP::orb->shutdown(1);

delete _argv;

return 0;
};

```

# 8 Apêndice B – Futuro do Rádio

## Cognitivo

Apresentação do Dr. Reed em workshop sobre “Software Defined Cognitive Radio”, July 25, 2005	
<b>Segurança Pública</b> Interoperabilidade dos Serviços	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interoperabilidade entre serviços públicos: defesa civil, corpo de bombeiros, policia civil e policia militar, exército.</li> <li>• Interoperabilidade entre jurisdições com dispositivos operando em frequências e formatos de modulação diferentes.</li> </ul>
<b>IEEE 802.22 – WRAN</b> Wireless Regional Area Network	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utiliza os canais de TV não utilizados.</li> <li>• Interface área interoperavel com espectro alocado para serviço de TV.</li> <li>• Permite interface de WRANS ponto a ponto para multiponto. Suporta diversos serviços:Dados, voz e vídeo; e residencial e empresas pequenas e médias - Small Office/Home Office (SOHO) locations.</li> </ul>
<b>IEEE 802.11h – WLAN</b> Wireless Local Area Network	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Implementa dois métodos para compartilhamento do espectro:               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Seleção Dinâmica de Frequência (DFS);</li> <li>○ Controle de Potência de Transmissão (TPC).</li> </ul> </li> <li>• DFS é usado para selecionar o espectro apropriado para WLAN.</li> <li>• TPC é usada para controlar a rede WLAN e estações para reduzir a interferência, controle de faixa (estabelecendo os limites da WLAN) e reduzir consumo de potência (útil para laptop).</li> </ul>
<b>IEEE 802.15.3a WPAN</b> Wireless Personal Área Network	<ul style="list-style-type: none"> <li>• OFDM multifaixas; USB 2.0 wireless (480 Mbps) até 5 metros.</li> <li>• Aplicação compatível com regulação UWB.</li> <li>• Configura o espectro rapidamente utilizando OFDM com largura de faixa até 528 MHz.</li> <li>• Suporta QoS controlando o número de subportadoras.</li> </ul>
<b>P1900.X : IEEE Standard Series on Next Generation Rádio and Spectrum Management</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• P1900.1: Termos padrões, definições e conceitos para administração do espectro, SDR, rádios adaptativos.</li> <li>• P1900.2: Prática recomendada para interferência e análise de coexistência;</li> <li>• P1900.3: Prática recomenda para avaliação da conformidade dos módulos de SDR.</li> </ul>

## 9 Referências Bibliográficas

1. Aguayo, C., Reed, J. H. and Portelinha, F. M. "Design and Implementation of an SCA Core Framework for a DSP Platform" *Software Defined Radio Technical Conference and Product Exposition*, November 13-16, 2006 - Orlando, Florida.
2. Aguayo, C., Portelinha, F. M. and Reed, J. H. "Part 1: Design and implementation of an SCA Core Framework for a DSP Platform", *Military Embedded Systems*, March/April 2007.
3. Aguayo, C., Portelinha, F. M. and Reed, J. H., "Part 2: Design and implementation of an SCA Core Framework for a DSP Platform", *Military Embedded Systems*, to be published.
4. Aguayo, C., Portelinha, F. M. and Reed, J. H., "Implementation of an SCA Core Framework on a TI C6416 Platform", *TI Developer Conference*, February 28 - March 2, 2006 – Dallas, Texas.
5. Bogner, M. Maletic, J. and Franklin, S. "ConAg: A Reusable Framework for Developing "Conscious" Software Agent".  
<http://ccrg.cs.memphis.edu/papers.html>
6. Brodersen, R.W. Wolisz, A. Cabric, D. Mishra, S.M. and Willkomm, D. "CORVUS- A cognitive Radio Approach for Usage of Virtual Unlicensed Spectrum", disponível on-line <http://www.bwrc.eecs.berkeley.edu/MCMA>.
7. Burns, P. "SDR for 3G", Artech House, 2003.
8. Cabric, D. Mishra, S. M. Brodersen, R. W. "Implementation Issues in Spectrum Sensing for Cognitive Radios", *Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, 2004, Pages(2): 772-776, Vol. 1. Chou, C.T. Kim, Hyoil, Shin, K. G. and Shankar, S. N. "What and How Much to Gain by Spectral Agility?", *a ser publicado* IEEE Journal on Selected Areas in Communications (IEEE JSAC).

9. Clancy III, C. T. and Arbaugh, A. W. “*Stochastic Analysis of the Interference Temperature Model*”, University of Maryland, College Park, January 2006.
