



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ANDSON MARREIROS BALIEIRO

**HANDOFF DE ESPECTRO EM REDES BASEADAS EM RÁDIO COGNITIVO
UTILIZANDO REDES NEURASIS ARTIFICIAIS.**

DM 06/2011

**BELÉM
2011**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRICA**

ANDSON MARREIROS BALIEIRO

**HANDOFF DE ESPECTRO EM REDES BASEADAS EM RÁDIO COGNITIVO
UTILIZANDO REDES NEURAS ARTIFICIAIS.**

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Pará, orientado pelo Prof. Dr. Carlos Tavares da Costa Junior.

**BELÉM
2011**

B186h

Balieiro, Andson Marreiros

Handoff de espectro em redes baseadas em rádio cognitivo utilizando redes neurais artificiais / Andson Marreiros Balieiro; orientador, Carlos Tavares da Costa Júnior.-2011.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2011.

1. Redes de radio cognitivo. 2. Sistemas de comunicação sem fio 3. Redes neurais (computação). I. Orientador. II. Título.

CDD 22. ed. 621.384

**HANDOFF DE ESPECTRO EM REDES BASEADAS EM RÁDIO COGNITIVO
UTILIZANDO REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS.**

Esta Dissertação foi julgada em 03/02/2011 adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, aprovada em sua forma final pela banca examinadora.

Carlos Tavares da Costa Jr

Prof. Dr. Carlos Tavares da Costa Junior (Orientador)
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Pará

Eduardo Coelho Cerqueira

Prof. Dr. Eduardo Cerqueira (Membro)
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Pará

Mauro Margalho Coutinho

Prof. Dr. Mauro Margalho Coutinho (Membro)
Universidade da Amazônia (UNAMA)

Visto:

Prof. Dr. Marcus Vinicius Nunes
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Pará

**BELÉM
2011**

À minha mãe, Olinda Balieiro,
às minhas irmãs e sobrinhos.
Pelo amor e incentivos ao meu estudo.

Agradecimentos

Primeiramente, a Deus, por sempre estar presente em todos os momentos, dando-me forças para superar os desafios. À minha mãe, Olinda Balieiro, fonte de incentivo dos meus estudos e de minha vida e para qual dedico todo o meu sucesso. Aos meus sobrinhos Henrique Balieiro, Nicolay Balieiro, Gabriella Marreiros e Nilson Balieiro, verdadeiras inspirações deste trabalho. Às minhas irmãs, Liliane Balieiro, Viviane Balieiro e Jacqueline Balieiro, e a toda a minha família, pelo suporte e compreensão.

Ao Professor Kelvin Lopes Dias, pela orientação, apoio, oportunidades e acreditar no desenvolvimento do trabalho, o qual não pode participar da minha defesa por ter assumido cargo de professor na Universidade Federal de Pernambuco e, dessa forma, impossibilitado de continuar como membro e orientador do PPGEE-UFPA.

Ao Professor Carlos Tavares da Costa Junior, por ter aceito participar como orientador formal junto ao PPGEE-UFPA.

Aos amigos do Ubiquitous Computing and Networks Laboratory (UCNL): Diego Passos, Peterson Yoshioka, Edbruno Prestes, Tássio Carvalho, José Jailton, Warley Murici e Márcio Matos pela amizade e momentos de descontração, necessários no desenvolvimento do trabalho.

Ao amigo Elton Rafael pelo auxílio no desenvolvimento do trabalho.

As amigas Jucilene Mamede e Nádia Ferreira, pela amizade constante

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

“E ainda se vier noites traiçoeiras,
Se a cruz pesada for, Cristo estará contigo.
O mundo pode até fazer você chorar,
“Mas Deus te quer sorrindo”.
Carlos Papae.

Resumo

Hoje, o espectro de rádio é um dos mais importantes recursos naturais no mundo. Segundo relatórios da FCC (do inglês, *Federal Communications Commission*), as bandas licenciadas, apesar de abundantes, são pobremente utilizadas. A tecnologia de rádio cognitivo visa melhorar a eficiência espectral através do acesso oportunista ao espectro. Permite que novas aplicações baseadas em comunicação sem fio sejam suportadas, sem interferir na comunicação licenciada e buscando garantir a qualidade de serviço das aplicações que a utilizam. Neste âmbito, o *handoff* de espectro é um dos requisitos essenciais e críticos na adoção desta tecnologia. Este trabalho realiza uma discussão da tecnologia de rádio cognitivo, propõe e avalia uma estratégia proativa para *handoff* de espectro em redes baseadas em rádio cognitivo utilizando Redes Neurais Artificiais. O desempenho da proposta em termos de nível de interferência ao usuário primário, número de *handoffs* de espectro realizado pelo usuário secundário e utilização espectral, é comparado com o obtido por um esquema reativo. Diferentemente de outras propostas que se baseiam em modelos estocásticos pré-definidos, utilizaram-se medidas reais de sensoriamento disponibilizados pelo IEEE Dyspan 2008 para avaliar a proposta. Resultados numéricos mostram a superioridade do esquema proposto.

Palavras-chave: Estratégia proativa. *Handoff* de Espectro. Rádio Cognitivo. Redes Neurais Artificiais.

Abstract

Nowadays, the radio spectrum is one of the most important natural resources in the world. According to the FCC (Federal Communications Commission) report, the licensed bands are abundant but poorly utilized. The Cognitive Radio (CR) technology aims improving the spectral efficiency through the opportunistic access to the electromagnetic spectrum. It enables that new applications based on wireless communications are supported, without causing interference at the licensed communication and trying to ensure the quality of service to the applications. Thus, the efficient spectrum handoff is a critical requirement to be taken into account for the success of CR systems. This work outlines concepts about the cognitive radio technology. It proposes and evaluates a proactive strategy based on Artificial Neural Networks for spectrum handoff in CR networks. The performance of the proposal regarding the inference level to the primary user, spectrum handoff number triggered by secondary user and spectral utilization is compared with that one obtained by a reactive scheme. Differently from previous works, this study considers measured traces made available by IEEE Dyspan 2008 in order to evaluate our proposal. Numerical results show the superiority of the proposed scheme.

Key-words: Proactive Strategy. Spectrum Handoff. Cognitive Radio. Artificial Neural Networks

Lista de Ilustrações

Figura 1 -	Divisão do espectro eletromagnético	17
Figura 2 -	Atribuição de faixas de frequências no Brasil	18
Figura 3 -	Medidas de utilização do espectro em Berkeley	19
Figura 4 -	Relação entre Rádio Cognitivo e SDR	25
Figura 5 -	Conceito de “buracos no espectro”	26
Figura 6 -	Ciclo cognitivo	27
Figura 7 -	Arquitetura transmissor/receptor do rádio cognitivo	30
Figura 8 -	Mecanismo de sensoriamento reativo	33
Figura 9 -	Mecanismo de sensoriamento proativo	34
Figura 10 -	Diagrama de blocos de um típico detector de energia	36
Figura 11 -	Interferência no receptor primário	37
Figura 12 -	Problema do terminal escondido	39
Figura 13 -	Detecção cooperativa centralizada	40
Figura 14 -	Modelo de temperatura de interferência	41
Figura 15 -	Arquitetura de Rede Rádio Cognitivo	50
Figura 16 -	Operação em banda licenciada	53
Figura 17 -	Operação em banda não licenciada	54
Figura 18 -	Esquemático da estratégia proposta	61
Figura 19 -	Avaliação dos casos de teste do canal 1	65
Figura 20 -	Avaliação dos casos de teste do canal 2	66
Figura 21 -	Avaliação dos casos de teste do canal 3	67
Figura 22 -	Avaliação dos casos de teste do canal 4	67
Figura 23 -	Avaliação dos casos de teste do canal 5	68
Figura 24 -	Avaliação dos casos de teste do canal 6	69
Figura 25 -	Avaliação dos casos de teste do canal 7	69
Figura 26 -	Avaliação dos casos de teste do canal 8	70
Figura 27 -	Avaliação dos casos de teste do canal 9	71
Figura 28 -	Avaliação de disponibilidade do canal utilizando fator de segurança	72
Figura 29 -	Comportamento do canal 1	74
Figura 30 -	Comportamento do canal 2	74

Figura 31 - Comportamento do canal 3	75
Figura 32 - Comportamento do canal 4	75
Figura 33 - Comportamento do canal 5	75
Figura 34 - Comportamento do canal 6	76
Figura 35 - Comportamento do canal 7	76
Figura 36 - Comportamento do canal 8	76
Figura 37 - Comportamento do canal 9	77
Figura 38 - Valor Real e Resposta da RNA para o canal 1	79
Figura 39 - Valor Real e Resposta da RNA para o canal 2	80
Figura 40- Valor Real e Resposta da RNA para o canal 3	80
Figura 41 - Valor Real e Resposta da RNA para o canal 4	80
Figura 42 - Valor Real e Resposta da RNA para o canal 5	81
Figura 43 - Valor Real e Resposta da RNA para o canal 6	81
Figura 44 - Valor Real e Resposta da RNA para o canal 7	81
Figura 45 - Valor Real e Resposta da RNA para o canal 8	82
Figura 46 - Valor Real e Resposta da RNA para o canal 9	82
Figura 47 - Influência do fator de segurança na utilização espectral	85
Figura 48 - Influência do fator de segurança no número de <i>handoffs</i> de espectro	87
Figura 49 - Resultados quanto à interferência provocada ao UP	89
Figura 50 - Resultados quanto ao número de <i>handoffs</i> de espectro do US	90

Lista de Tabelas

Tabela 1 -	Valores de IDT de acordo com o tipo de sinal	48
Tabela 2 -	Abordagens para <i>handoff</i> de espectro	59
Tabela 3 -	Parâmetros e seus valores adotados nos testes	64
Tabela 4 -	Topologias das RNAs selecionadas	71
Tabela 5 -	Dados utilizados na avaliação da estratégia	74
Tabela 6 -	Resultados das RNAs	79
Tabela 7 -	Instâncias de simulação	84
Tabela 8 -	Avaliação do fator de segurança quanto à utilização espectral	85
Tabela 9 -	Avaliação do fator de segurança quanto ao número de <i>handoffs</i> de espectro	86
Tabela 10 -	Resultados quanto à utilização espectral	91
Tabela 11 -	Casos de teste do canal 1	98
Tabela 12 -	Casos de teste do canal 2	99
Tabela 13 -	Casos de teste do canal 3	100
Tabela 14 -	Casos de teste do canal 4	101
Tabela 15 -	Casos de teste do canal 5	102
Tabela 16 -	Casos de teste do canal 6	103
Tabela 17 -	Casos de teste do canal 7	104
Tabela 18 -	Casos de teste do canal 8	105
Tabela 19 -	Casos de teste do canal 9	106

Lista de Abreviaturas

Anatel	Agência Nacional de Telecomunicações
A/D	Analógico/Digital
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
EDGE	<i>Enhanced Data rates for GSM Evolution</i>
EUA	Estados Unidos da América
FCC	Federal Communications Commission
FNO	Função de Ativação dos Neurônios Ocultos
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IDT	<i>Incumbent Detection Threshold</i>
ISM	<i>Industrial, Science and Medical</i>
ITU	<i>International Telecommunications Union</i>
MAC	Controle e Acesso ao Meio
MSE	Erro Quadrático Médio
NNO	Número de Neurônios da Camada Oculta
NTIA	<i>National Telecommunications and Information Administration</i>
PDA	Assistente Pessoal Digital
PHY	Física
QoS	Qualidade de Serviço
RC	Rádio Cognitivo
RKRL	<i>Radio Knowledge Representation Language</i>
RNA	Redes Neurais Artificiais
RRC	Redes de Rádios Cognitivos
SDR	<i>Software Defined Radio</i>
SNR	Razão Sinal-Ruído
UP	Usuário Primário
US	Usuário Secundário
WLAN	<i>Wireless Local Area Networks</i>
WMAN	<i>Wireless Metropolitan Area Network</i>
WRAN	<i>Wireless Regional Area Networks</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>

Sumário

1	Introdução	15
1.1	Organização da Dissertação	16
2	Cenário Atual e Motivação	17
3	Rádio Cognitivo	22
3.1	Rádio Definido por <i>Software</i> e Rádio Cognitivo	24
3.2	Ciclo Cognitivo	26
3.3	Arquitetura do Rádio Cognitivo	29
3.4	Sensoriamento de Espectro	30
3.4.1	Sensoriamento na Camada MAC	31
3.4.1.1	Sensoriamento Reativo	32
3.4.1.2	Sensoriamento Proativo	33
3.4.2	Sensoriamento na Camada PHY	34
3.4.2.1	Detecção de Transmissor	34
3.4.2.1.1	Detecção com Filtro Casado	35
3.4.2.1.2	Detecção de Energia	35
3.4.2.1.3	Detecção de Característica	36
3.4.2.2	Detecção Cooperativa	37
3.4.2.3	Modelo Baseado em Interferência	41
3.5	Mobilidade de Espectro	42
3.6	Compartilhamento de Espectro	43
3.7	Aplicações do Rádio Cognitivo	45
3.8	O Padrão IEEE 802.22	46
4	Redes Baseadas em Rádio Cognitivo	49
4.1	Arquitetura de Redes Rádio Cognitivo	50
4.1.1	Rede Primária	51
4.1.2	Rede de Rádios Cognitivos	51
4.1.3	Operação em Banda Licenciada	52
4.1.4	Operação em Banda não Licenciada	53
5	Handoff de Espectro em Redes Baseadas em Rádio Cognitivo	55
5.1	Considerações Gerais	55

5.2 Estratégia Proposta	60
5.2.1 Estrutura das Redes Neurais Artificiais	62
5.2.2 Estrutura de Decisão	72
5.2.3 Dados Utilizados na Avaliação da Estratégia	73
6 Avaliação de Resultados	78
6.1 Avaliação da Estrutura de Previsão	78
6.2 Métricas Analisadas	82
6.3 Cenários de Simulação	83
6.4 Determinação do Fator de Segurança (F)	84
6.5 Avaliação da Estrutura Global	88
7 Considerações Finais	92
7.1 Conclusões	92
7.2 Trabalhos Futuros	93
Referências Bibliográficas	94
Apêndice	98

Capítulo 1

Introdução

Atualmente, tem-se verificado o crescimento no desenvolvimento de aplicações e sistemas baseados em rádio, comunicação sem fio. Para implantação de tais aplicações faz-se necessária a disponibilidade de um recurso natural e escasso: o espectro eletromagnético. O espectro, gerenciado e segmentado pelas agências reguladoras que realizam a concessão de utilização aos usuários primários¹, os quais fornecem diversos serviços como radiodifusão, comunicação móvel, comunicação via satélite, dentre outras, apresenta uma escassez virtual, o que torna difícil o estabelecimento de novos sistemas e serviços de comunicação sem fio. No entanto, estudos têm mostrado que, apesar do espectro já se encontrar alocado e apresentando uma escassez virtual², a sua utilização não está ocorrendo de modo eficiente por parte dos usuários primários, onde se verifica que determinadas faixas do espectro, durante certos instantes de tempo e localizações geográficas, não são utilizadas ou são subutilizadas.

Em vista disso, com o intuito de proporcionar uma melhor eficiência espectral, permitindo que novas aplicações de comunicação sem fio sejam suportadas em um espectro já segmentado, sem interferência às operações licenciadas, surgiu a tecnologia Rádio Cognitivo. Esta tecnologia busca prover aos usuários não licenciados/secundários acesso oportunista³ às faixas licenciadas do espectro, sem interferir na comunicação do usuário primário.

No âmbito de Rádio Cognitivo, a mobilidade de espectro é uma dos requisitos essenciais para a sua adoção, haja vista que o usuário secundário (US), que utiliza tal tecnologia para realizar a sua transmissão, necessita liberar a faixa de espectro licenciada que atualmente ocupa, caso o usuário primário(UP) retorne à sua banda, e então buscar outra faixa disponível para retomar sua comunicação. Esta troca de canais e a busca por faixa do espectro disponível devem ocorrer de forma mais

¹ Usuários primários são aqueles que possuem concessão de utilização das faixas licenciadas do espectro.

² Escassez virtual refere-se à situação de total alocação espectral, mas baixa utilização dele.

³ Acesso oportunista ocorre quando o usuário secundário utiliza a faixa licenciada quando o ela não está sendo utilizada pelo usuário primário, vagando tal faixa quando o usuário primário retorna a ela.

suave e rápida possível, com o intuito de reduzir a degradação na comunicação tanto do usuário primário quanto do secundário e desencadeia um novo tipo de *handoff*, o *handoff* de espectro.

Em vista disto, neste trabalho propõe-se uma estratégia preditiva para *handoff* de espectro em redes baseadas em rádio cognitivo, utilizando redes neurais artificiais. O objetivo é minimizar o número de trocas de canais e a quantidade de interferência causada às operações licenciadas, bem prover uma melhor eficiência espectral, através de uma abordagem proativa. A avaliação do esquema proposto utiliza dados reais de sensoriamento disponibilizados pelo IEEE Dyspam 2008 a fim de mostrar a sua aplicabilidade em sistemas reais baseados na tecnologia de rádio cognitivo.

1.1 Organização da Dissertação

Com vista dos aspectos acima delineados, esta dissertação encontra-se assim organizada.

No Capítulo 2, faz-se uma síntese do cenário atual, no que tange à alocação e utilização do espectro, e aspectos motivacionais a respeito do surgimento e desenvolvimento do Rádio Cognitivo e conseqüentemente da realização deste trabalho.

No Capítulo 3, aborda-se a respeito do Rádio Cognitivo, retratando conceitos, características, funcionalidades, arquitetura, aplicações e padrão desenvolvido.

No Capítulo 4, abordam-se as chamadas Redes Baseadas em Rádio Cognitivo, onde se ilustram a arquitetura, elementos constituintes, funcionalidades requeridas de acordo com a banda de operação de tais redes.

No Capítulo 5, retrata-se sobre *handoff* de espectro em redes de rádios cognitivos e descreve-se a estrutura para *handoff* de espectro proposta, foco principal deste trabalho, ilustrando suas características, métricas analisadas e cenário adotado para estudo.

No Capítulo 6, os resultados da avaliação da estratégia são apresentados e discutidos, em comparação com um esquema reativo de *handoff* de espectro.

Finalmente, no Capítulo 7, realizam-se as considerações finais a respeito deste trabalho.

Capítulo 2

Cenário Atual e Motivação

Atualmente, o espectro eletromagnético segue uma política de alocação estática, onde ele é dividido em faixas de frequências licenciadas, como as faixas destinadas à telefonia celular, por exemplo, e não licenciadas, tais como a *Industrial, Science and Medical (ISM)*. As faixas de frequências licenciadas são divididas em segmentos, os quais são destinados a uma categoria de serviço específico como comunicação móvel, fixa, radiodifusão, entre outros. Estes seguimentos, por sua vez, são divididos em faixas menores e concedidos às operadoras, corporações, conhecidos como usuários primários/licenciados ou *incumbents*⁴, para serem utilizados em uma determinada região geográfica. A Figura 1 ilustra, de forma simples, a divisão do espectro eletromagnético nos Estados Unidos da América (EUA), e alguns dos serviços prestados em cada faixa. A divisão do espectro no Brasil pode ser visualizada na Figura 2, a qual pode ser melhor visualizada no site da agência reguladora brasileira⁵.

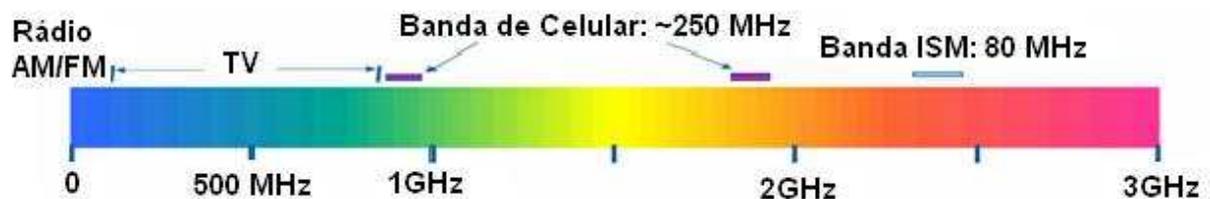


Figura 1 – Divisão do espectro eletromagnético. (*Shared spectrum company*).

As faixas não licenciadas por sua vez são passíveis de utilização por qualquer usuário, tanto os primários quanto os secundários (não licenciados), que são usuários que não detém concessão de utilização da faixa licenciada, desde que atendam a certas normas determinadas pelas agências reguladoras. Segundo Yuan (2007), o número de dispositivos de comunicação sem fio operando na faixa não

⁴ Terminologia utilizada, geralmente, para denotar os usuários primários (receptores) das faixas de frequência da banda de TV.

⁵ Disponível em <<http://www.anatel.gov.br/Portal/exibirPortalInternet.do>>

Devido a este grande número de aplicações necessitarem de espectro e este já se encontrar segmentado e com as devidas concessões, desencadeando com este sistema de alocação estática, de acordo com Yang et. al (2007), uma escassez artificial do espectro, é de se esperar que os usuários que detêm a licença de utilização das faixas licenciadas, usuários primários, o façam de modo eficiente.

No entanto, conforme Haykin (2005), Akyildiz et.al (2006), Lee et.al (2008), Lopez-Benitez et. al (2009) e Martian et. al (2010) há uma subutilização do espectro eletromagnético em algumas faixas licenciadas em determinados instantes de tempo e localizações geográficas, onde algumas bandas de freqüências do espectro são escassamente ocupadas a maior parte do tempo, algumas outras são, apenas, parcialmente ocupadas e as restantes são fortemente ocupadas. A Figura 3, como referenciado em Cabric' et. al (2005), denota esta situação. Ela mostra medidas feitas, em um dado instante, na cidade de Berkeley, nos EUA, que revelam uma utilização do espectro de apenas 0,5% na faixa de freqüência de 3-4 GHz e 0,3% na faixa de 4-5GHz, por exemplo.

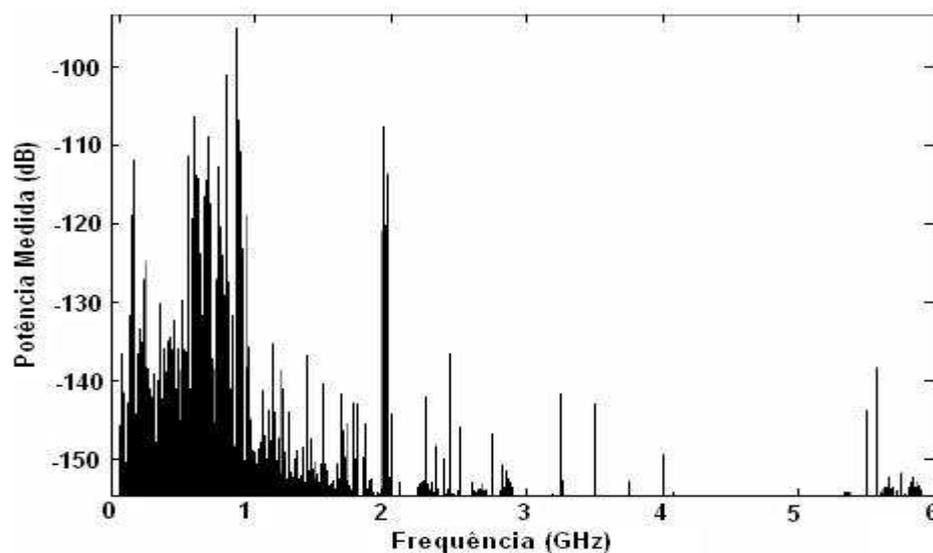


Figura 3 – Medidas de utilização do espectro em Berkeley (CABRIC' et.al, 2005).

Com isto, para aumentar a eficiência espectral e permitir que novas aplicações sem fio sejam suportadas, uma solução seria aumentar as faixas de freqüências não licenciadas, devido a se notar uma elevada ocupação nestes setores do espectro, no entanto, isto tem fatores negativos que tornam inviável a sua realização:

Isto não é interessante para a União em função das perdas de arrecadação, ou pela ocupação das faixas licenciadas por mais de um usuário. Para isto, são necessários avanços dos atuais padrões de regulamentação do espectro, assim como dos sistemas de rádio que farão o compartilhamento. (MENEZES, 2007).

Então o que fazer para acomodar cada vez mais aplicações rádio/sem fio, tendo um recurso natural escasso e garantir a confiabilidade na comunicação?

Segundo Chen e Guizani (2006), por um longo tempo se utilizaram três grandes estratégias para acomodar um número crescente de aplicações baseadas em rádio/comunicação sem fio.

A primeira delas foi tentar persuadir aos usuários de aplicações de rádio legadas a vagarem suas faixas de frequências para a implantação de novos sistemas sem fio, tais como as redes móveis celulares. Com isso, moveram-se tais usuários, quando possível, para as bandas de frequências distantes dos setores primários do espectro. No entanto, isto não resolve o problema da ineficiência espectral.

A segunda estratégia é a utilização de portadoras de alta frequência para as novas aplicações sem fio, pois os setores de elevada frequência são poucos ocupados por aplicações de rádio. Isto permite que aplicações banda larga, que necessitam de alta taxa de dados, sejam suportadas. No entanto, o aspecto negativo da utilização destas portadoras é que a propagação se torna muito sensível à chuva, poeira, vapor d'água e outras pequenas partículas presentes no ar, ou seja, a transmissão utilizando esta característica de portadoras fica susceptível ao clima e às condições ambientais.

A última abordagem para suportar novas aplicações sem fio no espectro já dividido⁶ é a operação de *underlay* das novas aplicações sobre as aplicações de rádio existentes. Como exemplo deste tipo de abordagem, cita-se a segunda geração de celulares móveis, padrão IS-95 A/B, que trabalha com a tecnologia acesso múltiplo por divisão de código (CDMA) seqüência direta. Ela foi inicialmente proposta para trabalhar sobre a faixa de 900MHz PCS na América do Norte para sobrepor muitas aplicações de rádio existentes(CHEN;GUIZANI, 2006).

No entanto, apesar da utilização destas técnicas para acomodar novas aplicações de rádio sobre o topo das já existentes, elas não resolvem o problema da

⁶ Termo que faz referência à segmentação e à devida concessão das faixas licenciados do espectro.

ineficiência espectral, bem como outros fatores decorrentes. Com isto, torna-se necessária uma tecnologia que permita uma melhor eficiência espectral, permitindo que sejam suportadas novas aplicações, bem como que garanta a confiabilidade de comunicação e direitos dos sistemas e serviços sem fio existentes.

Para atender a estas necessidades e permitir, conforme Haykin (2005), a realização de agilidade no espectro e implantação da nova política de acesso ao espectro dinâmico proposta pela FCC, a tecnologia de Rádio Cognitivo foi introduzida. Nela se vislumbra a inserção de cognição nos dispositivos de rádio, a fim de que eles utilizem de forma oportunista as bandas licenciadas do espectro não ocupadas para realizar a sua comunicação, sem causar interferência maliciosa aos usuários primários, detentores da licença de utilização destas faixas do espectro.

Dentre as justificativas para a utilização da tecnologia de rádio cognitivo sobre o espectro licenciado para permitir que novas aplicações sem fio sejam suportadas destaca-se as de Chen e Guizani (2006), onde se refere que, conforme exposto anteriormente, um espectro não utilizado não é desejável. Logo, usuários não deveriam ser permitidos de serem proprietários de espectro que não utilizem, bem como que haja a subutilização de um espectro alocado. Qualquer que seja a razão para a baixa utilização espectral, isto não representa um melhor e mais eficiente uso deste recurso natural. Além disso, isentar o uso de licença pode suportar modelos de negócios que não requerem largo capital de investimento devido ao baixo custo de dispositivos não licenciados. Ademais, o atual estado da arte da tecnologia de rádio tem mostrado que é possível implementar um dispositivo de rádio cognitivo em várias aplicações sem fio tais como as *wireless regional area networks* (WRANs), *wireless metropolitan area networks* (WMANs), *wireless local area networks* (WLANs), redes de sensores sem fio, entre outras, a um custo razoável. Portanto, aos dispositivos de rádio pode ser dada alguma inteligência para que eles trabalhem automaticamente sobre o espectro de frequência disponível em um dado instante de tempo.

Capítulo 3

Rádio Cognitivo

O rádio cognitivo ⁷ (RC) é visto como uma nova abordagem para melhorar a utilização de um recurso natural e escasso, o espectro eletromagnético. Ele permite que novas aplicações sem fio sejam implantadas, pois possibilita novos caminhos de acesso ao espectro não utilizado ou subutilizado.

O termo Rádio Cognitivo foi discutido pela primeira vez por Mitolla III e Gerald Q. Maguire em um artigo publicado no ano de 1999 (CHEN;GUIZANI, 2006). Em sua tese de doutorado, Mitola III (2000), considerava o rádio cognitivo como uma extensão natural do conceito do *Software Defined Radio* (SDR), onde segundo Akyildiz et.al (2006) o principal foco foi sobre como o rádio cognitivo poderia melhorar a flexibilidade dos serviços pessoais sem fio através de uma nova linguagem chamada *Radio Knowledge Representation Language* (RKRL), onde se apresenta uma visão geral do radio cognitivo como um assunto multidisciplinar. (HAYKIN, 2005). Então, para Joseph Mitolla III:

Rádio cognitivo identifica os pontos em que os assistentes pessoais digitais (PDAs) e suas redes relacionadas são computacionalmente inteligentes para detectar as necessidades de comunicações dos usuários como função do contexto de uso e fornecer os recursos de rádio e serviços sem fio mais apropriados a estas necessidades. (MITOLA III, 2000).

Para Haykin (2005) rádio cognitivo é:

...um sistema de comunicação sem fio inteligente que está consciente do ambiente a sua volta e usa a metodologia de entender para projetar e assim aprender do ambiente e adaptar os seus estados internos às variações estatísticas dos estímulos de entrada do dispositivo de rádio-frequência (RF), fazendo as correspondentes alterações, em tempo real, em certos parâmetros de operações, tais como frequência da portadora, potência de transmissão, estratégia de modulação, com dois objetivos em mente: comunicação altamente confiável quando e onde necessário e utilização eficiente do espectro de rádio (HAYKIN, 2005).

⁷ Os termos usuário secundário e usuário não-licenciado serão utilizados de modo intercambiável durante todo o texto. Tais usuários utilizam a tecnologia de rádio cognitivo para realizarem as suas comunicações.

Outra definição sobre Rádio Cognitivo é dada pela FCC que o considera como sendo um rádio que pode alterar seus parâmetros de transmissão baseado no ambiente no qual ele opera. É interessante notar que o termo Rádio Cognitivo significa diferentes coisas para diferentes perspectivas. No entanto, das definições tomadas acima duas características principais do rádio cognitivo são notadas: capacidade cognitiva e reconfigurabilidade.

A capacidade cognitiva refere-se à habilidade da tecnologia de rádio para capturar ou sentir as informações do ambiente de rádio. Esta capacidade necessita de técnicas sofisticadas para capturar as variações espaciais e temporais no ambiente de rádio, em vez de apenas uma dada banda de frequência específica, e evitar a interferência às operações dos usuários licenciados. Dentro desta perspectiva, informações como porções do espectro não utilizadas em um dado tempo, localização dos usuários vizinhos, tipos de serviços/sistemas disponíveis, entre outras, podem ser identificadas com vista a se estimar a melhor faixa de espectro disponível e os mais apropriados parâmetros de operação a serem utilizados pelo usuário secundário.

A reconfigurabilidade permite ao dispositivo de rádio ser dinamicamente programado segundo o ambiente de rádio, de acordo com as informações advindas da característica cognitiva. Neste âmbito, o rádio cognitivo pode ser programado para transmitir e receber sobre uma variedade de frequências e usar diferentes tecnologias de acesso suportadas pelo seu projeto de *hardware*.

Peng et.al (2008) e (FCC, 2005, apud BERLEMANN,2005) abordam algumas capacidades cognitivas e de reconfigurabilidade, como citado acima, que o rádio cognitivo deve possuir para proporcionar um uso flexível e eficiente do espectro. Entre elas, cita-se:

- Identificação de localização: a habilidade do usuário secundário de determinar a sua localização, bem como o posicionamento dos outros usuários, permite que ele possa estimar os parâmetros de operações apropriados a serem utilizados na sua localização, tais como potência de transmissão e frequência de operação.
- Descoberta de redes e sistemas: para que o rádio cognitivo possa determinar a melhor forma de comunicação, ele deve descobrir quais são os sistemas

disponíveis e quais os serviços prestados por tais sistemas e a partir de então avaliar qual o melhor sistema que atende à necessidade do usuário.

- Controle de potência de transmissão: o controle de potência permite ao rádio cognitivo selecionar dinamicamente o nível de potência a ser utilizado no processo de transmissão dos dados, com o intuito de atender a objetivos como: evitar a interferência no usuário primário e permitir um maior compartilhamento do espectro com outros usuários secundários, quando não é necessária a utilização de elevada potência na comunicação
- Modulação/codificação adaptativa: modulação e codificação adaptativas podem modificar as características de transmissão e formas de onda para fornecer mais oportunidades de acesso ao espectro e melhorar a sua utilização. Com este recurso, o usuário secundário pode selecionar o mais apropriado esquema de modulação a ser utilizado com um sistema de transmissão particular, permitindo a interoperabilidade entre os sistemas.
- Acesso dinâmico à rede/sistema: outro requisito a ser atendido pelo dispositivo de rádio cognitivo é a capacidade de acessar diversas redes e sistemas. Em vista da existência de múltiplos sistemas e redes, executando protocolos de acesso distintos, torna-se necessário que o usuário secundário tenha a capacidade de se auto-configurar, identificando e ajustando o devido protocolo necessário para a utilização do sistema-alvo.

Além destas, outras características serão abordadas nos capítulos seguintes, como sensoriamento, na Seção 3.4, compartilhamento, Seção 3.6, mobilidade de espectro, Seção 3.5, entre outras.

3.1 Rádio Definido por *Software* e Rádio Cognitivo

Como visto anteriormente, uma das características importantes do rádio cognitivo é a reconfigurabilidade. Esta característica permite que os parâmetros de operação possam ser alterados conforme o ambiente de rádio, requisitos de usuário, condições da rede/sistema, localização dos outros usuários, entre outros. Com isto,

segundo Arslan (2007), o rádio cognitivo necessita ser projetado em torno do Rádio Definido por *Software* (*Software Defined Radio - SDR*), que é uma plataforma genérica e muito flexível, capaz de operar sobre diferentes larguras de bandas e sobre uma larga faixa de frequência, usando diferentes tipos de modulação e formatos de onda. Ela fornece a flexibilidade de rádio necessária a diversas aplicações, sem a necessidade de reconfiguração em *hardware*, suportando diversos padrões e tecnologias de acesso. Ademais, a maioria dos rádios cognitivos serão SDR (FCC, 2005 apud Menezes, 2007). No entanto, ter *software* e ser reprogramável são condições necessárias, mas não suficientes para ser caracterizado como rádio cognitivo. A Figura 4 ilustra, segundo Arslan (2007), a relação existente entre Rádio Cognitivo e SDR. Neste modelo a combinação do “*Cognitive Engine*”, SDR e outras funcionalidades suportadas, como o sensoriamento e as advindas das camadas superiores formam o rádio cognitivo.

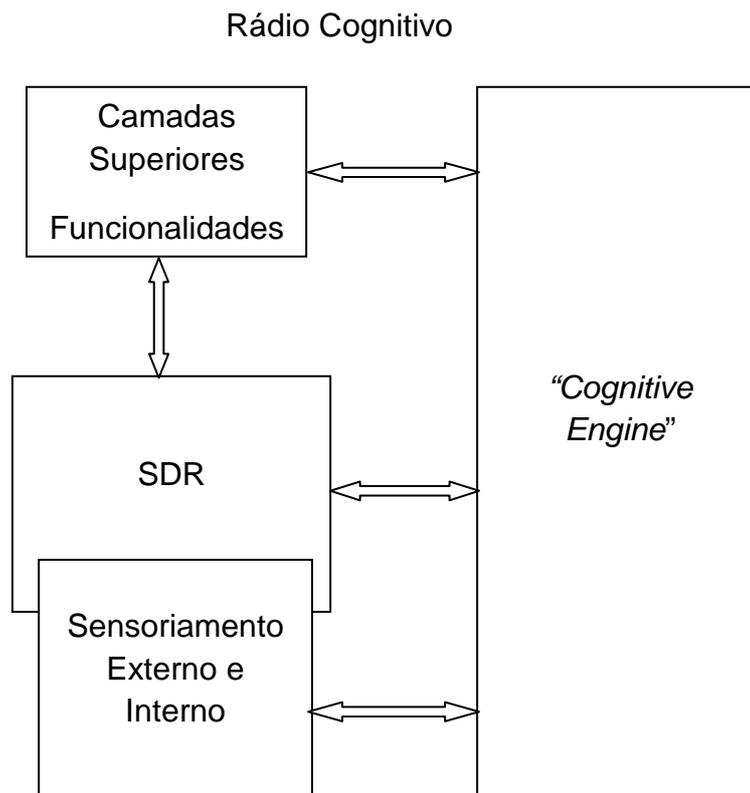


Figura 4 – Relação entre Rádio Cognitivo e SDR (ASLAN, 2007).

O “*Cognitive Engine*” é responsável por otimizar ou controlar o SDR baseado em alguns parâmetros de entrada tais como os sentidos ou aprendidos do ambiente de rádio, necessidades do usuários e condições da rede. Além disso, este elemento é consciente dos recursos e capacidades do *hardware*. Conseqüentemente, ele

tenta satisfazer aos requisitos de uma aplicação da camada superior ou usuário com os recursos disponíveis tais como espectro e potência.

3.2 Ciclo Cognitivo

Visto que o espectro já se encontra assinado e apresentando uma elevada subutilização, o mais importante desafio é compartilhar o espectro licenciado sem causar interferência na transmissão dos usuários primários, que possuem o direito na utilização do espectro. Em vista disso, o rádio cognitivo proporciona mecanismos para o uso oportunista das bandas do espectro não utilizadas, chamadas de “buracos no espectro” ou “espaços em branco” pelos usuários não licenciados. A Figura 5 ilustra este conceito, mostrando, com base na potência, quais são as faixas de espectro disponíveis durante a evolução do tempo e que, portanto, são passíveis de utilização.

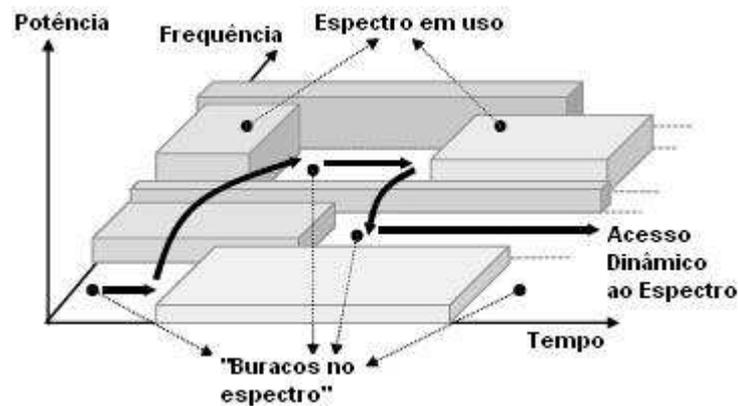


Figura 5 – Conceito de “buracos no espectro” (AKYILDIZ et. al, 2006).

Entre as características principais do rádio cognitivo está a habilidade para medir, sentir, aprender e estar consciente dos parâmetros relacionados às características do canal de rádio, disponibilidade do espectro, potência, localização dos outros usuários, serviços e sistemas disponíveis, entre outras relativas tanto ao ambiente de rádio quanto aos requisitos da aplicação do usuário, onde de posse de tais informações, o rádio cognitivo, de acordo com exposto acima, realizará a configuração dos seus parâmetros de operação com vista a alcançar uma comunicação confiável, sem interferência com o usuário licenciado.

Em virtude da dinâmica do ambiente de rádio, o usuário secundário deve possuir plena consciência do seu contexto, interagindo com o ambiente ao seu redor, o que, segundo Mitola III (2000), é alcançado através do chamado ciclo cognitivo. A Figura 6 ilustra o ciclo cognitivo proposto por Akyildiz et. al (2006), que utiliza apenas três estados para ilustrar as tarefas cognitivas realizadas pelo usuário secundário. No sensoriamento do espectro, o rádio cognitivo monitora o ambiente de rádio, capturando suas informações, estímulos de RF, e indicando as faixas de espectro disponíveis.

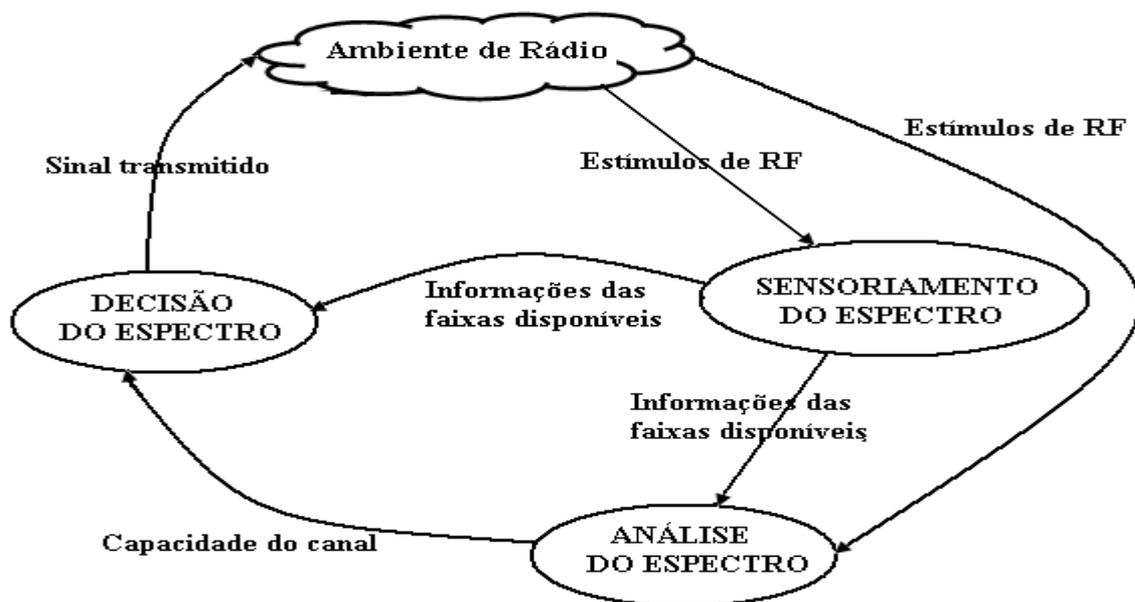


Figura 6 – Ciclo cognitivo (AKYILDIZ et. al, 2006).

No estado de análise de espectro as características das faixas de espectro disponíveis são estimadas e tais informações são repassadas para o próximo estado do ciclo cognitivo, que realizará a estrutura de decisão de qual faixa do espectro disponível será utilizada na comunicação do usuário secundário, levando em consideração a taxa de dados, largura de banda, nível de potência de transmissão, requisitos do usuário, entre outros fatores.

A estimação das características dos canais na etapa de análise leva em conta não apenas o aspecto variante do ambiente de rádio, mas também a atividade do usuário primário, informações sobre frequência de operação, entre outras que dêem subsídios ao usuário secundário para escolher a melhor banda do espectro que, entre outros aspectos, atenda aos requisitos de sua aplicação. Em vista disso, torna-se essencial a definição de alguns parâmetros que são adotados com vista a

representar a qualidade de uma dada faixa do espectro. Entre tais parâmetros, Akyildiz et.al (2006) sugere os seguintes:

- Interferência: devido à diversidade de bandas no espectro, algumas apresentam maior ocupação que outras. Com isso, em vista desta utilização, as características do canal podem ser obtidas, onde do total de interferência admitido pelo receptor primário pode ser derivada a potência de transmissão permitida ao usuário secundário, que é utilizada para a estimação da capacidade da faixa de espectro em questão.
- Perda de percurso: é um parâmetro que recebe influência de fatores como potência, frequência utilizada na transmissão e principalmente distância entre o transmissor e o receptor. A perda de percurso aumenta com o aumento da frequência, portanto se a potência do usuário rádio cognitivo permanece constante, então a sua faixa de transmissão diminui a altas frequências. No entanto, caso se aumente a potência com vista a compensar o aumento da perda de percurso, isto ocasionará o aumento da interferência aos outros usuários. Ademais, o aumento na distância entre o transmissor e o receptor provoca um aumento na perda de percurso.
- Erros do enlace sem fio: a taxa de erros do canal altera dependendo do esquema de modulação utilizado, bem como do nível de interferência presente em dada banda do espectro.
- Atraso da camada de enlace: para tratar de diferentes perdas de percursos, diversas taxa de erros, vários níveis de interferências se tornam importantes diferentes protocolos da camada de enlace para diferentes bandas do espectro. Isto ocasiona distintos atrasos na transmissão de pacotes nesta camada.
- Tempo de exploração: refere-se ao tempo de duração esperado que o usuário secundário pode utilizar a banda licenciada antes de sofrer interrupção do usuário primário. Em vista disso quanto maior o tempo de exploração, melhor qualidade da banda do espectro em análise.

A capacidade do canal é um dos requisitos importantes para realizar a caracterização das faixas do espectro, que pode ser estimada através da análise dos parâmetros destacados anteriormente. Ademais, outras estratégias são utilizadas na estimação da capacidade de uma dada banda do espectro, como a razão sinal-ruído (SNR), por exemplo, que, devido considerar apenas observações locais dos usuários, não consegue sozinha garantir a não-interferência nos usuários primários.

3.3 Arquitetura do Rádio Cognitivo

Para atender às diversas características apresentadas, o dispositivo de rádio cognitivo deve possuir uma arquitetura física que permita, dentre outras coisas, a varredura de uma extensa faixa do espectro e seja capaz de se reconfigurar de acordo com o ambiente de rádio e necessidades do usuário. Diante disto, Vuran et.al (2008) apresenta a seguinte arquitetura do transmissor/receptor para o rádio cognitivo, mostrada na Figura 7, onde os principais componentes são o chamado *RF Front-End* e a unidade de processamento do sinal banda base, que foram, como referenciado na Seção 3.1, propostos para ser implementados utilizando o SDR. Além destes dois elementos, nota-se a presença de um barramento que realiza o controle e a reconfiguração de todas as unidades, de acordo com as variações tempo-espaciais que ocorrem no ambiente de rádio. Tais processos podem ser gerenciados com a utilização de técnicas de inteligência artificial, como redes neurais artificiais, algoritmos genéticos, entre outras, implementadas no rádio cognitivo.

Nesta estrutura, o sinal analógico recebido no *RF Front-End* é amplificado, misturado e convertido para o formato digital, através do conversor analógico/digital (A/D), e então é modulado/demodulado na unidade de processamento. Onde tais processos, como referenciado anteriormente, podem ser controlados e reconfigurados.

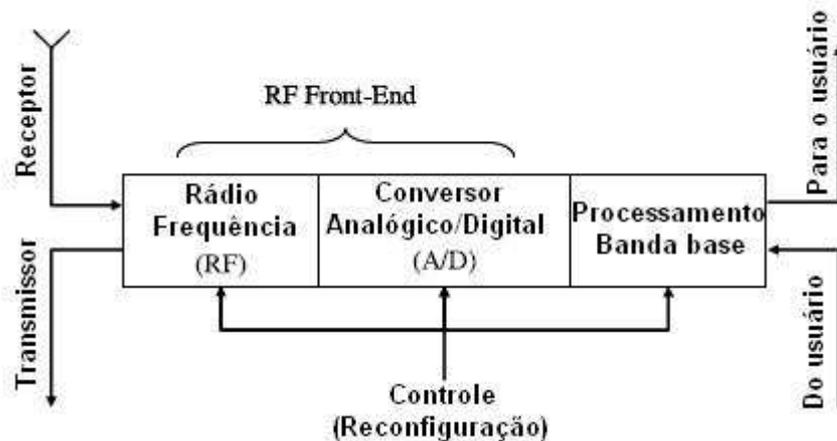


Figura 7 – Arquitetura transmissor/receptor do rádio cognitivo (VURAN et. al, 2008).