10. Clancy III, C. T. and Arbaugh A., William, “*Interference Temperature Multiple Access: A New Paradigm for Cognitive Radio Networks*”, University of Maryland, College Park, January 2006.
11. Clancy III, T. C. “*Dynamic Spectrum Access in Cognitive Radio Networks*”, Ph.D. Dissertation, University of Maryland, 2006.
12. Cordeiro, C. Challapali, K. and Birru, D. “IEEE802.22: An Introduction to the First Wireless Standard based on Cognitive Radios”, *Academy Publisher, Journal of Communications*, Vol.1, No.1, April 2006.
13. Ellingson, S.W. “Spectral Occupancy at VHF: Implications for Frequency-Agile Cognitive Radios”, *IEEE Vehicular Technology Conf. 2005 Fall - Dallas*, Vol. 2, pp. 1379-82, September 2005
14. Davidson, P. “Concept Acquisition by Autonomous Agents: Cognitive Modeling versus the Engineering Approach”, *Lund University Cognitive Studies 12*, ISSN 1101-8453, Lund University, Suécia, 1992.
15. FCC 04-113, “*Unlicensed Operations in the TV Broadcast Bands*”, Federal Communications Commission, Washington, D.C. May 25, 2004.
16. FCC 03-289, “*Establishment of an Interference Temperature Metric to Quantify and Manage Interference to Expand Available Unlicensed Operation in Certain Fixed, Mobile and Satellite Frequency Bands*”, Federal Communications Commission, Washington, D.C. November 28, 2003.
17. Franklin, S. “Autonomous Agents as Embodied AI”, *Cybernetics and Systems*, 28:6(1997) 499-520.
18. Gamma, E. Helm, R. Johnson, R. and Vlissides J. “*Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software*”. Addison-Wesley. 1994.
19. Gardner, W. A. “*Introduction to Random Processes: With Applications to Signals & Systems*”, McGraw-Hill Publishing Company, New York, 1990.

20. Geier, J. “*Wireless LANs*”. Chapter 3 – Overview of the IEEE 802.11 Standard. SAMS 2002.
21. Goldsmith, A. “Performance of Cognitive Radio: Myths and Realities” *BWRC Cognitive Radio Workshop*, November 1, 2004.
22. Gupta, P. and Kumar, P.R. “The capacity of wireless network” *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 46, N.2 pgs. 388-404, 2000.
23. Hayken, S. “Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 23, No. 2, February 2005.
24. Hippenstiel, R. D. “*Detection Theory: Applications and Digital Signal Processing*”, CRC Press, Boca Raton, 2002
25. Iversen, A. Tayloe, N. K. Brown, E. K. and Karstad, J. “Hybrid Neural Network Classifying Recognizable and Detecting Unrecognizable Radio Signals”, *Proceedings of the 23<sup>rd</sup> IASTED International Multi-Conference*, Feb. 14-16, Innsbruck, Austria
26. Lehr, W. “*Economic Case for Dedicated Unlicensed Spectrum below 3 GHz*”, Massachusetts Institute of Technology. May 17, 2004.
27. Liu X. and Shankar, S. N. “Sensing-based Opportunistic Channel Access”, *ACM Journal on Mobile Networks and Applications (MONET)*, Volume 11, Number 1, February 2006, p. 577-591.
28. Liu, X. and Wang, W. “On the Characteristics of Spectrum-Agile Communication Networks”, *IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks – DySPAN 2005*, Baltimore (MD), November 2005.
29. Marcus, M. J. “Unlicensed Cognitive Sharing of TV Spectrum: The Controversy at the Federal Communications Commission”, *IEEE Communications Magazine*, May 2005, pgs. 24-25.
30. Menon, R. Bueher, R. M. and Reed, Jeffrey, R. H. “Outage Probability based Analysis of Spectrum Sharing Techniques”, *MPRG, January*, 2006.

31. Mishra, S. M. Cabric, D. Chang, C. Willkomm, D. Van Schewick, B. Wolisz, A. and Brodersen, R. W. "A Real Time Cognitive Radio Tested for Physical and Link Layer Experiments", *IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks – DySPAN 2005*, Baltimore (MD), November 2005.
32. Mitola III, J. "Cognitive Radio for Flexible Mobile Multimedia Communications", *IEEE Personal Communications*, 1999.
33. Mitola III, J. "*Software Radio Architecture: Object-Oriented Approaches to Wireless Systems Engineering*", John Wiley & Sons, 2000.