Akyildiz et. al (2006) aponta as novas características do rádio cognitivo no que se refere à sua unidade *RF Front-End*, que possui a capacidade de realizar sensoriamento em uma larga faixa do espectro, onde tal fatores são relacionados principalmente as tecnologias de *hardware* empregadas, como as antenas banda-larga, os filtros adaptativos e os amplificadores de potência. Entretanto, um dos desafios no que diz respeito à unidade *RF Front End* é a necessidade de detectar um sinal fraco do usuário primário em uma larga faixa de frequência, haja vista que os transmissores realizam suas operações em níveis variados de potência e utilizando estratégias de codificação e modulação diversas.

3.4 Sensoriamento de Espectro

Uma das principais tarefas a ser realizada pelo rádio cognitivo é o sensoriamento do espectro, onde se trata de um processo periódico e dinâmico de monitoramento do ambiente de rádio que visa determinar as faixas de frequências disponíveis, evitar a interferência à comunicação licenciada, detectar quais as características dos sinais presentes, tais como: tipo de modulação, forma de onda, frequência da portadora, entre outras. Quando uma faixa é passível de utilização, o usuário secundário a utiliza e fica em constante monitoramento a fim de verificar o possível retorno do usuário licenciado para aquela banda. Quando o usuário primário retorna, o secundário deve parar a sua transmissão, vagar aquela faixa e buscar outra faixa de espectro disponível para retomar a sua comunicação.

Segundo Kim & Shim (2008), o sensoriamento de espectro pode ser realizado como um mecanismo de duas camadas, onde do ponto de vista da camada física (PHY) busca-se detectar eficientemente os sinais do usuário primário e as oportunidades de acesso ao espectro, adaptando seus esquemas de codificação, modulação, entre outros. Já na perspectiva da camada de controle e acesso ao meio (MAC), o sensoriamento determina quando e quais canais o usuário não licenciado tem que sentir.

3.4.1 Sensoriamento na Camada MAC

Na camada de Controle e Acesso ao Meio (MAC), um dos aspectos fundamentais para eficácia do sensoriamento é a definição da periodicidade com que os canais são sentidos pelo usuário secundário, ou seja, de quanto em quanto tempo o usuário não licenciado deve sentir o canal primário. Para tanto, deve se considerar o compromisso entre o número de oportunidades descobertas de utilização do espectro (faixas disponíveis) e a sobrecarga (*overhead*) de sensoriamento obtido com a adoção de um dado período de sensoriamento. Caso este período seja muito pequeno, muitas oportunidades no espectro serão encontradas, no entanto o US gastará muito tempo sentindo os canais, o que fará com que a sua utilização espectral seja reduzida. Ao contrário, sentir os canais com menor frequência pode ocasionar perdas de descobertas de oportunidades no espectro e/ou não percepção da interferência causada no UP. Além disso, devido ao peculiar padrão de uso de cada canal, definido pela atividade do UP, um determinado período de sensoriamento pode proporcionar um bom desempenho para um canal (compromisso entre o número de descobertas encontradas e o *overhead* de sensoriamento obtido) ao passo que para outro isso pode não ocorrer. Logo, um dos desafios em sensoriamento de espectro na camada MAC é determinar um de período de sensoriamento ótimo para cada canal que proporcione o máximo de descobertas de oportunidades do espectro e o mínimo de *overhead* de sensoriamento e interferência na comunicação primária.

Segundo Kim & Shim (2006), o estado de um canal/espectro na camada MAC pode ser sentido de duas formas: proativa e reativa, as quais dependem de quando o canal é sentido.

3.4.1.1 Sensoriamento Reativo

É o tipo de sensoriamento sob demanda. Neste sensoriamento, quando o usuário secundário deseja realizar a sua transmissão ele monitora todos os canais primários até encontrar um canal livre, que utilizará na sua operação. Caso a largura de banda requisitada pela aplicação de usuário secundário seja atendida com apenas um canal, o usuário não licenciado busca apenas um canal disponível e permanece nele até que o usuário primário volte a ocupar o canal. Em vista disso, o sensoriamento é executado sob demanda apenas quando o usuário secundário deve comutar para outro canal, ou seja, o usuário do rádio cognitivo só buscará outro canal para realizar a sua transmissão, quando sentir a presença do usuário primário no canal que atualmente ocupa. Com isso, conforme Yang et. al (2007), neste processo existe uma possível margem de interferência ao usuário primário. Além do que o usuário secundário sofre com a interrupção inesperada, tornando difícil satisfazer os requisitos da aplicação.

A Figura 8 ilustra o mecanismo de sensoriamento reativo, utilizando um modelo de canal Ocupado (ON)/Desocupado(OFF) (FENG et. al,2009). Neste caso, o usuário secundário, buscando encontrar faixa de espectro disponível para sua transmissão, realiza o sensoriamento no canal a. Diante da disponibilidade do canal, o US inicia a sua transmissão, sem realizar o sensoriamento no outro canal, b. Durante a transmissão secundária, ocorre o retorno do usuário primário ao canal a. No entanto, esse retorno não é percebido imediatamente pelo US, gerando assim interferência entre as comunicações primária e secundária. Percebido o retorno do usuário licenciado, o US comuta para o canal b e realiza o sensoriamento deste canal em seguida. Verificando a disponibilidade do canal b, o US retoma a sua transmissão anteriormente interrompida.

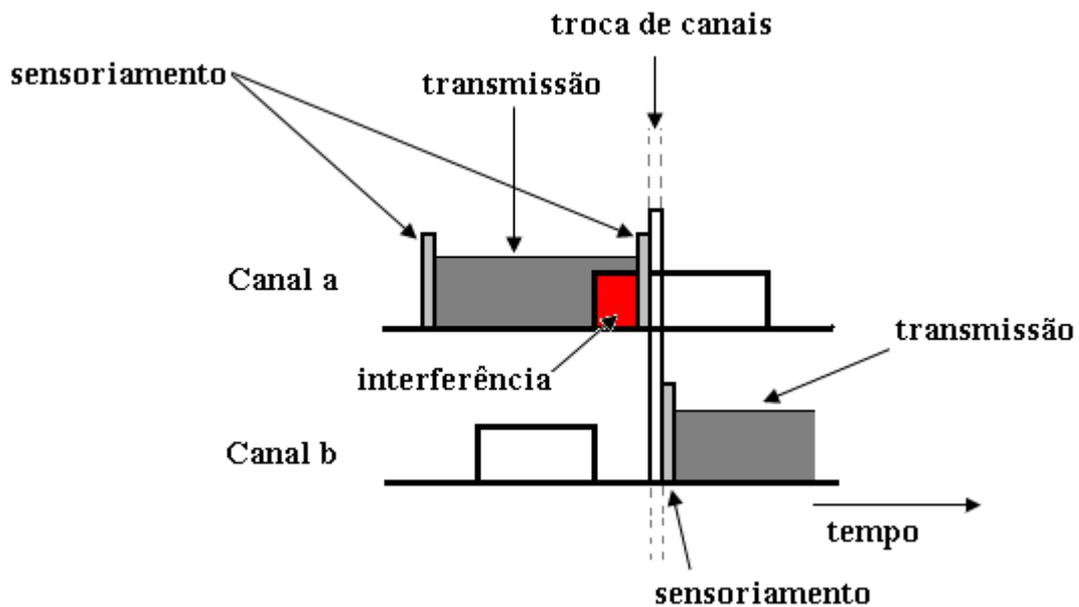


Figura 8 – Mecanismo de sensoriamento reativo

3.4.1.2 Sensoriamento Proativo

Neste tipo de sensoriamento o usuário secundário realiza periodicamente o monitoramento dos canais, com seus próprios períodos de sensoriamento em adição ao sensoriamento sob demanda. Com a informação coletada periodicamente, o usuário de rádio cognitivo busca estimar o padrão de uso dos canais para determinar a mais desejável ordem de sensoriamento deles, quando é necessário buscar um canal desocupado, bem como comutar de canal antes do retorno do usuário primário. Em vista destes dois sensoriamentos esta abordagem apresenta um *overhead* de sensoriamento maior que a reativa. Entretanto, ela reduz o tempo de busca por um canal livre, de modo que o atraso de pacote fim-a-fim pode ser minimizado, bem como a interferência na comunicação primária.

A Figura 9 ilustra o mecanismo de sensoriamento proativa. Nesta ilustração, o usuário secundário inicia a sua transmissão no canal a, após realizar o seu sensoriamento periódico. Devido às informações obtidas no sensoriamento periódico dos canais, o usuário secundário consegue parar a sua transmissão e sair do canal a, antes do retorno do usuário primário a ele, comutando para o canal b. Após comutar para o canal b, o US faz o sensoriamento sob demanda neste canal para

verificar a sua disponibilidade. Confirmada esta disponibilidade, a transmissão secundária é retomada utilizando o canal b para comunicação.

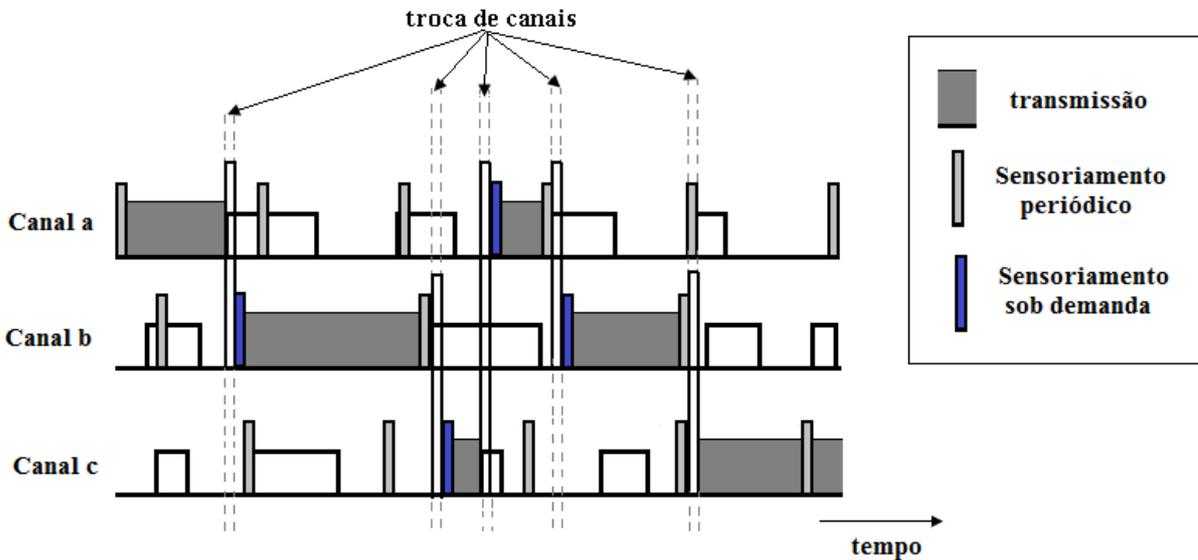


Figura 9 – Mecanismo de sensoriamento proativo

3.4.2 Sensoriamento na Camada Física (PHY)

O sensoriamento na camada física possui, dentre outras finalidades, detectar a presença do sinal do usuário primário, suas características, bem como as faixas do espectro que são passíveis de utilização. A seguir, evidenciam-se alguns métodos utilizados no sensoriamento de espectro, onde, segundo Akyildiz et.al (2006), são classificados em: detecção de transmissor, detecção cooperativa e detecção baseada em interferência.

3.4.2.1 Detecção de Transmissor

Devido ao rádio cognitivo ter que detectar diferentes tipos de sinais, com diversos níveis de potência e largura de banda. Um dos requisitos e desafios da tarefa de sensoriamento na camada física é a detecção de um sinal fraco do usuário primário em uma larga faixa de frequência através de observações locais do usuário secundário.

A seguir, denotam-se alguns dos métodos destacados na detecção do transmissor, onde se utiliza o seguinte modelo de hipóteses (1). Neste modelo $r(t)$ denota o sinal recebido pelo dispositivo de rádio cognitivo, $x(t)$ é o sinal transmitido pelo usuário primário, $n(t)$ se refere ao Ruído Aditivo Branco Gaussiano (AWGN) e h é o ganho de amplitude do canal. H_0 e H_1 tratam-se das hipóteses de ausência e presença, respectivamente, de usuário primário em uma dada faixa do espectro

$$r(t) = \begin{cases} n(t) & H_0 \\ hx(t) + n(t) & H_1 \end{cases} \quad (1)$$

3.4.2.1.1 Detecção com Filtro Casado

Quando o usuário secundário tem informações das características do sinal do usuário primário, tais como tipo de modulação, forma de pulso, formato de pacotes, entre outras, o detector ótimo, na presença do ruído Gaussiano estacionário, é o filtro casado, visto que ele maximiza a razão sinal-ruído de pico (SNR). Além disso, segundo Akyildiz et.al (2006), ele necessita de pouco tempo para alcançar um bom ganho de processamento, devido à coerência, visto que somente $O(1/\text{SNR})$ amostras são necessárias para atender a uma determinada probabilidade de falso alarme, em relação a outros métodos de detecção. No entanto, com este método é necessário que o rádio cognitivo tenha conhecimento *a priori* das características do sinal do usuário licenciado para que ele faça a devida demodulação do sinal recebido. Caso estas informações não estejam disponíveis, o filtro casado apresenta um desempenho pobre. Ademais, de acordo com (FOERSTER, 2003 Apud ARSLAN, 2007), visto que o usuário secundário precisa receber todos os tipos de sinais, realizar a implementação de uma unidade complexa de sensoriamento torna-se bastante difícil. Além do que se terá um considerável consumo de potência dos dispositivos para que os vários algoritmos de recepção sejam executados.

3.4.2.1.2 Detecção de Energia

Quando o usuário secundário não possui informações suficientes a respeito do sinal do usuário licenciado, uma abordagem mais simplificada é executar a

detecção não coerente utilizando o método de detecção de energia. Este esquema, segundo Cordeiro et. al (2007), tem recebido bastante atenção e é a forma mais comum de sensoriamento do espectro, devido ao baixo custo computacional e baixa complexidade de implementação, além de ser mais genérico, pois não necessita de informações *a priori* do sinal do usuário primário.

Nesta abordagem de detecção, o sinal é detectado pela comparação da saída do detector de energia com um dado limiar que depende da potência do ruído presente. Logo, verifica-se que este esquema é suscetível à incerteza da potência do ruído. Com isto, segundo Arslan (2007), o detector de energia não trabalha eficientemente para detectar usuários primários que utilizam a técnica de espalhamento espectral nas transmissões dos seus sinais. Ademais, apesar de ser simples e rápido, ele não consegue distinguir usuários primários de usuários secundários. Com isto, ele pode gerar falsos alarmes provocados por sinais involuntários. No entanto, para resolver este problema o padrão IEEE 802.22 introduziu o conceito de período de sossego, durante o qual os usuários secundários não podem utilizar o espectro licenciado para transmitir. Apenas os usuários licenciados podem estar presentes na banda do espectro avaliada (CORDEIRO, 2007). Assim, executando o sensoriamento dentro do período de sossego elimina-se tal problema.

A Figura 10 mostra o diagrama de blocos típico de um detector de energia, onde se percebe que para medir a energia do sinal recebido, a rigor de potência, a saída do sinal do filtro passa-banda com largura de banda W é elevada ao quadrado e integrada sobre o intervalo de observação T , para que posteriormente seja comparada com um dado limiar e resultar em uma das hipóteses de existência ou não de usuários primários, denotadas por H_1 e H_0 , respectivamente, na banda de espectro avaliada.

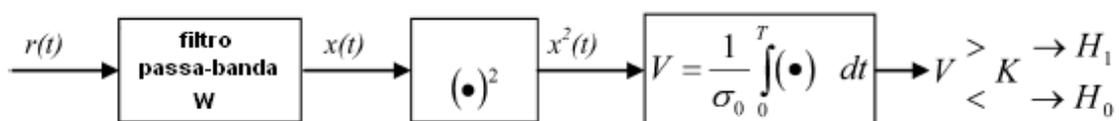


Figura 10 - Diagrama de blocos de um típico detector de energia.

3.4.2.1.3 Detecção de Característica

Detector de característica é o método utilizado para detectar a transmissão dos usuários primários pela exploração das características cicloestacionária do sinal recebido.

Em geral, os sinais são modulados utilizando portadoras senoidais, trem de pulsos, fator de espalhamento, entre outros esquemas que resultam em uma inerente periodicidade nos sinais resultantes. Com isto, tais sinais são caracterizados como cicloestacionários, visto que suas médias e autocorrelações exibem tal característica periódica. E esta peculiaridade pode ser detectada através da análise da função de correlação espectral, que indicará a presença de sinais em um dado espectro. Uma vantagem deste método é a sua robustez quanto ao ruído, haja vista que ele distingue a energia do ruído da energia do sinal modulado. Isto se deve do fato de que o ruído é um sinal estacionário no sentido amplo sem correlação, enquanto que os sinais modulados são cicloestacionários com correlação espectral devido à redundância da periodicidade do sinal. Isto faz com que ele tenha um melhor desempenho do que o método de detecção de energia na discriminação do ruído. Entretanto sua desvantagem está no fato de que ele requer um longo tempo de observação e sua implementação é computacionalmente complexa.

3.4.2.2 Detecção Cooperativa

Na abordagem de sensoriamento cooperativo a informação obtida por um usuário rádio cognitivo, devido ao sensoriamento de uma dada faixa do espectro em certa área geográfica é compartilhada com os outros usuários secundários. A combinação dessas várias medições faz com que a probabilidade de perda de detecção ou falso alarme reduza consideravelmente.

Devido à falta de interação entre os usuários primários e secundários, as localizações dos receptores primários são desconhecidas, isto faz com que as técnicas de detecção não-cooperativas não evitem a interferência nos receptores primários, haja vista que estes são dispositivos passivos. A Figura 11 ilustra esta situação, onde o usuário secundário realiza sensoriamento e faz a sua transmissão

causando interferência no usuário primário, pois não consegue detectar a presença do receptor primário, nem do transmissor primário, haja vista que este último se encontra fora da área de transmissão do US.

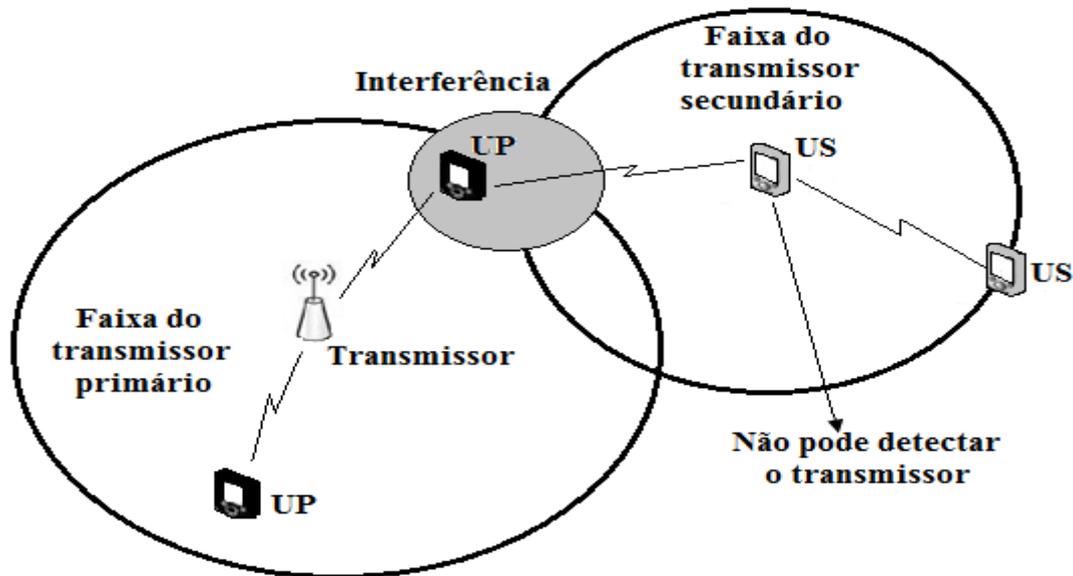


Figura 11 - Interferência no receptor primário (AKYILDIZ et. al, 2006).

Ademais, a detecção de transmissor não consegue prevenir o problema do terminal escondido, onde o usuário secundário, apesar de ter uma boa visão direta para o receptor, não é capaz de detectar o transmissor primário devido ao efeito do sombreamento, provocado pela presença de um obstáculo entre os dois usuários, ou devido a outros efeitos como o desvanecimento do sinal do usuário primário, por exemplo, conforme mostrado na Figura 12.

Em vista destes fatores, a detecção cooperativa, de acordo com (CABRIC´2004; ARSLAN, 2007; AKYILDIZ et.al., 2006), é vista como uma possível solução para minimizar estes problemas que surgem no sensoriamento do espectro e que degradam o desempenho dos métodos de detecção de usuários primários, tais como incerteza do ruído, desvanecimento do sinal devido ao multi-percurso, sombreamento, entre outros, haja vista que ela minimiza a incerteza obtida no sensoriamento realizado por um único usuário rádio cognitivo.

Nesta estratégia de detecção, as informações de sensoriamento obtidas pelos usuários secundários são compartilhadas entre si, as quais são incorporadas para prover uma melhor identificação do usuário presente em uma dada banda do

espectro. Além disso, tal abordagem reduz o tempo de sensoriamento do usuário secundário, devido às informações adquiridas de outros usuários.

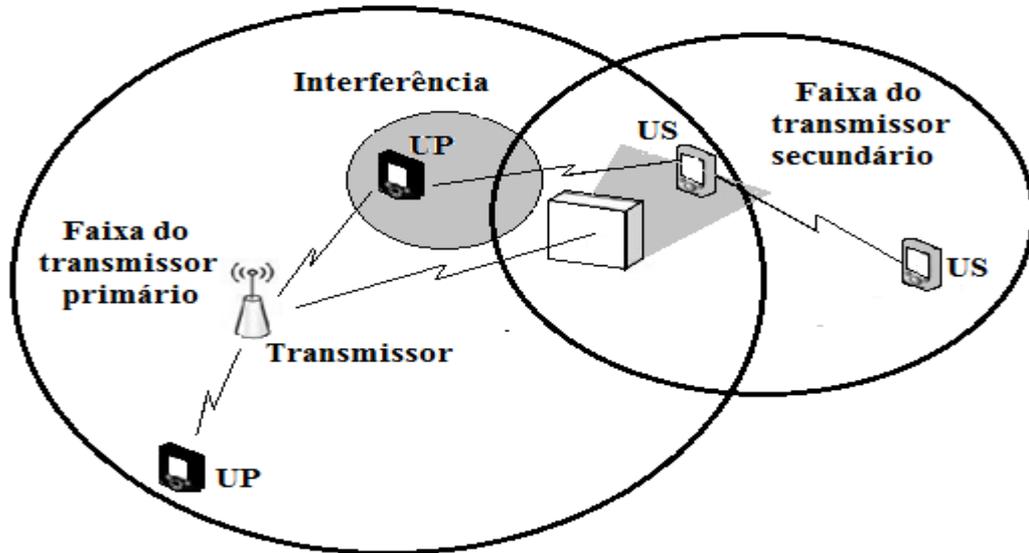


Figura 12 - Problema do terminal escondido (AKYILDIZ et. al, 2006).

Em uma arquitetura cooperativa, a troca de informações de sensoriamento é realizada através de um canal de controle. Este canal pode ser implementado de diferentes formas: uma faixa de espectro dedicada, uma banda não licenciada, como a ISM e um sistema de *underlay*, por exemplo (YUCEK; ARSLAN, 2009). O canal de controle pode ser usado tanto na troca de informações de sensoriamento quanto de informações de alocação de canal entre os usuários secundários.

A abordagem cooperativa, apesar de proporcionar melhorias nos esquemas de detecção de usuários primários, possui algumas desvantagens como a necessidade de utilização de recursos do sistema para a realização de trocas de mensagens informando os resultados do sensoriamento entre os usuários não licenciado, provocando assim um *overhead* de tráfego, necessidade de controle do canal, maior complexidade do sensor e sistema de cooperação (ARSLAN, 2007).

Além disso, Kaligineedi (2008) evidencia a questão da presença dos chamados usuários maliciosos que afetam significativamente o desempenho do sensoriamento cooperativo e propõe uma alternativa para a identificação de tais dispositivos. Um usuário malicioso é um rádio cognitivo que, devido a algum mau funcionamento do dispositivo ou em virtude de suas próprias razões, envia e compartilha resultados errados de sensoriamento.

A detecção cooperativa, segundo Berlemann (2007), pode ser implantada de duas formas: centralizada ou distribuída.

Na forma centralizada, uma entidade central, como uma estação base ou um nó mestre, por exemplo, coleta as informações de sensoriamento advindas dos usuários secundários, executa as regras e identifica as faixas do espectro disponíveis, indicando aos usuários secundários os buracos no espectro, bem como outras informações inerentes a fase de sensoriamento. A Figura 13 ilustra este tipo de detecção cooperativa. No cenário descrito, os usuários secundários US1, US2, US5, não conseguem detectar a presença do sinal do usuário primário, devido ao efeito do sombreamento decorrente dos obstáculos. No entanto, como os usuários secundários US3, US4 possuem uma visão direta para o usuário primário, os resultados do sensoriamento deles são enviadas ao Controlador de Rádios Cognitivos, entidade central que coleta e envia estas informações aos outros usuários de rádio cognitivo, a fim de evitar que estes utilizem a faixa do espectro que está sendo utilizada pelo usuário primário e o prejudique na sua comunicação.

Já na detecção cooperativa distribuída, os usuários secundários trocam informações entre si, de maneira *ad-hoc*, sem a utilização de uma entidade central para gerenciar tais resultados do sensoriamento. Com isto, cada usuário rádio cognitivo executa as suas próprias decisões para saber qual porção do espectro ele pode utilizar.

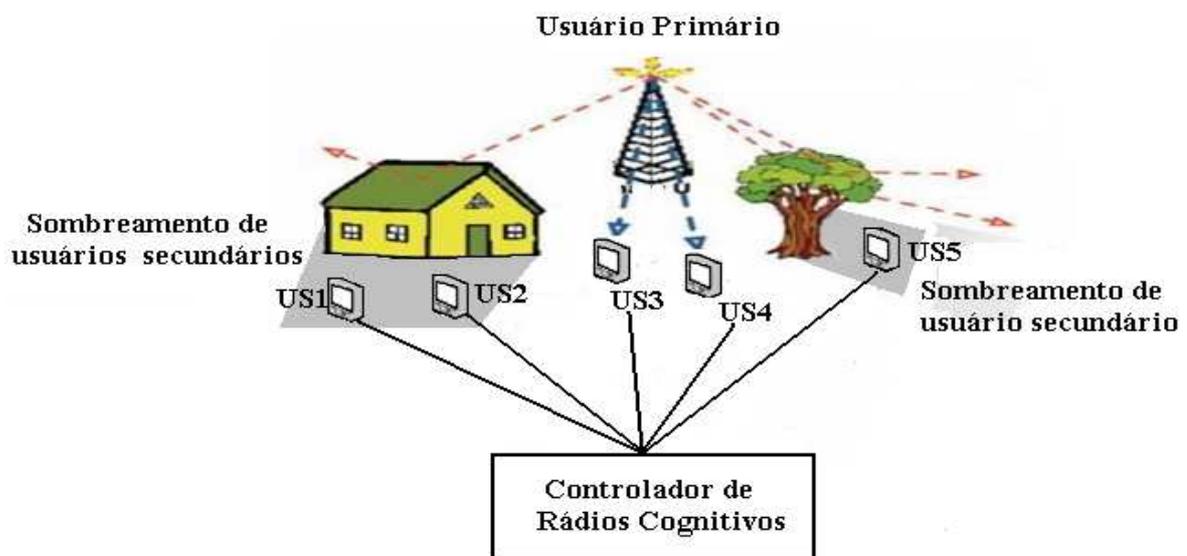


Figura 13 - Detecção cooperativa centralizada (THANAYANKIZIL; KAILAS, 2008).

3.4.2.3 Modelo Baseado em Interferência

Os modelos de detecção descritos anteriormente são centrados no transmissor, que o significa que a interferência pode ser controlada no transmissor, através da potência irradiada, localização dos transmissores individuais, etc. No entanto, tais métodos não conseguem eliminar totalmente a interferência nos dispositivos primários que estão recebendo sinais. Com isto, a FCC propôs um novo modelo para medir a interferência, chamado de temperatura de interferência.

Diferente dos mostrados acima, o modelo baseado em temperatura de interferência é centrado no gerenciamento da interferência no receptor, através da estimação da temperatura limite, representada pelo montante das novas interferências que o receptor primário pode suportar. (AKYILDIZ et. al, 2006). Com este modelo, um usuário secundário é permitido de utilizar uma dada faixa do espectro se o montante de interferência provocado no receptor, proveniente do usuário secundário juntamente com a presente naquela banda, devido ao ruído, de outros usuários, não ultrapasse um dado limite (limiar), tolerável pelo usuário primário (receptor). A Figura 14 ilustra este modelo, onde mostra um sinal licenciado projetado para operar numa faixa onde se nota a presença de um ruído inerente ao ambiente de rádio. Devido ao aparecimento de usuários interferentes na referente faixa do espectro, verifica-se a formação de picos sobre o piso do ruído original. Com isto pode ser perceber onde se tem oportunidades de acesso ao espectro.

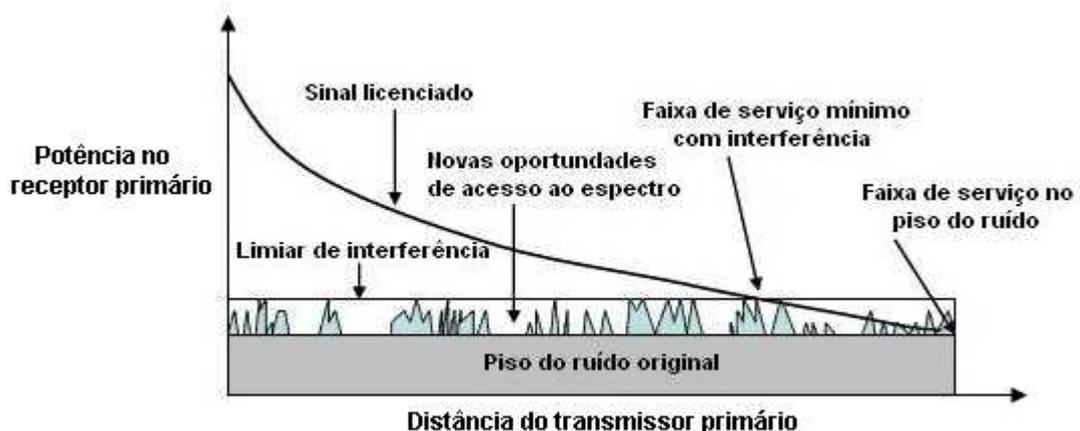


Figura 14 - Modelo de temperatura de interferência (AKYILDIZ et. al, 2006).

A temperatura de interferência, segundo Clancy (2007), possui um conceito semelhante ao da temperatura do ruído. Ela é uma medida obtida por meio da

potência e largura de banda ocupada pela interferência. A equação (2) que descreve a temperatura de interferência, dada em Kelvin, é definida por:

$$T_I(f_c, B) = \frac{P_I(f_c, B)}{kB} \quad (2)$$

onde $P_I(f_c, B)$ é a potência média em Watts do sinal interferente centrado na frequência f_c e com largura de banda B medida em Hertz e k é a constante de Boltzmann, cujo valor é $1,38 \times 10^{-23}$ Joules por Kelvin. De acordo com Clancy (2007), a motivação para o uso deste modelo é que ele caracteriza os efeitos dos usuários secundários sobre os usuários primários, bem como os efeitos do ruído no receptor primário, representando-os através de uma única medida.

No entanto, existem algumas dificuldades na utilização do modelo baseado na temperatura de interferência. Entre elas está a determinação do limiar a ser considerado neste método, levando em consideração casos em que o usuário primário está transmitindo em baixa potência. Além disso, o usuário secundário deve medir o efeito de sua transmissão sobre todos os usuários licenciados. Para isto, necessita da correta localização dos receptores primários, o que se torna difícil, haja vista se tratarem de dispositivos passivos.

3.5 Mobilidade de Espectro

Uma das características do rádio cognitivo é a capacidade de realizar a sua transmissão, através dos canais disponíveis, sem interferir na comunicação do usuário primário. Quando o canal que está sendo ocupado pelo usuário secundário se torna indisponível, devido ao aparecimento do usuário licenciado, ele deve comutar para outra faixa do espectro com o intuito de retomar a sua comunicação. Este processo do usuário secundário alterar a sua faixa de frequência de transmissão e realizar o gerenciamento de sua conexão é chamado, segundo Akyildiz et. al (2009), mobilidade do espectro, que desencadeia um novo tipo de *handoff*, o chamado *handoff* de espectro.

Quando ocorre o *handoff* de espectro, o dispositivo de rádio cognitivo deve adaptar seus parâmetros de operação, protocolos de redes, entre outras

configurações, a fim atender aos requisitos de acesso da banda-alvo do espectro. E este processo de mudança deve ocorrer o mais suave e rápido possível, visto que se deve minimizar a degradação no desempenho da aplicação que está sendo executada no rádio cognitivo quando o processo de *handoff* for realizado, buscando assim atender aos requisitos de QoS da aplicação secundária.

Quanto à razão que gera a troca da faixa de frequência de transmissão do usuário secundário, Cordeiro et. al (2007) classifica o *handoff* de espectro em obrigatório e voluntário. O chaveamento obrigatório é desencadeado pelo aparecimento do usuário licenciado na banda de espectro ocupada pelo usuário secundário. Enquanto que o voluntário é executado quando os requisitos de QoS da aplicação do usuário secundário não estão sendo satisfeitos na atual faixa ocupada.

Em Akyildiz et. al (2006) são apresentados alguns desafios e requisitos para um bom gerenciamento de mobilidade do rádio cognitivo, como por exemplo o desenvolvimento de algoritmos para decidir qual o melhor canal disponível, com base nas características da banda de espectro livre, bem como nos requisitos da aplicação do usuário secundário, buscando diminuir o tempo de atraso e perda de pacotes, por exemplo, durante o processo de *handoff* de espectro.

3.6 Compartilhamento de Espectro

O rádio cognitivo foi vislumbrado para permitir que usuários não licenciados utilizassem o espectro licenciado de maneira oportunista, sem interferir na comunicação primária. E esta coexistência com outros usuários numa dada faixa torna o compartilhamento do espectro uma das funções essenciais do rádio cognitivo, que conta com um conjunto de técnicas para melhor utilização do espectro de rádio como uma função do tempo, espaço e contexto (IANCULESCU; MUDRA, 2005).

Segundo Akyildiz et. al (2006) o processo de compartilhamento de espectro apresenta cinco passos, onde o primeiro é o sensoriamento cujas características foram referenciadas anteriormente, na Seção 3.4. O segundo se trata da alocação do espectro, onde de posse do resultado do sensoriamento o usuário secundário pode alocar o canal para a sua transmissão, o que também leva em consideração o estado interno do rádio cognitivo. O terceiro passo é o acesso ao espectro, cujo foco

é dado sobre a coordenação de acesso ao espectro a fim de prevenir que haja a colisão de múltiplos usuários que tentam acessar a mesma banda do espectro. A penúltima etapa deste processo trata do protocolo que estabelece a comunicação entre transmissor e receptor, onde este último deve ser notificado do setor do espectro selecionado para a realização da troca de informações. Por fim, o último passo descrito neste processo é o que se refere à mobilidade de espectro, que é um elemento importante para o sucesso na comunicação do usuário secundário e que foi descrito na Seção 3.5.

As estratégias de compartilhamento de espectro, segundo Akyildiz et. al (2006), podem ser classificadas de acordo com três aspectos: arquitetura, comportamento de alocação e técnicas de acesso.

Quanto à arquitetura, de maneira semelhante ao sensoriamento utilizando detecção cooperativa, o mecanismo de compartilhamento pode ser centralizado ou distribuído. Onde no primeiro existe uma entidade central que realiza o controle de alocação e os procedimentos de acesso. Já no segundo caso, cada usuário é responsável pela alocação e o seu procedimento de acesso é baseado, geralmente, em políticas locais. Neste caso dispensa-se a utilização de uma entidade central de gerenciamento.

No que diz respeito ao comportamento de alocação, o compartilhamento do espectro pode ocorrer de forma cooperativa ou não-cooperativa.

Na forma cooperativa, os usuários secundários consideram os seus efeitos de transmissão sobre todos os usuários e esta informação é compartilhada entre eles, fazendo com que utilizem tais informações nos algoritmos de alocação. Esta solução cooperativa pode existir tanto na forma centralizada quanto na distribuída.

Diferentemente da anterior, a solução não-cooperativa considera o efeito de somente um dispositivo de rádio cognitivo em questão, o que pode conduzir a uma reduzida utilização do espectro.

Já no que diz respeito às técnicas de acesso, assim como referenciado em Ianculescu e Mudra (2005), existem duas maneiras de compartilhar o espectro, que são *underlay* e *overlay*. Na primeira, o espectro é usado pelo usuário secundário no mesmo instante que o usuário primário, onde o usuário não licenciado utiliza na sua transmissão um nível de potência abaixo de certo limiar tolerável pelo usuário primário. Para isto ele utiliza técnicas de espalhamento espectral que geralmente utiliza uma maior largura de banda comparada à estratégia de *overlay*.

A técnica de *overlay* é usada pelo usuário do rádio cognitivo para acessar uma dada banda do espectro quando o usuário licenciado não está presente. Com isto a interferência no usuário primário é minimizada. Neste caso é caracterizada pelo chamado uso oportunista do espectro.

3.7 Aplicações de Rádio Cognitivo

Devido às suas características e capacidades, o rádio cognitivo apresenta um considerável potencial de aplicações nos mais variados setores e campo da sociedade. A seguir, sintetizam-se algumas possíveis aplicações da tecnologia de rádio cognitivo.

- Militar: dado a sua capacidade cognitiva e de reconfigurabilidade, o rádio cognitivo apresenta um grande potencial em aplicações militares. Haja vista possibilitar alterações em seus parâmetros de operações como frequência da portadora, tipo de modulação, potência de transmissão, entre outros, adaptando-se ao ambiente de batalha. Além do que as redes militares apresentam a confiabilidade e segurança da informação como sendo um grande requisito de operação, onde com a utilização do rádio cognitivo o canal mais seguro pode ser escolhido e utilizado para realizar a comunicação com o aliado. Além disso, devido a funções como de sensoriamento, o usuário militar tem a possibilidade de detectar a presença de sinais de seu adversário sendo transmitidos.
- Comunicação móvel: dispositivos de rádio cognitivo atuando em sistemas de comunicação móvel pode minimizar os problemas provenientes de degradação e perdas de comunicação quando o usuário se desloca da área de cobertura de um para de outro sistema. Isso é possível devido a capacidade do dispositivo de rádio cognitivo de operar nos mais diversos sistemas, garantindo a interoperabilidade entre eles e conseqüentemente uma maior área de cobertura ao usuário.
- Redes de Emergência: em situações que envolvam segurança pública, desastres naturais, que podem tornar indisponível a estrutura de

comunicação vigente, faz-se necessário para a equipe de emergência estabelecer uma forma de comunicação, uma rede de emergência. Visto que a emergência requer uma comunicação confiável e com o mínimo de atraso, onde um montante do espectro deve ser utilizado para a transmissão dos dados, a tecnologia de rádio cognitivo pode habilitar tal transmissão e utilizar o espectro sem a necessidade de uma infra-estrutura implantada, buscando atender a prioridade na comunicação e tempo de resposta.

- Redes de Sensores sem fio (*WSN*): as redes de sensores sem fio apresentam um grande número de potenciais aplicações que vão desde o domínio militar até o comercial, tais como automação industrial e residencial, controle de iluminação, gerenciamento de energia, entre outras. A tecnologia *ZigBee* baseada no padrão IEEE 802.15.4 designa uma estrutura para utilização de redes sem fio e que são passíveis de adoção pelas *WSNs*. Uma característica das soluções *WSN* é que elas utilizam a banda não licenciada em suas operações. Entretanto tais bandas são compartilhadas com diversas aplicações que utilizam tecnologias sem fio de sucesso, como a *WiFi* e *Bluetooth*. Com isto, devido à grande ocupação desta faixa do espectro tem-se ocorrido uma degradação de desempenho das *WSNs* operando em tal banda, principalmente naquelas que são compartilhadas com as redes com padrão IEEE 802.11 (CAVALCANTI et. al, 2008). Em visto disso, uma possível solução para este problema seria a utilização da tecnologia do rádio cognitivo na implementação de redes de sensores sem fio, onde os buracos do espectro licenciados, como o setor destinado ao serviço de TV, por exemplo, poderiam ser utilizados oportunamente, ao invés da utilização da faixa não licenciada que está cada vez mais lotada.

3.8 O Padrão IEEE 802.22

O IEEE 802.22 para *Wireless Regional Area Networks* (WRAN) foi o primeiro padrão desenvolvido de abrangência mundial, especificando características da camada PHY e MAC, baseado em técnicas de rádio cognitivo para uso oportunista das bandas de TV sem interferir nos usuários primários (CORDEIRO et. al, 2006). O

seu grupo de trabalho foi criado em 2004 e sua mais promissora aplicação é proporcionar o acesso banda-larga sem fio às áreas rurais e de acesso remoto, de tal maneira que seu desempenho seja comparável às tecnologias de acesso banda-larga cabeadas que atendem áreas urbanas e suburbanas.

A faixa de operação do IEEE 802.22 *WRAN* compreende as bandas do espectro entre 54 MHz e 862 MHz que, como citado anteriormente, abrange os setores do espectro licenciados aos serviços de TV, bandas VHF e UHF, cujos canais possuem, nos EUA, largura de banda de 6 MHz cada. Adicionalmente aos serviços de TV, também chamados de serviços licenciados, estão os sinais de microfones sem fio, que também são permitidos pela FCC para operarem na faixa de TV e cujos sinais possuem largura de banda de 200 KHz.

O sistema 802.22, de acordo com Cordeiro et. al (2008), especifica uma eficiência espectral na faixa de 0.5 bit/(s/Hz) a 5bit/(s/Hz). Com isso, utilizando aproximadamente o valor médio do intervalo, 3 bit/(s/Hz), isto poderia corresponder a uma taxa de dados na camada física de 18Mbps nos canais de TV de 6MHz, que atende à proposta de proporcionar acesso banda-larga às áreas remotas.

Outra característica do IEEE 802.22 é a superior área de cobertura da BS em relação às outras tecnologias do padrão IEEE 802, a qual é especificada em 33 km de raio, mas que pode chegar a uma faixa de até 100 km de raio, caso não se tenha restrição de potência de transmissão.

No 802.22, segundo Cordeiro et. al (2006), tanto o usuário secundário, denotado como *Consumer Premise Equipment (CPE)*, quanto a sua estação-base (BS) são responsáveis pela proteção às operações licenciadas. A estação base instrui seus CPEs associados a executar o sensoriamento periódico no espectro, que pode ser dentro de banda (*in-band*) ou fora de banda (*out-of-band*). O sensoriamento *in-band* é executado no canal atualmente ocupado pelo usuário secundário. Já o sensoriamento *out-of-band* é executado nos outros canais, diferentes do atual, com intuito de buscar novas oportunidades de comunicação.

Caso no sensoriamento *in-band* haja detecção de sinal de usuário primário acima dos seguintes limiares de detecção, referenciados como *Incumbent Detection Threshold (IDT)*, que variam de acordo com o tipo de usuário licenciado, conforme visto na Tabela 1, a BS libera o canal atual, a fim de evitar interferência na comunicação primária (CORDEIRO et. al , 2006).

Para canais *in-band*, o padrão IEEE 802.22 emprega o mecanismo de período de sossego para realizar a atividade de sensoriamento, que ocorre em dois estágios com diferentes escalas de tempo: sensoriamento rápido e o sensoriamento fino.

No primeiro estágio um algoritmo de sensoriamento rápido é empregado, como o baseado em detecção de energia, por exemplo. As informações de sensoriamento dos CPEs são enviadas para BS, que decide sobre a necessidade de realização do sensoriamento fino.

O segundo estágio é iniciado baseado nos resultados obtidos do sensoriamento rápido. Este estágio envolve mais detalhes de sensoriamento, onde métodos mais vantajosos são utilizados como o baseado em detecção de característica, por exemplo, (YUCEK; ARSLAN, 2009).

Tabela 1 - Valores de IDT de acordo com o tipo de sinal.

Tipo de sinal	Largura de Banda	IDT
Sinal de Microfone sem fio	200 KHz	-107 dBm
Sinal de TV Digital (DTV)	6 MHz	-116 dBm
Sinal de TV Analógico	6 MHz	-94 dBm

Capítulo 4

Redes Baseadas em Rádio Cognitivo

Atualmente, as tecnologias de rede de dados limitam a habilidade da rede para se adaptar ao ambiente, freqüentemente resultando em um desempenho sub-ótimo. Limitado em estado, escopo e mecanismo de resposta, os elementos das redes atuais, tais como protocolos, políticas de acesso, nós da rede, são pouco capazes de realizar adaptações inteligentes, onde, no geral, as adaptações que ocorrem são desencadeadas após um dado problema ter ocorrido, tendo um caráter reativo (ARSLAN, 2007). Em vista disto, surge a concepção de redes baseadas em rádio cognitivo ou redes de rádios cognitivos que buscam, dentre outras coisas, eliminar tais limitações, possibilitando que a rede possa observar, atuar e aprender a fim de otimizar o seu desempenho. Tais redes, além disso, são motivadas pela tendência do aumento da complexidade em redes sem fio, heterogeneidade e dinamismo do ambiente de rádio, buscando dentre outros fatores utilizar de maneira oportunista o espectro, possibilitando que novos serviços sejam implantados e proporcionando a interoperabilidade entre os sistemas.

A tecnologia-chave que permite a implantação das chamadas redes de rádios cognitivos (RRC), também referenciada como redes secundárias, redes da próxima geração, redes de acesso dinâmico ao espectro, é o chamado rádio cognitivo, cujas características e funcionalidades foram abordadas anteriormente. A rede de rádios cognitivos não é apenas uma rede para interconectar usuários com dispositivo de rádio cognitivo. Ela é composta de vários sistemas de comunicação e redes, que utilizam as capacidades da tecnologia do rádio cognitivo para prover a comunicação entre eles.

O projeto de rede secundária objetiva melhorar a utilização da rede como um todo e não apenas eficiência espectral do meio de comunicação. E isto, segundo Peng et. al (2008), do ponto de vista do usuário significa que suas demandas serão sempre atendidas a qualquer tempo e em qualquer lugar acessando a RRC. Já do ponto de vista dos operadores, isto indica que eles podem oferecer os melhores

serviços aos usuários móveis e alocar os recursos de rádio com vista a entregar mais pacote por unidade de banda de uma forma mais eficiente.

Em virtude desta heterogeneidade do espectro, apresentando bandas licenciadas e não licenciadas, várias tecnologias de acesso, entre outros aspectos, torna-se necessário o desenvolvimento de protocolos de comunicação que abordem tais características e para isto uma descrição da arquitetura de RRC é importante.

4.1 Arquitetura de Redes de Rádios Cognitivos

Os componentes da arquitetura RRC, segundo Akyildiz et. al (2006), podem ser classificados em dois grupos, sendo o primeiro formado pela rede primária e o segundo formado pela rede de rádios cognitivos. Os elementos básicos que formam tal estrutura são ilustrados na Figura 15.