34. Mitola III, J. "Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for SDR", Dissertation Doctor of Technology, Royal Institute do Technology (KTH), Sweden, May, 2000.
35. Mitola III, J. and Maguire Jr., G. Q. "Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal", *IEEE Personal Communications*, 1999.
36. Neel, J. O. Reed, J. H. and Gilles, R. P. "Convergence of Cognitive Radio Networks", *WCNC 2004*, IEEE Communication Society.
37. OSSIE: <http://ossie.mprg.org>
38. Pawelczak, P. Janssen, G. J. M. and Prasad, R. V. "Performance Measures of Dynamic Spectrum Access Networks", [IEEE GLOBECOM 2006](#), Nov. 2006.
39. Reed, J. H. "*Software Radio: A Modern Approach to Radio Engineering*", Prentice Hall PTR, 2002.
40. Reed, J. H. "*Some SDR Research at Virginia Tech*", MPRG Internal Report, Bradley Dept. of Electrical and Computer Engineering, Virginia Polytechnic & State University, June 22nd 2004.
41. Reed, J. H. "*Emerging Wireless Technology*", MPRG Internal Report, Bradley Dept. of Electrical and Computer Engineering, Virginia Polytechnic & State University, 2005.

42. *Remarks of Lauren Maxim Van Wazer*, Special Council, Office of Engineering and Technology, Federal Communications Commission, May 19, 2003 OET Cognitive Radio Workshop.
43. Rondeau, T. W. Le, B. Rieser, C. J. and Bostian, C.W. “Cognitive Radios with Genetic Algorithms: Intelligent Control of SDRs”, *IEEE MTT-S Digest*, 2004.
44. Robert, M. J. “Principles of Flexible-Use Spectrum Rights”, *Journal of Communications and Networks*, Vol. 8, No. 2, June 2006.
45. Russell, S. J. and Norvig, P. “*Artificial Intelligence: A Modern Approach*” (2nd Edition). Prentice-Hall, 2002.
46. Sahai, A. Hoven, N. and Tandra, R. “Some Fundamentals Limits on Cognitive Radio”, *Allerton Conf. Communication, Control, and Computing*, October 2004.
47. Sardinha, J.A.R.P Ribeiro, P.C. Lucena, C.J.P Milidu, R.L. “An Object-Oriented Framework for Building Software Agents”, *Journal of Object Technology*, pgs. 85-97, Vol. 2, No. 1, January – February 2003a.
48. SCA:[http://jtrs.army.mil/sections/technicalinformation/fset\\_technical.html?technical\\_SCA-especification-requirements](http://jtrs.army.mil/sections/technicalinformation/fset_technical.html?technical_SCA-especification-requirements).
49. SDR Forum: [www.sdr.org](http://www.sdr.org)
50. Stone, P. and Veloso, M. “MultiAgent Systems: A Survey from a Machine Learning Perspective”. *CMU-CS-97-193*, USA 1997.
51. Seok, H. H. and Reed, J. H. “*Multiple-Taper Spatiotemporal Spectrum Detection with Singular Value Decomposition Using Smart Antenna (MTM-SVD-AS) for Cognitive Radio System*”, Internal Report, Blacksburg VA, December 2005.
52. Tandra, R. and Sahai, Anent. “Fundamental limits on Detection in Low SNR under noise uncertainty”, *Proc. of the first international workshop on Technology and Policy for Accessing Spectrum*, Boston, Massachusetts, 2006.
53. Tonmukayakul, A. and Weiss, Martin B.H. “Secondary Use of Radio Spectrum: A Feasibility Analysis”, *Telecommunications Policy Research Conference – TPRC 2004*.

54. Werbach, K. "Radio Revolution: The Coming Age of Unlicensed Wireless", *New America Foundation*, Washington, DC. October, 2002.
55. Wood, A. "Towards a Medium for Agent-Based Interaction". *School of Computer Science*, the University of Birmingham, 1994.
56. Wooldridge, M. and Jennings, N.R. "Intelligent Agents: Theory and Practice". *The Knowledge Engineering Review*, vol. 10, n. 2, 1995.
57. WWRF-WG6 White Paper "Cognitive Radio, Spectrum and Radio Resource Management", *Wireless World Research Forum*, 2004. <http://www.wireless-world-research.org>.
58. WWW CORBA, <http://www.cs.wustl.edu/~schmidt/TAO.html>
59. WWW CORBA, <http://omninoify.sourceforge.net/index.html>