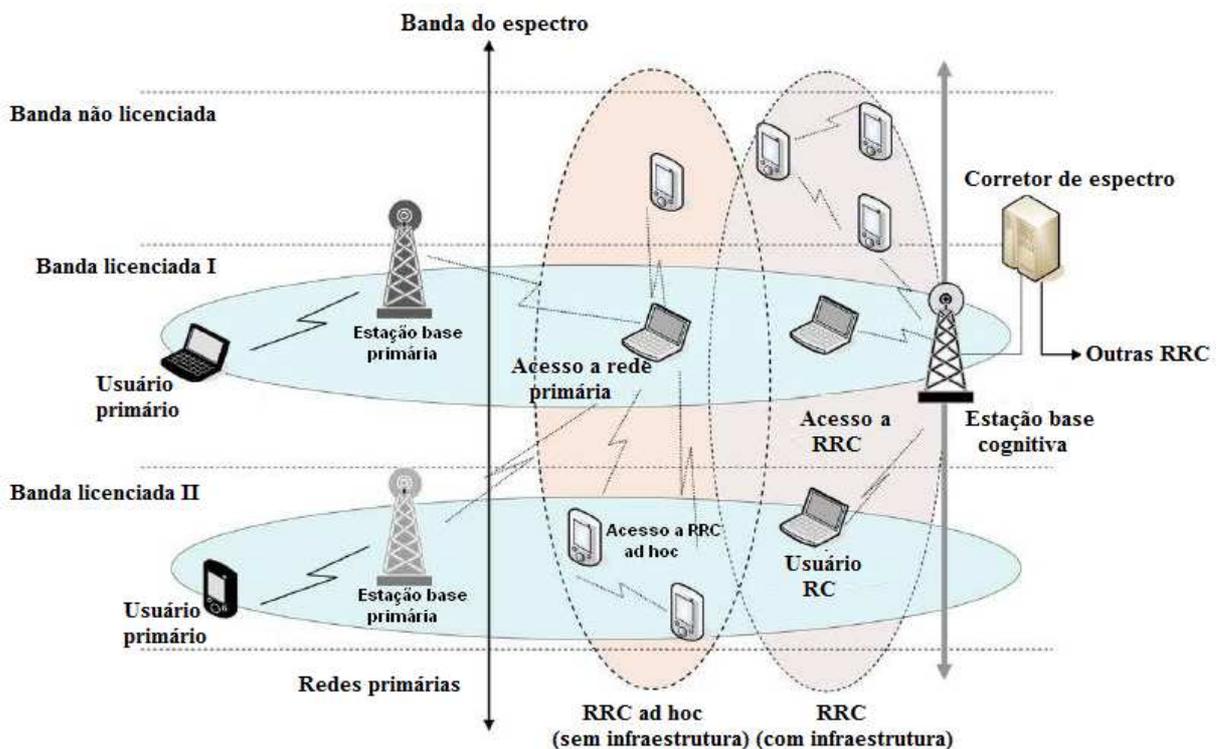


Figura 15 - Arquitetura de Rede de Rádios Cognitivos (AKYILDIZ et. al, 2006).

4.1.1 Rede Primária

A rede primária, também chamada de rede licenciada, é geralmente uma rede com infra-estrutura que possui licença, direito para a utilização de uma dada faixa do espectro, como por exemplo, as redes dos sistemas celulares. Os componentes que formam a rede primária são os usuários e as estações-base primárias.

Os usuários primários ou licenciados, como referenciado em seções anteriores, são aqueles que possuem licença para operar em uma dada banda do espectro, onde o seu acesso é controlado pela respectiva estação base da rede primária e a sua operação não pode ser prejudicada pelas atividades dos usuários secundários. Em vista de possuir a concessão de utilização do espectro, o usuário primário não necessita de funcionalidades adicionais para coexistir tanto com os usuários quanto com as estações-base de rádios cognitivos.

A estação base primária, por sua vez, é um componente de rede de infra-estrutura que possui licença para a utilização do espectro. Ela não necessita possuir capacidades de compartilhamento de espectro com os usuários secundários. No entanto, é interessante que ela execute protocolos que permitam o acesso tanto aos usuários primários quanto aos usuários não licenciados que queiram acessar a rede primária.

4.1.2 Rede de Rádios Cognitivos

Diferentemente da rede primária, a rede baseada em rádios cognitivos não possui direito de utilização da banda licenciada do espectro. Em vista disso, o seu acesso em tais faixas ocorre oportunamente. Ela é formada pelo usuário rádio cognitivo, cujas características já foram abordadas anteriormente, estação-base cognitiva e o corretor de espectro. Além disso, a sua operabilidade pode se dá tanto na banda licenciada quanto na não licenciada.

A estação-base cognitiva, também chamada de estação-base secundária ou estação base não licenciada, é uma infra-estrutura fixa que possui capacidades cognitivas, a qual fornece conexão, através de um único salto, aos usuários secundários. Através desta conexão o usuário não licenciado pode acessar outras redes, bem como realizar a comunicação com outros usuários secundários.

O corretor de espectro é uma entidade central que executa as regras de compartilhamento dos recursos do espectro entre as redes de rádios cognitivos. Além disso, conectado a cada rede, ele pode atuar como um gerenciador de informações e possibilitar que múltiplas redes secundárias compartilhem uma dada faixa do espectro.

Em relação à arquitetura de implementação, a RRC pode ser tanto uma rede de infra-estrutura quanto uma rede *ad-hoc*, como visto na Figura 15. Além destes dois tipos, Peng et.al (2008) apresenta a arquitetura de redes *mesh* como possível implementação de rede de rádios cognitivos, que consiste, dentre outras coisas, na junção de características de ambas as arquiteturas.

Na arquitetura de infra-estrutura, segundo Peng et. al (2008), o usuário rádio cognitivo acessa a estação-base secundária de uma forma direta, através de um único salto e a comunicação entre os usuários secundários sobre a faixa de transmissão da mesma estação-base ocorre através dela. Neste caso, a estação-base deve ser capaz de executar vários protocolos e padrões de comunicação a fim de atender aos diversos requisitos dos usuários secundários.

A outra forma de implementação, utilizando a estrutura *ad hoc*, não há um infra-estrutura definida. Com isso os usuários secundários reconhecem a presença de outros e se conectam através de certos protocolos ou padrões de comunicação de uma maneira *ad hoc*, formando assim uma rede.

Em vista da heterogeneidade presente na arquitetura de redes de rádios cognitivos, torna-se necessário a implementação de várias funcionalidades, a fim de permitir a interoperabilidade entre os sistemas. Tais requisitos variam de acordo com a característica da banda do espectro ser licenciada ou não, sendo dada diferente ênfase à operação da rede secundária a cada uma destas bandas do espectro. Com isto, Vuran et. al (2008), classifica, quanto à natureza do espectro, o modo de operação da rede baseada em rádios cognitivos em: operação em banda licenciada e operação em banda não licenciada.

4.1.3 Operação em Banda Licenciada

Neste tipo de operação, a RRC busca utilizar oportunamente as faixas de frequência licenciadas disponíveis para realizar a sua comunicação, utilizando as

técnicas do rádio cognitivo. A Figura 16 mostra esta estrutura, onde a rede secundária compartilha a mesma área geográfica e mesma banda do espectro com a rede primária.

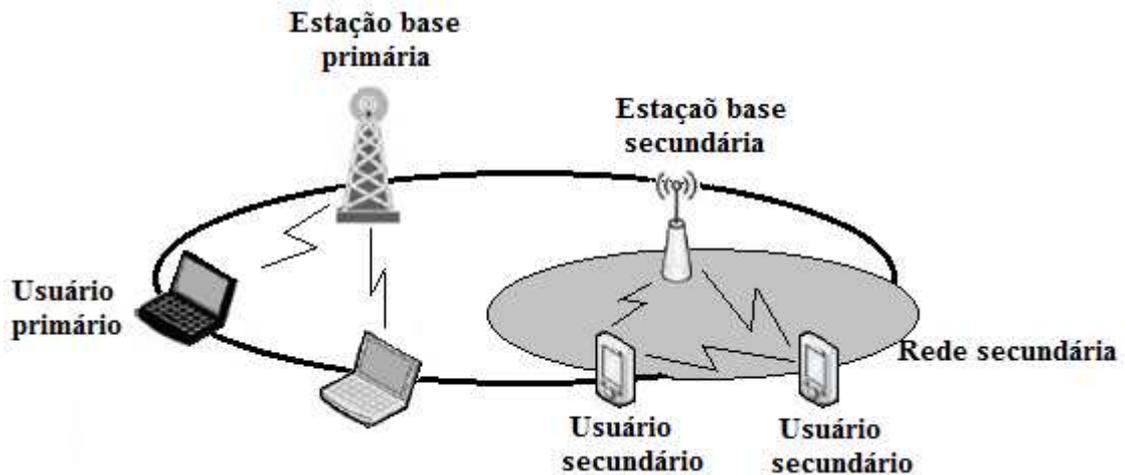


Figura 16 - Operação em banda licenciada (AKYILDIZ et. al, 2006).

Como neste caso, a rede primária detém o direito de utilização do espectro, a rede secundária deve realizar a sua comunicação sem interferir na operação da rede licenciada. Com isto vários desafios aparecem neste contexto, onde além de escolher o melhor canal a utilizar, a RRC focaliza principalmente na detecção da presença de usuários primários em dada faixa espectral. Com isto, nesta arquitetura é essencial evitar a interferência nos usuários primários. Logo, caso um usuário licenciado retorne à faixa de espectro ocupada pelo usuário secundário, este último deve vagá-la e retomar a sua comunicação em outra faixa espectral, desencadeando o chamado *handoff* de espectro, ou então utilizar a mesma faixa após a finalização da transmissão do usuário primário.

4.1.4 Operação em Banda Não Licenciada

Os setores do espectro não licenciado, como o ISM, têm proporcionado o surgimento de uma variedade de tecnologias inovadoras. Tais bandas do espectro são compartilhadas com outras aplicações de sucesso tais como *Wifi* e *Bluetooth*, bem como outras tecnologias proprietárias. Em vista disso, questões de coexistência em tais faixas tem sido objeto de extensas pesquisas, haja vista que

em virtude da grande utilização destas faixas, tais setores estão se tornando lotados (CAVALCANTI et. al, 2008).

As interferências causadas pelas diversas redes heterogêneas que compartilham a faixa ISM têm causado uma diminuição da eficiência de utilização desta faixa, onde a rede com a tecnologia de rádio cognitivo pode ser projetada para fornecer uma melhora na eficiência espectral (AKYILDIZ et. al, 2006). A arquitetura da RRC operando em banda não licenciada é mostrada na Figura 17, onde se percebe que como não existem usuários licenciados, todos os usuários possuem o mesmo direito de acesso a estas faixas do espectro, desde que atendam aos requisitos estipulados pelas agências reguladoras. Com isso, diversas redes secundárias compartilham a mesma área geográfica e utilizam a mesma porção do espectro para realizar as suas comunicações. E este compartilhamento espectral entre as redes secundárias é gerenciado pelo corretor do espectro.

Neste âmbito, o foco não é dado sobre a detecção de usuário primário, mas na detecção de transmissões de outros usuários secundários. Além do que é essencial a utilização de algoritmos e métodos de compartilhamento de espectro inteligentes e sofisticados a fim de que se obtenha uma melhor eficiência espectral, bem como se atenda os requisitos da aplicação do usuário secundário.

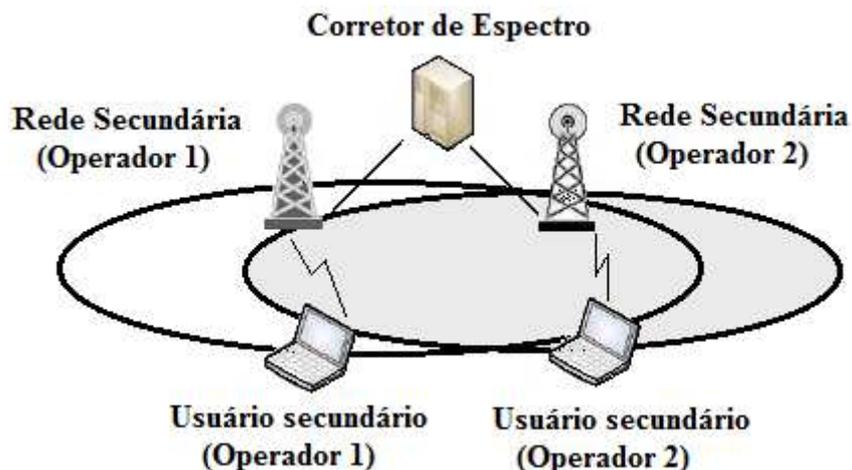


Figura 17 - Operação em banda não licenciada (AKYILDIZ et. al, 2006).

Capítulo 5

***Handoff* de Espectro em Redes Baseadas em Rádio**

Neste capítulo, retrata-se sobre *handoff* de espectro em redes de rádios cognitivos e faz-se uma descrição completa da estratégia proposta para *handoff* de espectro neste tipo de rede, foco principal deste trabalho, ilustrando suas características, métricas analisadas e cenário adotado no estudo

5.1 Considerações Gerais

A mobilidade de espectro, como visto anteriormente, é uma das características importantes do rádio cognitivo. Neste processo o usuário secundário visa buscar as melhores bandas do espectro para retomar a sua comunicação, dado que a faixa atual se torna indisponível ou não atenda aos requisitos da sua aplicação, e realizar o gerenciamento de sua conexão. Este processo de troca de faixas desencadeia o chamado *handoff* de espectro.

Dada a indisponibilidade de uma faixa espectral, a busca por outra banda livre pode ocorrer, basicamente, de duas formas. Na primeira, que utiliza a idéia de sensoriamento reativo mostrada na Seção 3.4.1.1, a busca é desencadeada após o aparecimento do usuário primário na faixa atualmente ocupada pelo usuário secundário. Neste caso, o usuário primário sofrerá uma dada interferência na sua comunicação, devido ao tempo necessário para que o dispositivo de rádio cognitivo possa detectá-lo, além do que a comunicação secundária é degradada pelo aparecimento inesperado do usuário licenciado, que devido a isto deve parar a sua comunicação e liberar o setor do espectro em questão, buscando outra faixa disponível. Esta forma de *handoff* é chamada de reativa (ARSLAN, 2007).

A segunda abordagem para *handoff* de espectro é a chamada proativa. Nela, com base na idéia de sensoriamento proativo discutido na Seção 3.4.1.2, o usuário secundário busca estimar o padrão de uso dos canais licenciados, baseado nas informações de sensoriamento obtidas e no histórico de informações armazenadas. Nessa abordagem se busca eliminar a interferência no usuário primário quando este

retoma a sua faixa do espectro, pois o usuário secundário passa a realizar a troca de faixa do espectro antes do aparecimento do usuário licenciado (CABRIC' et. al, 2004). E este fator é um requisito essencial na operação dos rádios cognitivos em faixa licenciada. Ademais, tal tomada de decisão inteligente possibilita ao usuário secundário decidir antecipadamente quando comutar para outra faixa de frequência e qual setor do espectro escolher, ajustando seus parâmetros de operação e conscientizando o receptor, através do canal de controle, por exemplo, sobre qual canal passará a ser utilizado para continuar a comunicação.

Quanto ao *handoff* de espectro, Yang et. al(2007) propõem uma abordagem proativa de acesso ao espectro, que busca minimizar a interferência causada aos usuários primários e prover uma descoberta rápida de canais disponíveis, através de um chaveamento proativo de canal. A simulação e avaliação da abordagem são realizadas assumindo-se modelos de tráfego periódico e exponencial, ao invés de dados reais. Os autores não avaliam a abordagem proposta quanto ao número de *handoffs* de espectro realizados pelo usuário secundário.

Kim e Shin (2008) propõem, utilizando modelo de canal ON-OFF, um esquema de sensoriamento adaptativo que visa maximizar a descoberta de oportunidades de canais pela adaptação do período de sensoriamento e minimizar o atraso em encontrar os canais disponíveis, através de um algoritmo de seqüenciamento ótimo de canal. A análise e avaliação da proposta são realizadas utilizando-se um modelo específico de canal, o que limita a sua aplicabilidade em cenários genéricos com outros modelos de canais. Além disso, não se avalia o esquema proposto quanto à interferência causada na comunicação licenciada

Zhu et al (2007) apresentam uma análise de acesso ao espectro licenciado utilizando cadeias de Markov. É proposto um esquema de reserva de canal para *handoff* de espectro em redes baseadas em rádio cognitivo. O esquema proposto é análogo ao de reserva de canal utilizado em redes de comutação por circuitos. Os autores avaliam o desempenho da estratégia quanto à vazão do sistema, probabilidade de finalização forçada da transmissão do usuário RC e probabilidade de bloqueio de tal usuário. Assumem-se na avaliação do esquema: taxa de chegada de usuários e tempo de serviço como sendo processos de Poisson e exponencialmente distribuídos, respectivamente.

Em (GIUPPONI; NEIRA, 2008) um mecanismo de *handoff* de espectro utilizando dois sistemas de lógica fuzzy em cascata é proposto. O primeiro, baseado

nos valores da razão sinal ruído do sinal primário (SNRPU) e da intensidade do sinal primário recebido no usuário secundário (SSPU) busca estimar qual a potência que o usuário secundário deve transmitir para não causar interferência na comunicação primária. Já o segundo sistema fuzzy, de posse desse valor de potência do US estimado, do SSPU e da taxa de bits do usuário secundário, o qual é adotado como um indicador da qualidade de serviço (QoS) percebida pela comunicação não licenciada, realiza a inferência se o *handoff* de espectro deve ocorrer, bem como se a potência de transmissão do US deve ser modificada, indicando o nível a ser alterado. Os autores avaliam a abordagem em relação a um esquema de limiar fixo. Métricas como: porcentagem de *handoffs* de espectro realizado pelo US e porcentagem de redução da temperatura de interferência são avaliadas. No entanto, o nível de eficiência espectral proporcionado pelo usuário secundário não é considerado na avaliação, o qual é importante na implantação de mecanismos de *handoff* de espectro em rádios cognitivos.

Kalil et. al (2010) é proposto um mecanismo para *handoff* de espectro em rádio cognitivo, que utiliza não apenas os canais licenciados no processo de troca de canais, mas também canais não licenciados, como canais *backup*, com vista a garantir a continuidade da comunicação não licenciada na ausência de canais licenciados livres para comunicação oportunista. Com esse mecanismo, os autores buscam reduzir o número de *handoffs* de espectro realizados pelo US. A modelagem da proposta se baseia em Processos de Poisson e distribuição exponencial. Os autores avaliam o mecanismo proposto em relação às métricas: probabilidade de manutenção do enlace e número de *handoffs* de espectro realizados pelo US. No entanto, as métricas de utilização espectral e interferência provocada na comunicação primária não são avaliadas.

Como visto acima, muitas abordagens utilizando modelos analíticos tem sido propostas em rádio cognitivo. Entretanto, modelos analíticos são baseados em várias suposições (carga de tráfego, topologia, etc.) que podem inviabilizar sua aplicação em cenários realistas. Além disso, em várias situações reais um modelo analítico pode não estar disponível. Dessa forma, os resultados obtidos por meio da abordagem analítica podem não refletir os valores reais, devido a não-linearidade dos dispositivos, falhas de equipamentos ou fatores ambientais inesperados, entre outros, que não são considerados na definição do modelo adotado. Em vista disso,

em nosso estudo utilizamos medições reais ao invés de considerações estocásticas, com vista a tornar a abordagem proposta mais fiel à realidade.

Em consequência e levando-se em consideração que o ambiente de rádio é altamente dinâmico, as Redes Neurais Artificiais (RNAs) podem apresentar-se como uma poderosa ferramenta para utilização em sistemas RC. Devido a sua habilidade de se adaptar dinamicamente e ser treinada a qualquer momento, a RNA consegue aprender os padrões, características e atributos do sistema alvo (HE et. al, 2010). Isto ocorre, pois o seu aprendizado se baseia em relações de entradas e saídas do sistema, onde questões de não-linearidade de equipamentos, falhas de dispositivos, fatores ambientais inesperados, entre outros, que afetam as medidas, são assimiladas pela RNA no seu processo de aprendizado. Com isso, a RNA consegue prever o comportamento futuro do sistema, através de sua característica de generalização.

Em se tratando da utilização de RNA em RC, Baldo e Zorzi (2008) propõem um esquema de aprendizado e adaptação em rádio cognitivo utilizando redes neurais artificiais. O esquema busca inferir do ambiente de rádio qual a vazão a ser alcançada pelo US quando uma determinada configuração é selecionada para operação. A simulação da proposta utilizou tráfego sintético de redes IEEE 802.11, tornando a sua avaliação restrita a este tipo de tecnologia, não abrangendo o cenário de redes heterogêneas. Já em Tsagkaris et. al (2008) são propostos dois esquemas de aprendizado baseados em redes neurais artificiais. Eles são projetados para melhorar a capacidade de um terminal RC através da predição da taxa de dados que uma específica configuração poderia alcançar, quando selecionada para operação. Os autores realizam a avaliação da abordagem utilizando dados gerados aleatoriamente ao invés de medições, onde as taxas de dados adotadas são definidas apenas baseado no cenário de redes *Wireless Local Area Networks* (WLANs). Com isso, a avaliação da proposta fica restrita a este cenário.

Diferente de outros trabalhos, nesta dissertação propõe-se a utilização de Redes Neurais Artificiais para prover subsídios ao processo de *handoff* de espectro em redes baseadas em rádio cognitivo, através da previsibilidade do comportamento dos canais de comunicação sem fio. O objetivo é minimizar a interferência à comunicação licenciada, reduzir o número de *handoffs* de espectro realizado pelo

usuário secundário e alcançar uma melhor eficiência espectral. Este trabalho é um aperfeiçoamento do proposto em Balieiro et. al (2010). Neste último, adotou-se apenas uma topologia de Redes Neurais Artificiais para prever o comportamento de todos os canais licenciados. Além disso, a sua avaliação ocorreu adotando um número de fixo de canais, ao contrário do que foi adotado nesta dissertação.

A Tabela 2 sumariza as características de algumas abordagens para *handoff* de espectro em redes baseadas em rádio cognitivo.

Tabela 2 – Abordagens para *handoff* de espectro

Proposta	Descrição	Modelagem/ Ferramenta	Métricas analisadas
Yang et. al (2007)	Abordagem proativa para <i>handoff</i> de espectro, que busca minimizar a interferência no UP e prover rápida descoberta de canais disponíveis ao US.	Modelagem estocástica, adotando modelo ON/OFF de canais, com duração exponencial e periódica. Realiza simulação e <i>testbed</i> .	Utilização do canal e taxa de interferência, no processo de simulação e apenas vazão no <i>testbed</i> . Não avalia o número de <i>handoffs</i> de espectro realizados pelo US.
Zhu et. al (2007)	Proposta para acesso ao espectro baseado em cadeias de Markov. Os autores utilizam um esquema de reserva de canal para subsidiar o <i>handoff</i> de espectro	Modelagem utilizando Cadeias de Markov. Taxa de chegada de usuários e tempo de serviço como processo de Poisson e exponencialmente distribuídos, respectivamente. Realiza simulação.	Vazão do sistema, probabilidade de finalização forçada e probabilidade de bloqueio da transmissão secundária. A interferência provocada na comunicação primária é negligenciada na avaliação.
Giupponi e Neira (2008)	Abordagem proativa para <i>handoff</i> de espectro baseado em dois Sistemas de Lógica Fuzzy em cascata. O sistema indica ao US se o <i>handoff</i> deve ocorrer, bem como se a potência de transmissão deve ser alterada.	Sistema baseado em Lógica Fuzzy. Realiza simulação para avaliar proposta, com dados gerados sinteticamente.	Porcentagem de <i>handoff</i> de espectro e porcentagem de redução da temperatura de interferência. Não avalia a utilização espectral alcançada pelo US adotando o esquema proposto.

Kalil et. al (2010)	Abordagem proativa para <i>handoff</i> de espectro que utiliza tanto canais licenciados quanto não licenciados (canais de <i>backup</i>) no processo de trocas de faixas espectrais. O objetivo é reduzir o número de <i>handoffs</i> de espectro.	Modelagem estocástica através de Processos de Poisson e distribuição exponencial. Realiza simulação.	Probabilidade de manutenção do enlace e número de <i>handoffs</i> de espectro realizados pelo US. No entanto, não avalia a interferência no UP, bem como a utilização espectral obtida pelo US.
Balieiro et. al (2010)	Abordagem proativa para <i>handoff</i> de espectro baseada em Redes Neurais Artificiais. Utiliza no processo de tomada decisão o conceito de margem de segurança. Adota medições reais de sensoriamento na sua avaliação.	Utiliza Redes Neurais Artificiais para estimar o comportamento dos canais licenciados. Adota a mesma topologia para todos os canais. Avaliação com número de canais invariável. Realiza simulação.	Número de <i>handoffs</i> de espectro realizados pelo US, utilização espectral e interferência provocada na comunicação primária.
Proposta da Dissertação	Um aperfeiçoamento da apresentada em Balieiro et. al (2010), quanto as topologias de RNAs adotadas. E avaliação com diferentes número de canais.	Utiliza uma topologia de RNA específica para estimar o comportamento de cada canal. Avaliação considerando número de canais variáveis. Realiza simulação.	Número de <i>handoffs</i> de espectro realizados pelo US, utilização espectral e interferência provocada na comunicação primária.

5.2 Estratégia Proposta

Nesta seção, apresentamos a estratégia proativa para *handoff* de espectro proposta. Com a sua utilização, busca-se: minimizar a interferência causada pelo usuário secundário na transmissão do usuário primário; reduzir o número de *handoffs* de espectro desencadeados pelo usuário RC, pois tal processo dificulta a garantia dos requisitos de sua comunicação e prover uma melhor utilização do

espectro. Adicionalmente, com esta abordagem, o tempo no processo de troca de canais é reduzido, haja vista que a escolha do canal alvo ocorre antes do aparecimento do usuário primário ao canal atualmente ocupado pelo usuário secundário e se baseia na capacidade de previsão da RNA.

A abordagem proposta é composta de três módulos, conforme ilustra a Figura 18. O primeiro refere-se ao mecanismo de sensoriamento de espectro, que busca capturar as informações do ambiente de rádio, formando os dados de sensoriamento $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$, que serão utilizados como conjunto de entrada para a estrutura de previsão. C_i , com $i=1, 2, 3, \dots, n$, representa a informação do nível de energia medido no canal i . Nesta estratégia, o método de sensoriamento adotado é o de detecção de energia.

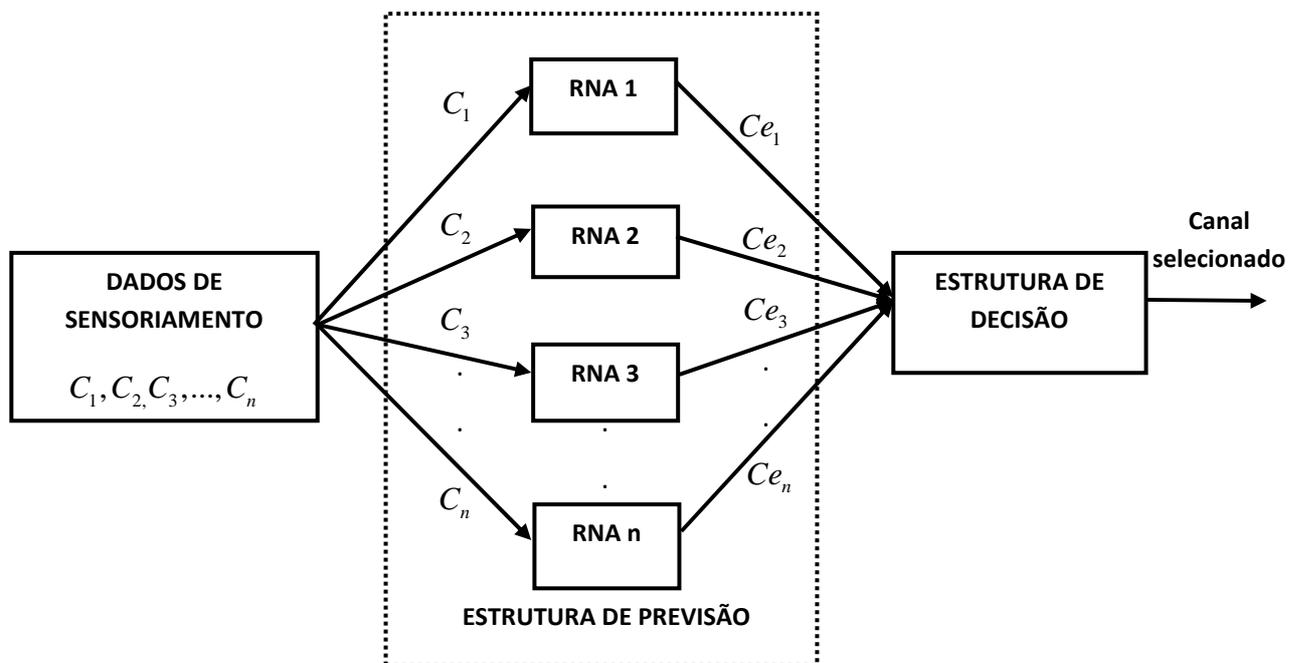


Figura 18 – Esquemático da estratégia proposta

O segundo módulo refere-se à estrutura de previsão. Este módulo, baseado nos dados de sensoriamento obtidos, realiza a estimativa do comportamento dos canais licenciados para instantes futuros $Ce_1, Ce_2, Ce_3, \dots, Ce_n$. Aqui, Ce_i , com $i=1, 2, 3, \dots, n$, denota o comportamento futuro estimado para o i -ésimo canal. Nessa etapa, a estimação do padrão de uso dos canais se dá utilizando Redes Neurais Artificiais. Elas apresentam a vantagem de levar em conta fatores não-lineares do ambiente de rádio na sua estrutura, representados nos valores de medições

utilizados no seu processo de aprendizagem. As RNAs proporcionam inteligência ao sistema de rádio cognitivo e possibilitam que este aprenda através de experiência e tome decisões inteligentes relacionadas ao processo de *handoff* de espectro, buscando garantir comunicação transparente ao usuário secundário. A Seção 5.1.1 descreve a estrutura da RNA adotada na abordagem.

Uma importante característica da abordagem proposta é que ela permite re-treinamento dinâmico das RNAs, o que a torna mais adaptável à natureza do espectro de rádio. Isso é possível, pois as informações de sensoriamento são armazenadas no módulo de dados de sensoriamento.

O terceiro módulo é a estrutura de decisão que, com base na previsão do comportamento do ambiente espectral, busca selecionar o melhor canal para o rádio cognitivo realizar a sua comunicação, o qual adaptará seus parâmetros de operação, tais como frequência da portadora, esquema de modulação, potência transmissão, entre outras, para atuar no canal escolhido. Mais detalhes da estrutura de decisão são apresentados na Seção 5.1.2.

Diferentes arquiteturas, centralizadas e descentralizadas, têm sido propostas para redes baseadas em rádio cognitivo. Com isso, é interessante ressaltar que a estratégia proposta é passível de utilização em uma arquitetura centralizada, onde as informações de sensoriamento dos nós são enviadas para uma estação base, por exemplo, que realiza o processo de previsão e executa a estrutura de decisão, alocando os canais disponíveis aos usuários secundários. A proposta também pode operar em modo descentralizado, onde cada nó implementa o esquema em sua estrutura e executa o seu *handoff* de espectro sem o gerenciamento de uma unidade central. A escolha de qual arquitetura adotar deve levar em conta compromissos entre estas duas abordagens (VURAN et. al, 2008).

5.2.1 Estrutura das Redes Neurais Artificiais

Nesta seção, apresentamos a estrutura das redes neurais artificiais adotadas em nossa proposta. As redes foram desenvolvidas para serem utilizadas no processo de previsão do comportamento dos canais licenciados para instantes futuros.

Para compor a estrutura de previsão, utilizou-se uma rede neural artificial (RNA) para estimar o comportamento de cada canal, como mostra a Figura 18, a fim de proporcionar um melhor desempenho de previsão⁸. Assim, cada RNA identifica e aprende as características e peculiaridades inerentes a cada canal e, conseqüentemente, traça seu padrão de uso. As RNAs atuam de forma paralela e cada uma apresenta uma topologia específica para cada canal.

Para a escolha da estrutura das RNAs, realizaram-se vários testes com diversas topologias de redes neurais perceptron multicamadas (HAYKIN, 1994). Nestes testes, parâmetros como número de neurônios da camada escondida, taxa de aprendizagem e função de ativação dos neurônios da camada escondida foram variados. A Tabela 3 apresenta os parâmetros e seus valores usados durante o processo de investigação e definição da melhor topologia a ser adotada para prever o comportamento de cada canal. Realizando todas as combinações possíveis, tem-se 36 topologias distintas de RNAs para cada canal, ou seja, 36 casos de teste. Todas as topologias utilizaram dois neurônios na camada de entrada e função de ativação linear na camada de saída, a qual é dada pela Equação (3). O algoritmo de aprendizagem usado no treinamento das RNAs foi o *Backpropagation* (HAYKIN, 1997). A janela de predição utilizada foi de 1,86s. Esta janela de predição é igual ao período de sensoriamento adotado, como será referenciado na Seção 5.1.3.

Como se observa na Tabela 3 foi utilizado duas funções de ativação para os neurônios da camada escondida, a saber, Tangente Hiperbólica Sigmóide (Tansig) e Logística ou Sigmóide (Logsig), as quais são dadas pelas Equações (4) e (5), respectivamente.

O número de neurônios na camada escondida (oculta) influencia fortemente no processo de aprendizagem e no desempenho da RNA. O uso de poucos neurônios pode resultar em uma RNA incapaz de aprender a estrutura básica dos dados ao qual ela é submetida. Já adotando uma quantidade elevada de neurônios nesta camada da RNA, pode aumentar de forma significativa o tempo necessário para o aprendizado da rede neural artificial, pois a sua topologia torna-se mais complexa, sem, necessariamente, proporcionar melhoria significativa no desempenho da RNA (TSAGKARIS et. al, 2008). Com isso, nos testes realizados para selecionar as topologias das RNAs para compor o esquema desenvolvido

⁸ Esta estrutura é um aperfeiçoamento da apresentada em Balieiro et. al (2010), onde uma mesma topologia de rede neural artificial foi adotada na estimação do comportamento de todos os canais.

foram adotados 6 valores distintos para o número de neurônios da camada oculta, como apresenta a Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros e seus valores adotados nos testes

Parâmetro	Valores
Número de neurônios da camada oculta (NNO)	5/10/15/20/25/30
Função de ativação dos neurônios ocultos (FNO)	Tansig/Logsig
Taxa de aprendizagem (η)	0,01/0,045/0,1

Nos testes realizados, três valores de taxa de aprendizado foram verificados, conforme apresentado a Tabela 3. Variou-se este parâmetro durante os casos de teste, pois ele possui grande influência durante o processo de treinamento da rede neural artificial. Uma taxa de aprendizado muito baixa pode tornar o aprendizado da RNA muito lento. Já uma taxa de aprendizado alta pode provocar grandes oscilações no treinamento da RNA e impedir a convergência do seu processo de aprendizagem (HAYKIN, 1997).

$$f(x) = x \quad (3)$$

$$Tansig(x) = \frac{2}{(1 + e^{-2x})} - 1 \quad (4)$$

$$Logsig(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (5)$$

Para escolha das melhores topologias de RNAs a serem adotadas na predição do padrão de uso dos canais e conseqüente formação do módulo de previsão do esquema proposto, utilizou os critérios (I) e (II), bem como se levou em consideração a complexidade de cada RNA durante a seleção. Nos critérios utilizados, MSE_{ref} corresponde ao erro quadrático médio desejado (referência), cujo valor adotado foi de 0,01; MSE_{treino} é o erro quadrático médio obtido na fase de treinamento da RNA; MSE_{valid} é o erro quadrático médio relativo à fase de validação.

$$(MSE_{treino} \leq MSE_{ref}) \quad e \quad (MSE_{valid} \leq MSE_{ref}) \quad (I)$$

$$\text{Minimize } |MSE_{treino} - MSE_{valid}| \quad (II)$$

Os critérios (I) e (II) adotados no processo de seleção das RNAs buscam fazer com que as redes neurais escolhidas consigam não apenas aprender as características subjacentes aos dados, padrão de uso dos canais, mas também sejam capazes de generalizar de forma satisfatória este comportamento quando submetida a novos dados.

A Tabela 11, em anexo, apresenta os 36 casos de testes, topologias de redes neurais artificiais, avaliadas na predição do padrão de uso do canal 1. Ela apresenta os valores de MSEs das fases de treinamento e validação de cada RNA, bem como a diferença absoluta destes dois valores. Com base nos critérios (I) e (II) e levando em consideração a complexidade das topologias das RNAs, a rede neural artificial selecionada para compor o módulo de previsão, relativa ao canal 1, foi a referente ao caso de teste 23, cuja topologia apresenta 30 neurônios com função de ativação Tansig na camada oculta e taxa de aprendizado de 0,045. Além de, como citado anteriormente para todos os casos, 2 neurônios na camada de entrada e um neurônio na camada de saída com função de ativação linear. A Figura 19 ilustra os valores dos MSEs e a diferença absoluta de tais valores (Diferença) para todos os casos de teste do canal 1. O caso de teste selecionado é indicado através da circunferência tracejada verde.

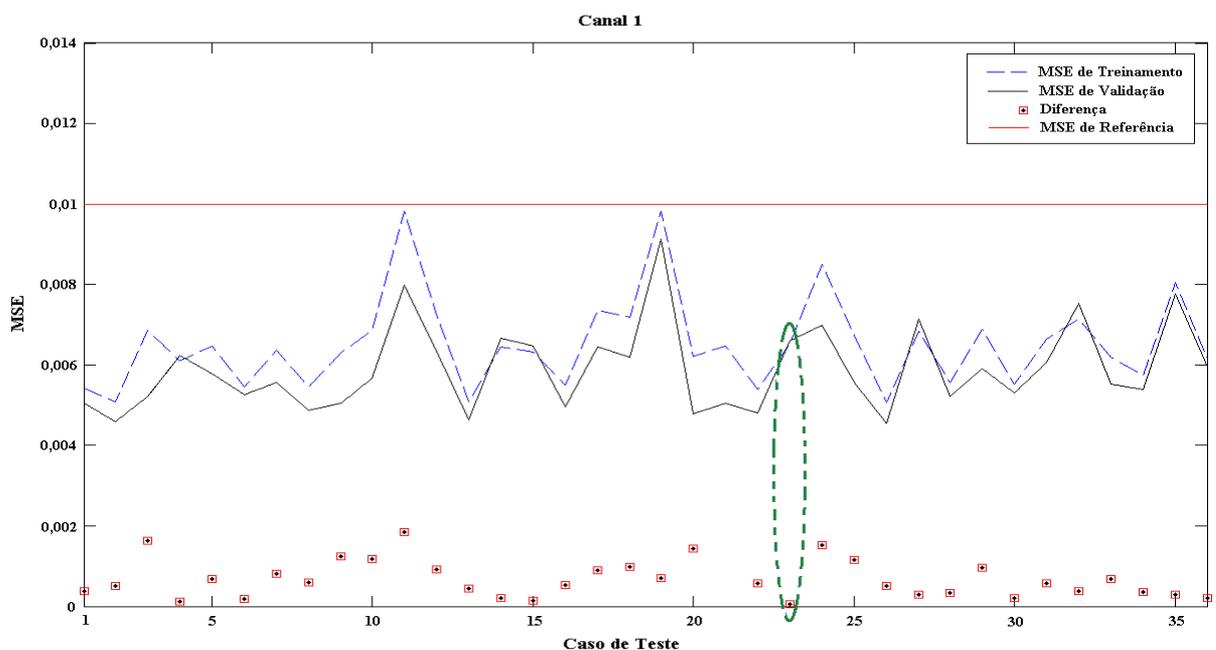


Figura 19 - Avaliação dos casos de teste do canal 1

A Tabela 12, em anexo, apresenta as 36 diferentes topologias de RNA avaliadas para o canal 2 e seus respectivos valores de MSEs. Baseados nos critérios de seleção definidos anteriormente, a topologia escolhida para a previsão do padrão de uso do canal 2 foi a 23, que consiste de 30 neurônios com função de ativação Tansig na camada escondida e taxa de aprendizado de 0,045, além dos parâmetros adotados iguais em todos os casos. A Figura 20 ilustra as medidas de desempenho (MSEs e Diferença) dos casos de testes relativos ao canal 2.

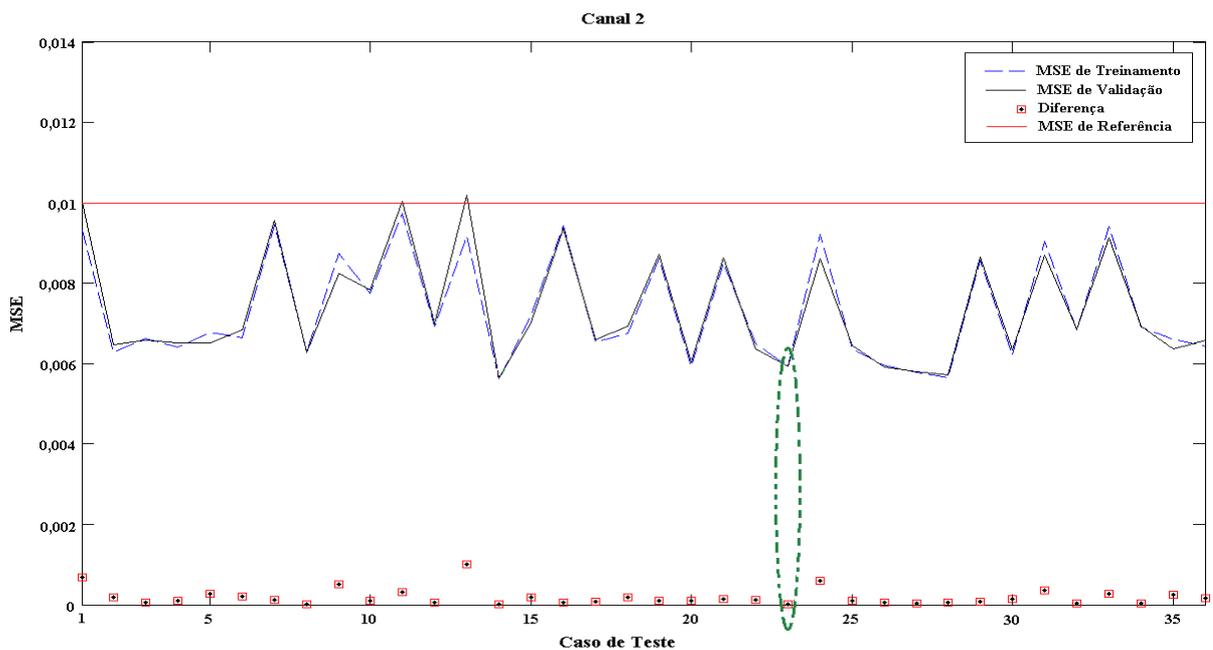


Figura 20 - Avaliação dos casos de teste do canal 2

Para o canal 3, a Tabela 13, em anexo, exibe todos os 36 casos de testes avaliados e suas medidas de desempenho, MSEs e diferença absoluta dos MSEs de treinamento e validação. O caso de teste 17 foi que obteve resultados mais satisfatórios, baseado nos critérios de seleção definidos anteriormente. Ele representa uma RNA com topologia consistindo de 15 neurônios com função de ativação Tansig na camada escondida e taxa de aprendizagem de 0.045.

A Figura 21 exibe os resultados de desempenho dos casos de teste avaliados para o canal 3. Como se observa nesta figura, apenas uma topologia de RNA conseguiu atender aos critérios (I) e (II) simultaneamente, a qual está representada pelo caso de teste 17. Esta topologia foi a escolhida para compor o módulo de previsão do esquema e está destacada na Figura 21.

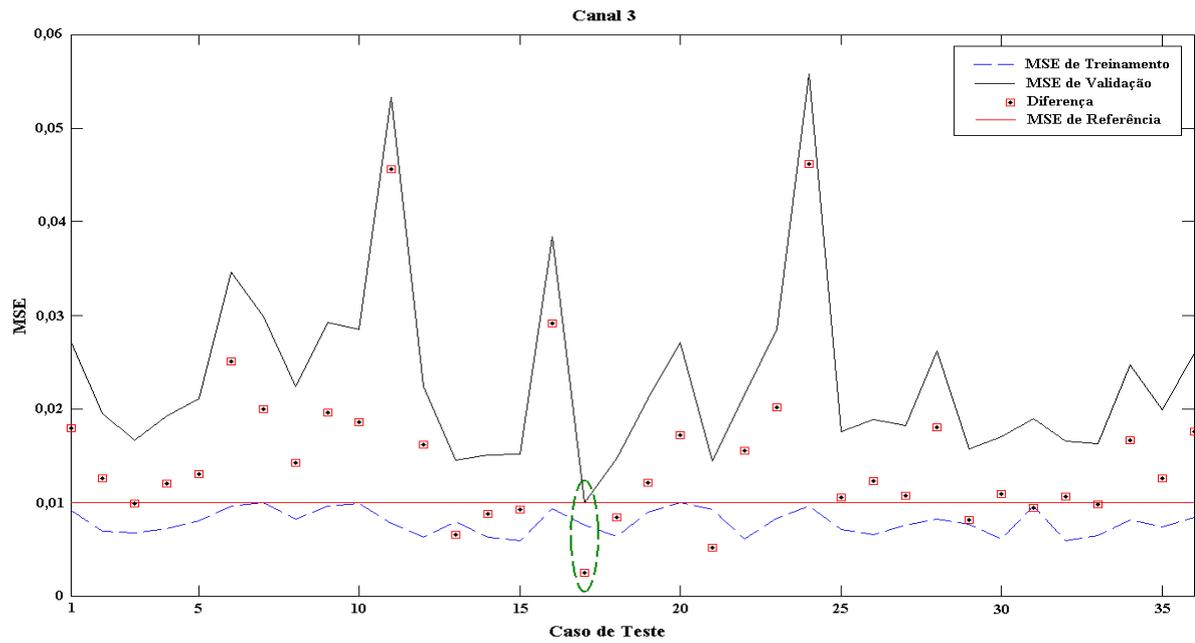


Figura 21- Avaliação dos casos de teste do canal 3

Os casos de testes para o canal 4 e medidas de seus desempenhos estão apresentados na Tabela 14, em anexo. Para este canal, a topologia consistindo de cinco neurônios com função de ativação Tansig na camada escondida e taxa de aprendizagem igual a 0,01 foi a que obteve melhor desempenho na avaliação dos casos de teste. A Figura 22 ilustra o desempenho dos casos de testes e destaca o que foi selecionado: o primeiro.

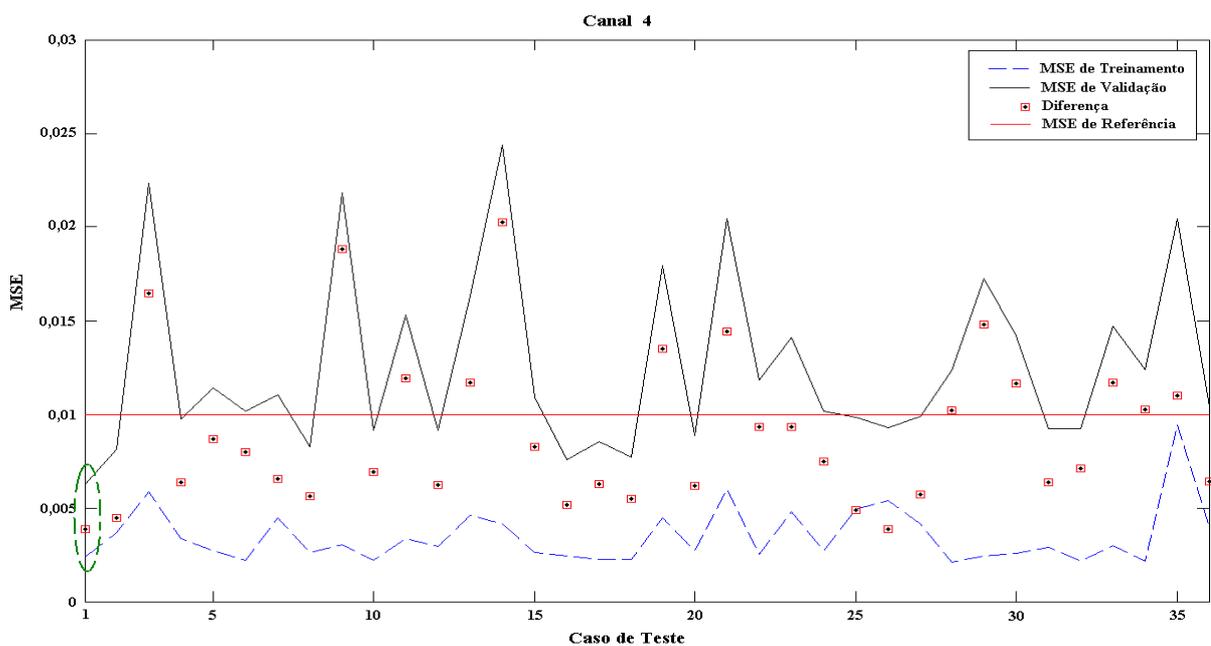


Figura 22- Avaliação dos casos de teste do canal 4

Na Tabela 15, em anexo, são apresentados os casos de teste avaliados para o canal 5. Para este canal, a RNA selecionada foi a 25, a qual é composta de cinco neurônios com função de ativação Tansig na camada oculta e taxa de aprendizado igual a 0,1. Além disso, ela é formada pelos valores constantes para todas as topologias avaliadas que são: dois neurônios na camada de entrada e um neurônio na camada de saída com função de ativação linear.

A Figura 23 exibe os resultados do MSEs, de treinamento e validação, dos casos de testes avaliados para o canal 5. Ela indica o canal de teste selecionado para compor o esquema de *handoff* de espectro proposto.

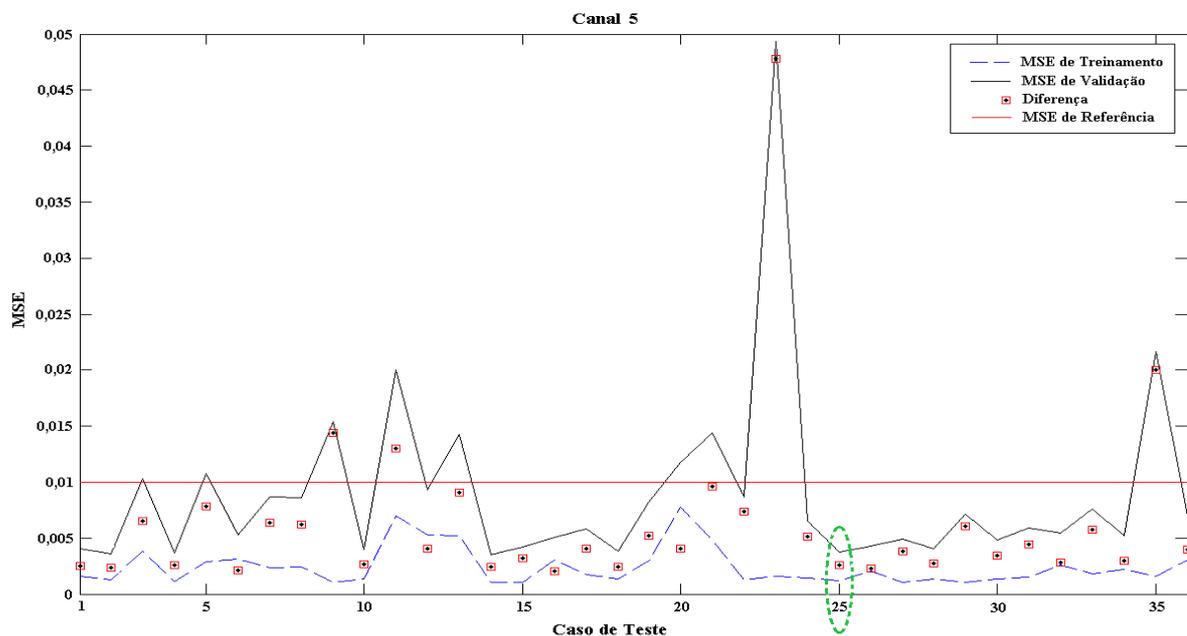


Figura 23- Avaliação dos casos de teste do canal 5

Com base nos resultados apresentados na Figura 23, o caso de teste 25 foi selecionado para compor o esquema de *handoff* de espectro proposto. Esta escolha foi baseada na menor diferença entre o MSE de Treinamento e o MSE de Validação, além de estar abaixo do MSE de Referência. A Figura 24 ilustra os resultados de desempenho obtidos e identifica o caso de teste selecionado.

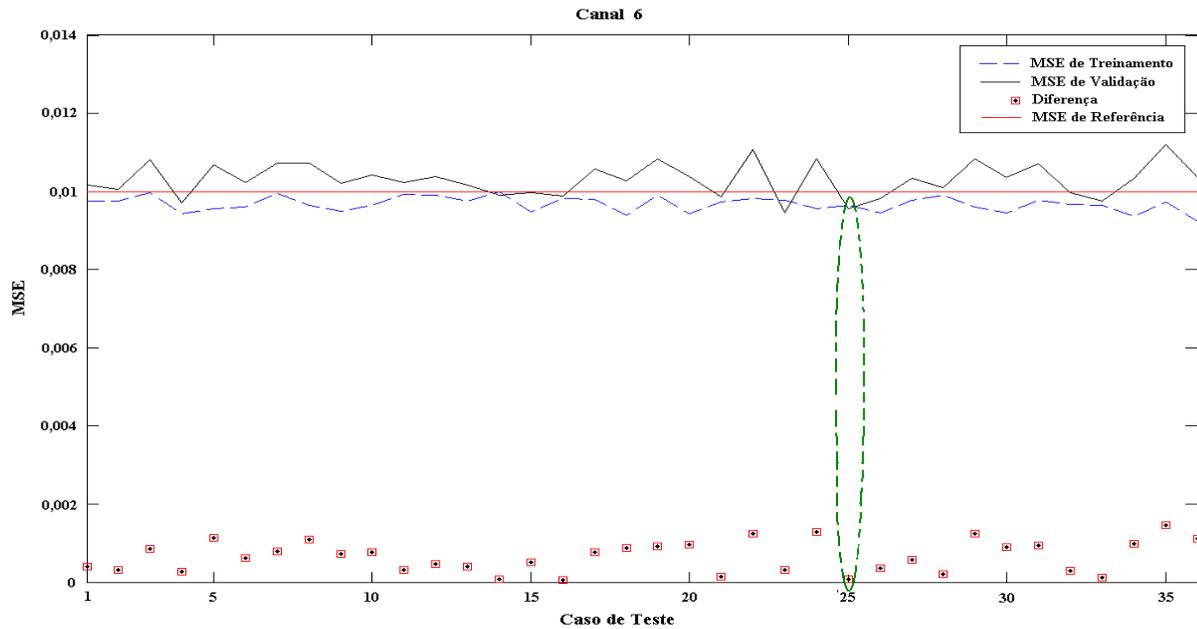


Figura 24- Avaliação dos casos de teste do canal 6

As topologias de RNAs avaliadas para prever o comportamento do canal 7 são sumarizadas na Tabela 17, em anexo. Para este canal, a topologia consistindo de 15 neurônios com função de ativação Tansig na camada oculta e taxa de aprendizado de 0,1 foi a que obteve melhor desempenho, baseado nos critérios adotados na avaliação. A Figura 25 exibe os resultados de desempenho para os casos de teste do canal 7, identificando o caso de teste relativo a RNA selecionada, a 29^a.

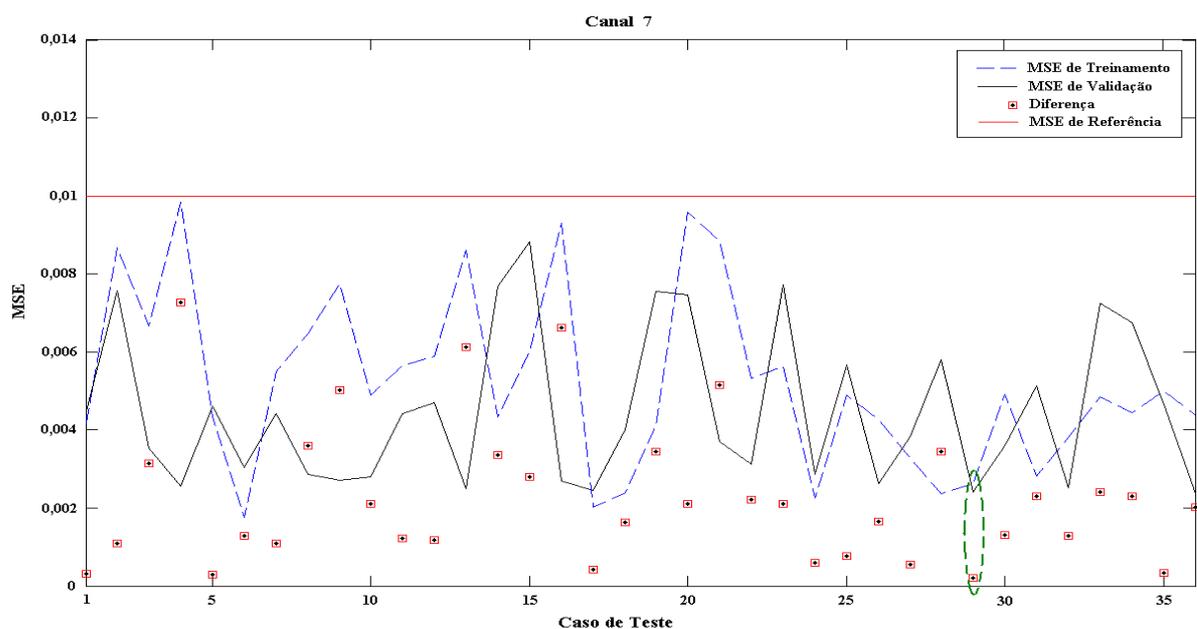


Figura 25- Avaliação dos casos de teste do canal 7

As topologias RNAs avaliadas para o canal 8 e medidas de seus desempenhos estão apresentadas na Tabela 18, em anexo. A RNA selecionada para compor a estrutura de previsão, relativa ao canal 8, é formada por 20 neurônios com função de ativação Tansig na camada oculta e uma taxa de aprendizado de 0,045. A Figura 26 ilustra o desempenho de todos os casos de teste avaliados para o canal 8 e destaca 19º, que foi o selecionado.

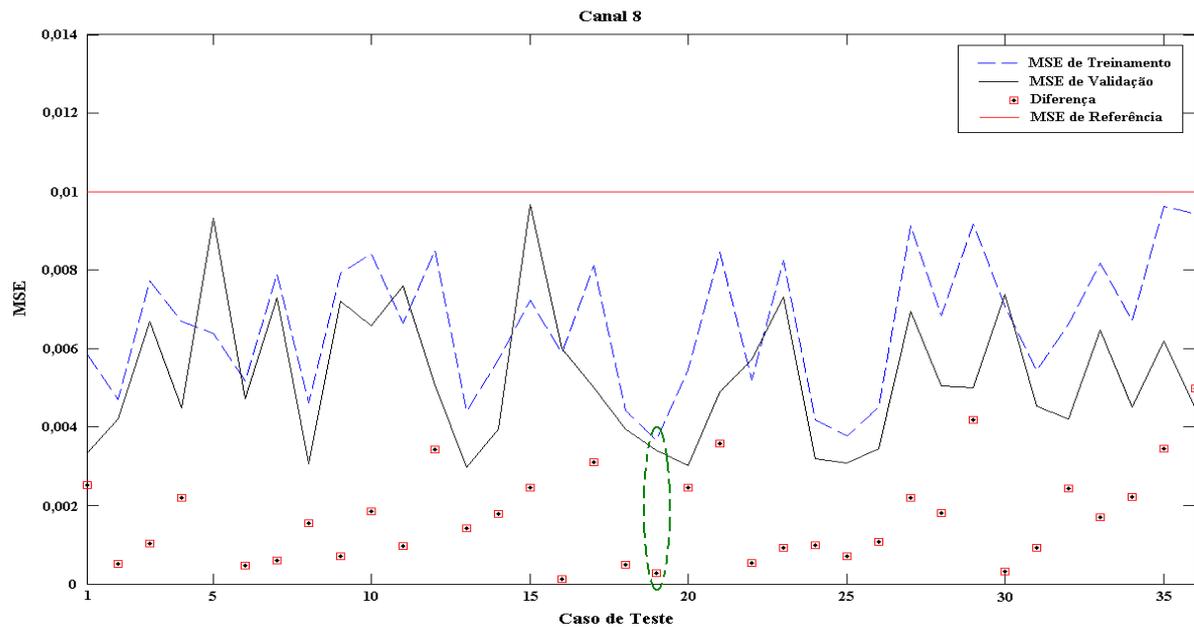


Figura 26- Avaliação dos casos de teste do canal 8

Para o último canal a ser adotado neste estudo, a Tabela 19, em anexo, apresenta as 36 RNAs avaliadas a fim de selecionar a que apresentar melhor desempenho na previsibilidade do padrão de uso do canal 9. Os resultados de MSEs e diferença absoluta deles estão dispostos nesta tabela. Avaliando os resultados, o caso de teste selecionado foi 13º, conforme se observa no gráfico de desempenho mostrado na Figura 27. Este caso refere-se uma RNA composta de 5 neurônios com função de ativação Tansig na camada oculta e taxa de aprendizado igual a 0,045. Além dos parâmetros iguais para todas as topologias avaliadas, que são: dois neurônios na camada de entrada e um neurônio com função de ativação linear na camada de saída.

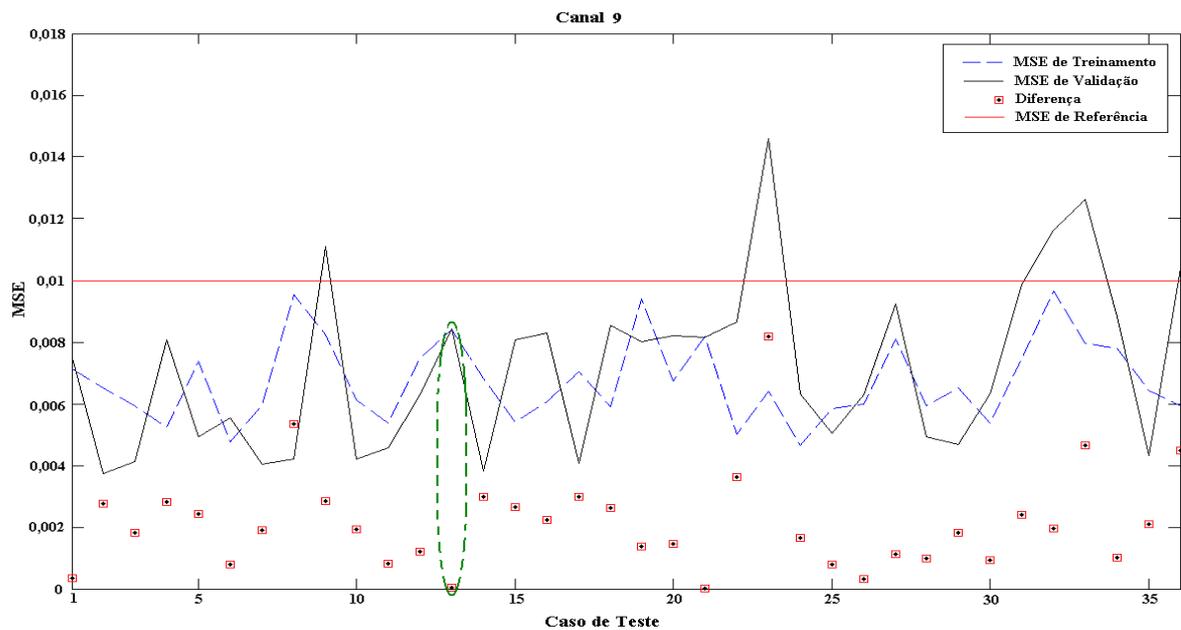


Figura 27- Avaliação dos casos de teste do canal 9

A Tabela 4 sumariza as topologias das redes neurais artificiais selecionadas para compor a estrutura de previsão da estratégia para *handoff* de espectro em redes baseadas em rádio cognitivo proposta.

Tabela 4 – Topologias das RNAs selecionadas

Canal	Neurônios de entrada	NNO	FNO	Neurônios de saída	Função de ativação dos neurônios de saída	η
1	2	10	Logsig	1	Linear	0,01
2	2	5	Logsig	1	Linear	0,045
3	2	15	Tansig	1	Linear	0,045
4	2	5	Tansig	1	Linear	0,01
5	2	5	Logsig	1	Linear	0,01
6	2	5	Tansig	1	Linear	0,1
7	2	15	Tansig	1	Linear	0,1
8	2	5	Tansig	1	Linear	0,045
9	2	5	Tansig	1	Linear	0,045

Resultados adicionais das topologias selecionadas serão descritos no Capítulo 6.

5.2.2 Estrutura de Decisão

Como citado anteriormente, a estrutura de decisão visa selecionar o melhor canal a ser utilizado de modo oportunista pelo US, para iniciar ou retomar a sua comunicação e, então, disparar o *handoff* de espectro.

Nesta abordagem, a identificação de disponibilidade de canal se dará com base na idéia adotada no método de detecção de energia. Neste método, o nível de potência de cada canal é avaliado em relação a um determinado limiar, referenciado como *Incumbent Detection Threshold* (IDT) (CORDEIRO, 2006). Ademais, devido a possíveis erros inerentes ao processo de previsão, utiliza-se o conceito de margem de segurança na avaliação de disponibilidade do canal, o qual é tomado em relação ao IDT. Com isso, no esquema proposto, para aferir se em um dado canal há a presença ou não do usuário primário, avalia-se o nível de potência estimado para o canal, pela estrutura de previsão, em relação a um novo limiar, IDT_F . Este limiar considera um fator de segurança (F) em sua definição. Tal abordagem visa proporcionar robustez à estratégia em relação aos erros de predição, que podem ocasionar falha na decisão e, conseqüentemente, interferência à comunicação licenciada, por exemplo.

A Figura 28 ilustra a utilização do fator de segurança na indicação de disponibilidade de canal. Para intervalos de tempo Δt_1 e Δt_2 o canal em questão é considerado ocupado, baseado nos valores preditos, pois seu nível de potência é superior a IDT_F . Para a escolha do fator de segurança, realizaram-se vários testes adotando distintos valores para F , os quais serão descritos no Capítulo 6.

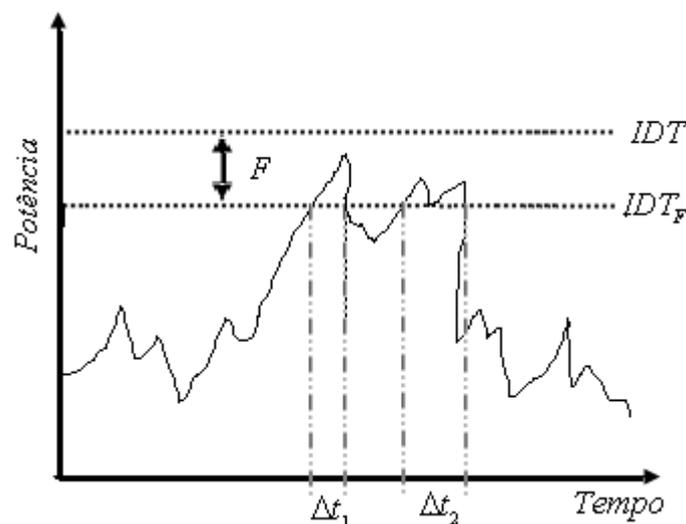


Figura 28 – Avaliação de disponibilidade do canal utilizando fator de segurança

Dada a futura indisponibilidade do canal atual, o RC selecionará para continuar a sua comunicação, aquele canal que apresentar melhor estimativa de disponibilidade para o instante seguinte, ou seja, menor valor de potência estimado. Este valor deve estar abaixo do limiar IDT_F . Caso contrário, o RC aguardará, sem transmitir, até a estimativa de canal livre para retomar a sua comunicação.

Com o intuito de minimizar o número de *handoffs*, que degrada a comunicação do US, utiliza-se nesta abordagem o conceito de *handoff* de espectro obrigatório, o qual foi descrito na Seção 3.5. Segundo este conceito, o US apenas trocará de canal, caso a estimativa futura para o canal atual indique que ele estará ocupado, de acordo com a idéia apresentada na Figura 28

5.2.3 Dados Utilizados na Avaliação da Estratégia

O cenário adotado na avaliação da estratégia proposta é composto de canais situados na faixa de frequência que vai de 450 MHz a 500 MHz. Esta faixa pertence ao setor do espectro destinado à banda de TV nos Estados Unidos e que está em processo de abertura de utilização através da tecnologia de rádio cognitivo. Os dados reais de sensoriamento de espectro utilizados, relativos à faixa de frequência referenciada acima, foram fornecidos pelo IEEE Dyspan 2008 (DYSPAN, 2008).

Devido às características de largura de banda dos valores medidos, considera-se como usuário licenciado o sinal de microfone sem fio, que também possui concessão de utilização desta faixa espectral. Em vista disso, adotou-se como limiar de detecção de usuário primário, IDT , o definido pelo padrão IEEE 802.22 para sinais de microfones sem fio (CORDEIRO et. al, 2006). Ademais, a largura de bandas de tais sinais é de 200 kHz, conforme definido no padrão IEEE 802.22.

Na avaliação, foram utilizados nove canais de comunicação com características descritas acima, cujos comportamentos podem ser observados nas Figuras 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36 e 37. No entanto, esta abordagem é totalmente extensível para mais canais, conforme visto na Figura 18. O total de amostras de sensoriamento tomadas foram 4.152, obtidas com período de sensoriamento médio de 1,86s. No entanto, a simulação da estratégia e comparação com a abordagem

reativa utilizou 2998 amostras. A Tabela 5 sintetiza os parâmetros e dados utilizados no estudo da estratégia proposta.

Tabela 5 – Dados utilizados na avaliação da estratégia

Faixa de frequência	450 MHz à 500 MHz
Número de canais	9
Largura de banda dos canais	200 KHz
Usuário primário	Sinal de Microfone sem fio
IDT	-107 dBm
Número de amostras	4152
Período de sensoriamento	1,86s

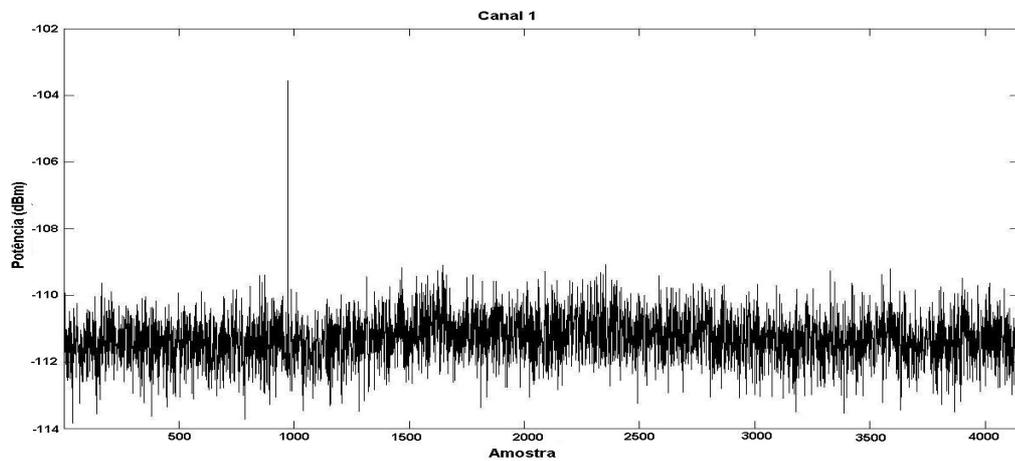


Figura 29 – Comportamento do canal 1

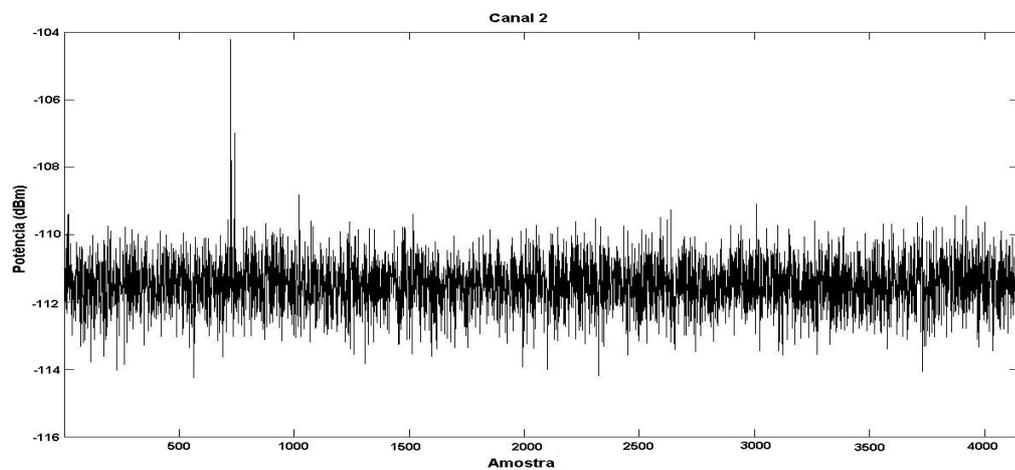


Figura 30 – Comportamento do canal 2

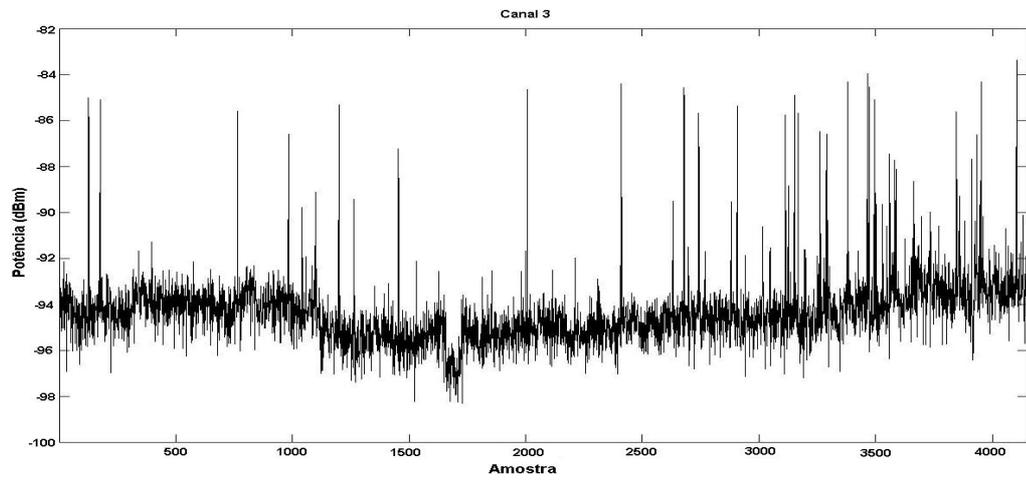


Figura 31 – Comportamento do canal 3

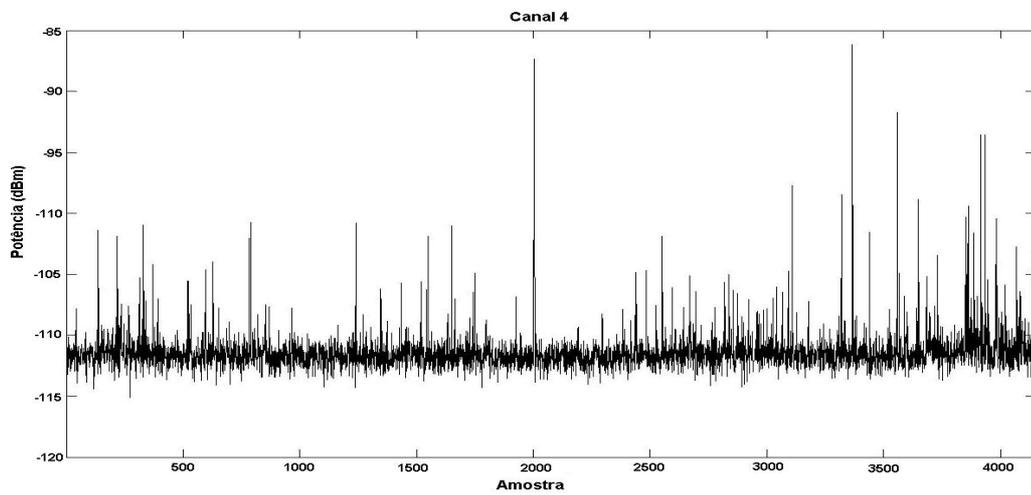


Figura 32 – Comportamento do canal 4

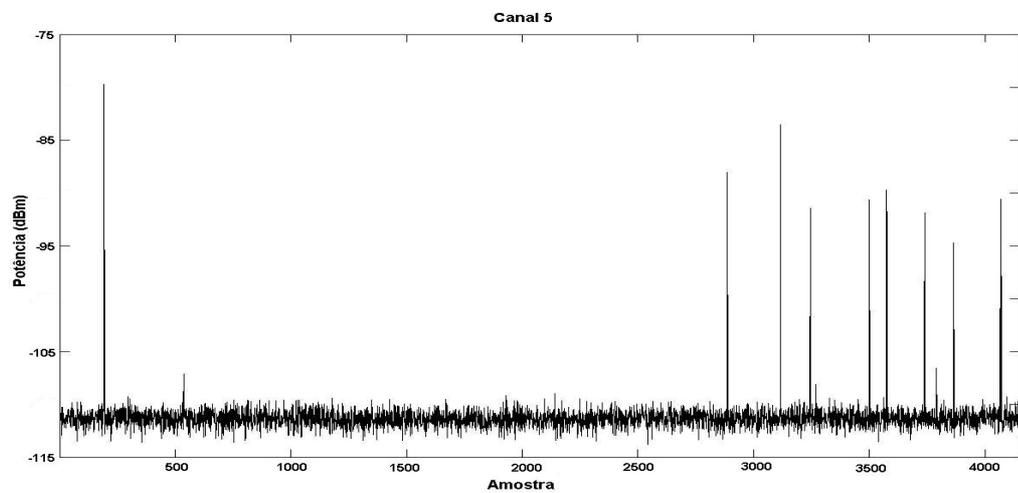


Figura 33 – Comportamento do canal 5

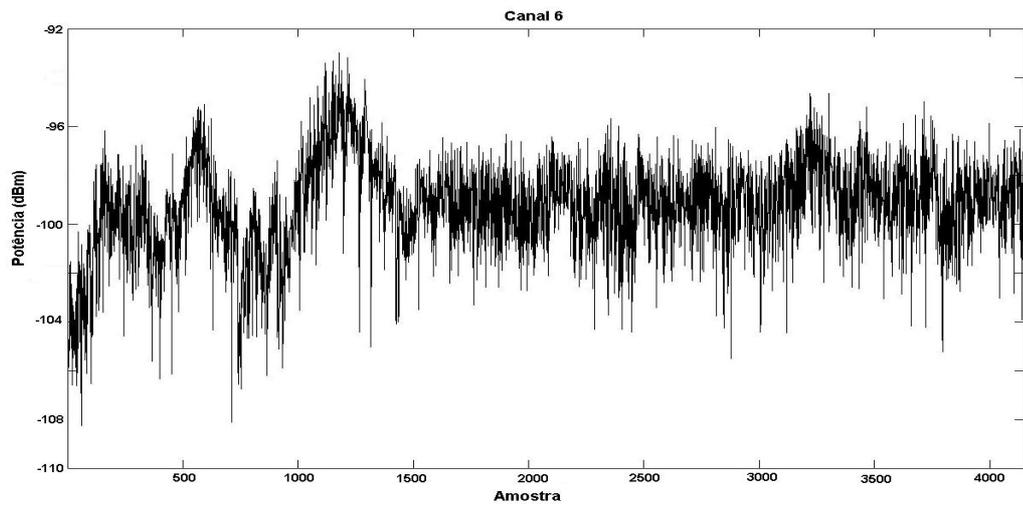


Figura 34 – Comportamento do canal 6

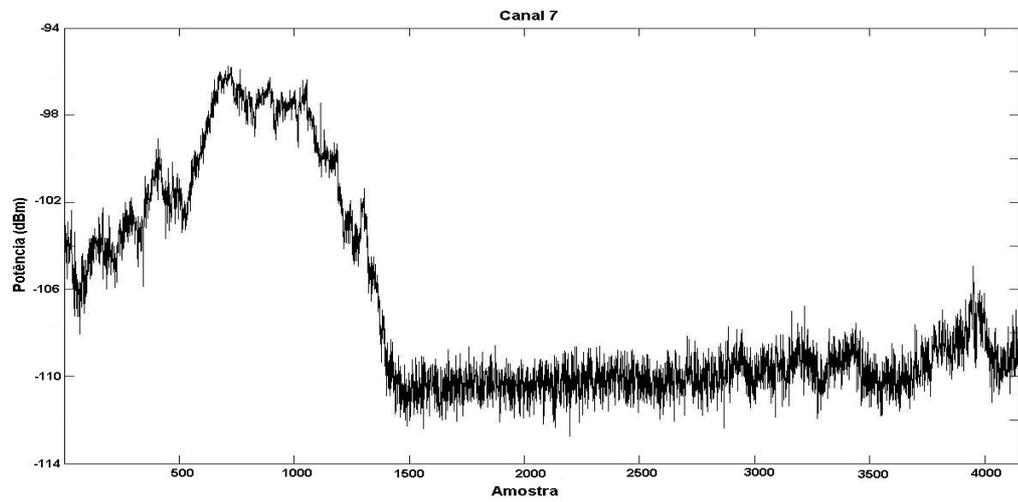


Figura 35 – Comportamento do canal 7

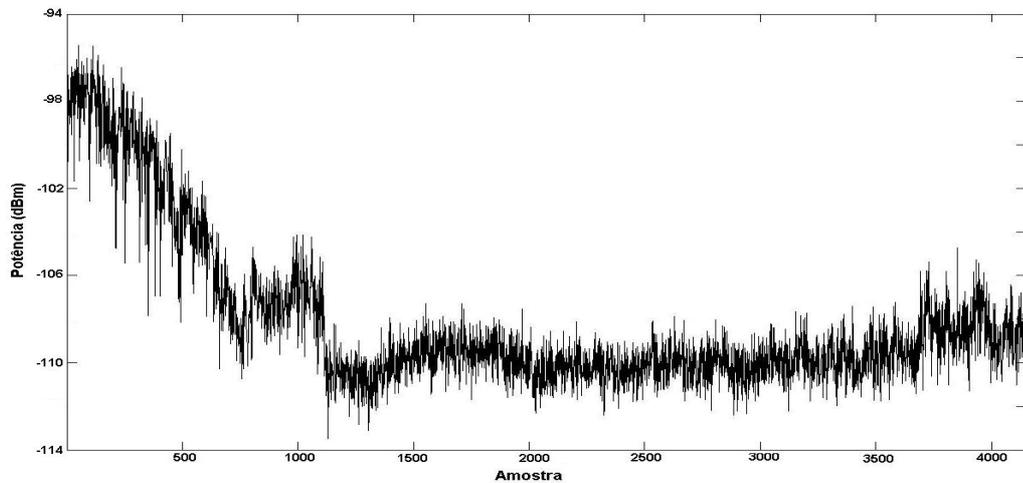


Figura 36 – Comportamento do canal 8

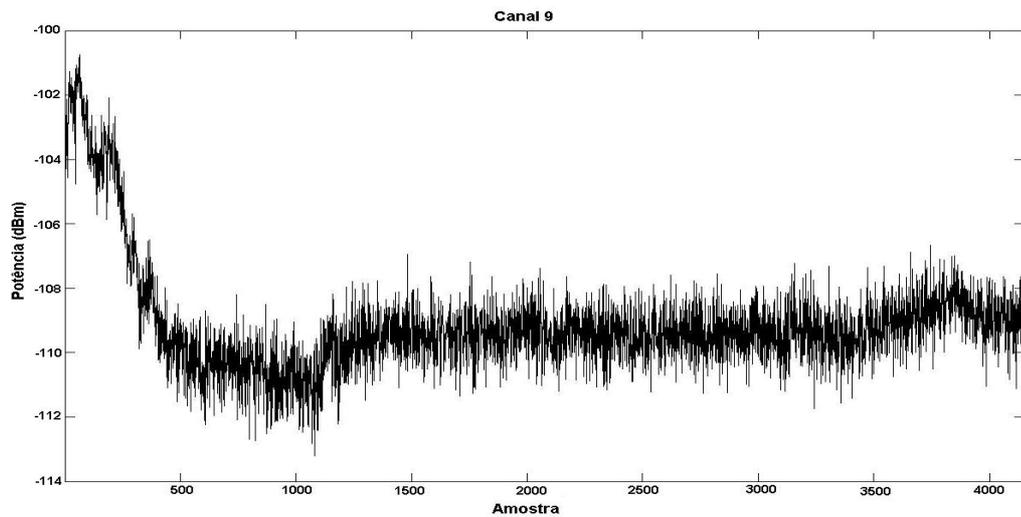


Figura 37 – Comportamento do canal 9

Nas figuras 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36 e 37, que exibem os comportamentos dos canais, nota-se que cada canal apresenta padrão de uso específico, de acordo com a utilização do usuário primário. Isso realça a característica dinâmica do ambiente espectral e mostra o cenário desafiador no qual a estrutura proposta será avaliada. Adicionalmente, esta diferença entre os padrões de uso dos canais ressalta a necessidade de utilização de uma topologia específica de RNA para estimar o comportamento de cada canal, com vista a se obter um melhor desempenho no processo de previsão.

Capítulo 6

Avaliação de Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos pela estrutura de previsão composta pelas RNAs, bem como os resultados da simulação da estratégia proposta, considerando os parâmetros e características descritas no Capítulo 5. O desempenho da proposta em termos de nível de interferência no UP, número de *handoffs* de espectro e utilização espectral é comparado com os obtidos por um esquema reativo. Para a implementação dos esquemas utilizou-se o *software* Matlab (MATHWORKS, 2010).

6.1 Avaliação da Estrutura de Previsão

Nesta Seção apresentam-se os resultados obtidos pela estrutura de previsão, composta pelas RNAs, cujas topologias foram definidas no Capítulo 5. Os resultados de desempenho de cada RNA, tanto no processo de treinamento quanto de validação para o canal correspondente, são apresentados na Tabela 6.

A avaliação da topologia utilizada nas RNAs e justificativa da sua escolha são baseadas nos critérios (I) e (II), definidos no capítulo anterior, levando em consideração a obtenção de resultados satisfatórios e uma estrutura de complexidade razoável.

As amostras utilizadas na simulação foram divididas em dois grupos: treino e validação. Sendo 3.000 (70%) amostras utilizadas no processo de treino e 1.152(30%) no de validação. As amostras foram normalizadas no intervalo [0 1].

Como se observa nas Figuras 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45 e 46, as RNAs conseguiram na fase de treinamento aprender o comportamento dos canais utilizados. Esta aprendizagem pode ser inferida através dos valores de MSE_{treino} obtidos para cada RNA, os quais estão dispostos na Tabela 6. Nota-se que todas as RNAs conseguiram valor de MSE_{treino} menor que o de referência definido. Isso mostra a capacidade de cada RNA, com a topologia adotada, em aprender as características subjacentes ao comportamento dos canais.

Na validação, um conjunto de dados de validação foi apresentado às RNAs e os resultados mostram que elas conseguiram generalizar o comportamento dos canais de forma satisfatória. Para todas as redes neurais artificiais obtiveram-se valores de MSE_{valid} menores que o adotado como referência. Além disso, foi possível também atingir a satisfação do critério II. Os resultados obtidos no processo de validação são apresentados na Tabela 6. Com isso, os modelos de RNAs adotados podem ser utilizados para estimar o padrão de uso dos canais licenciados, possibilitando o acesso oportunista e proativo do espectro ao usuário secundário.

Tabela 6 – Resultados das RNAs

Canal	MSE_{treino}	MSE_{valid}	$MSE_{treino} - MSE_{valid}$
1	0,006110608224039	0,006234768622196	0,000124160398157
2	0,005608391227137	0,005622662694605	0,000014271467468
3	0,007551002640976	0,0099872604722371	0,002436257831261
4	0,002375120788264	0,006263176315673	0,003888055527409
5	0,001248072708805	0,003617640965416	0,002369568256611
6	0,009647927557345	0,009565203268016	0,000082724289329
7	0,002618372747612	0,002407591208034	0,000210781539578
8	0,003657432658236	0,003394736716311	0,000262695941925
9	0,008390444849607	0,008431607788025	0,000041162938418

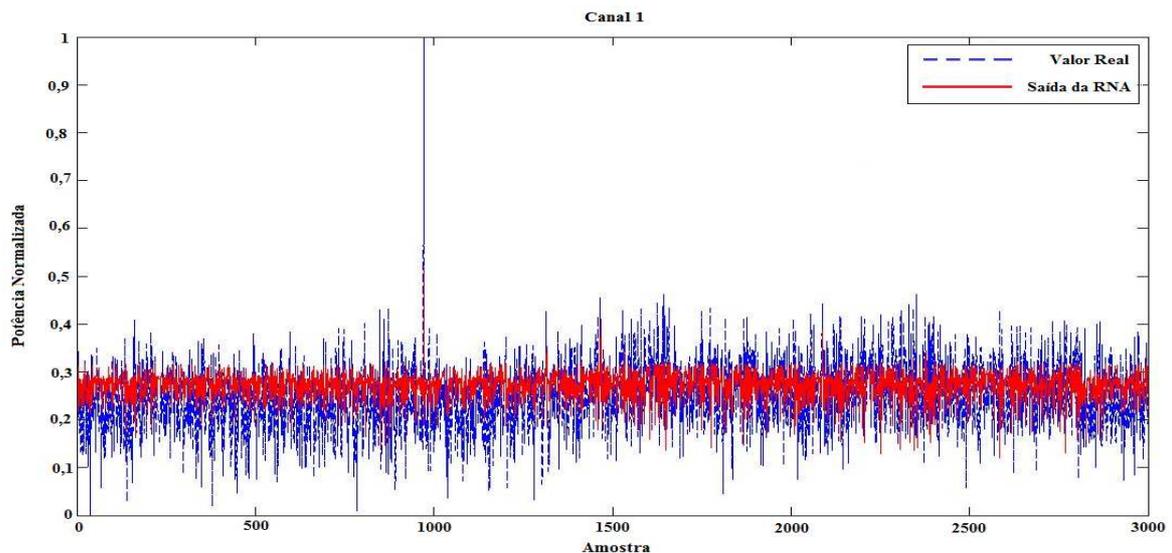


Figura 38 – Valor Real e Resposta da RNA para o canal 1

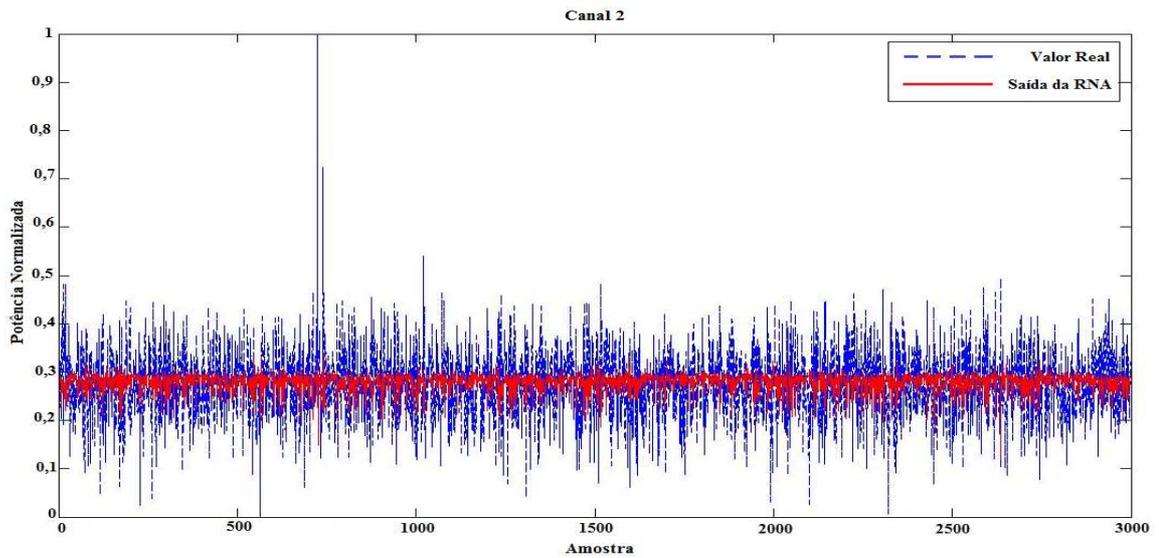


Figura 39 – Valor Real e Resposta da RNA para o canal 2

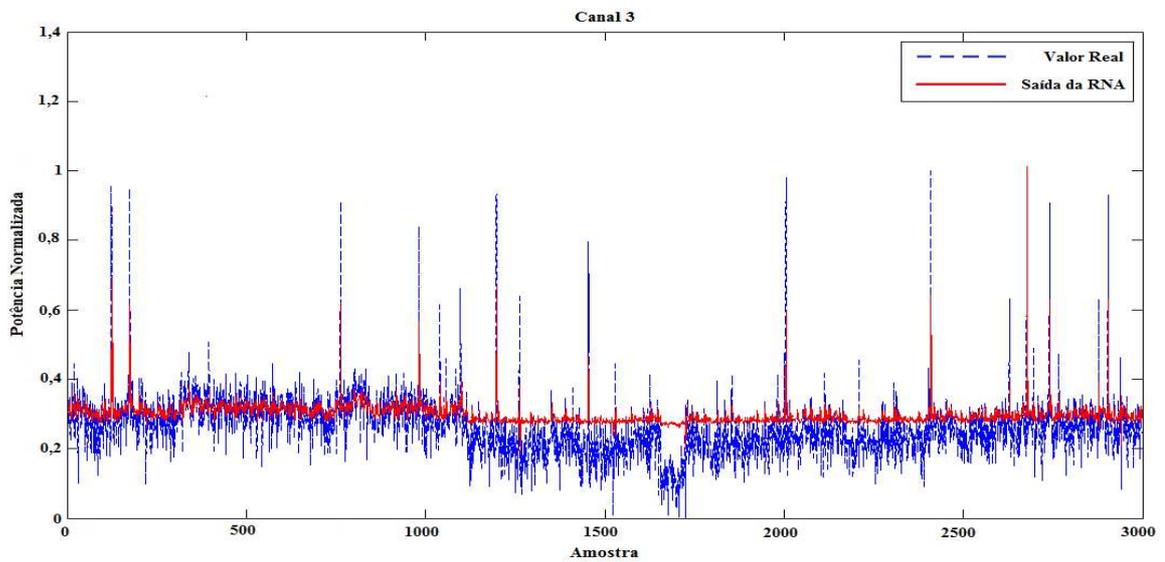


Figura 40 – Valor Real e Resposta da RNA para o canal 3

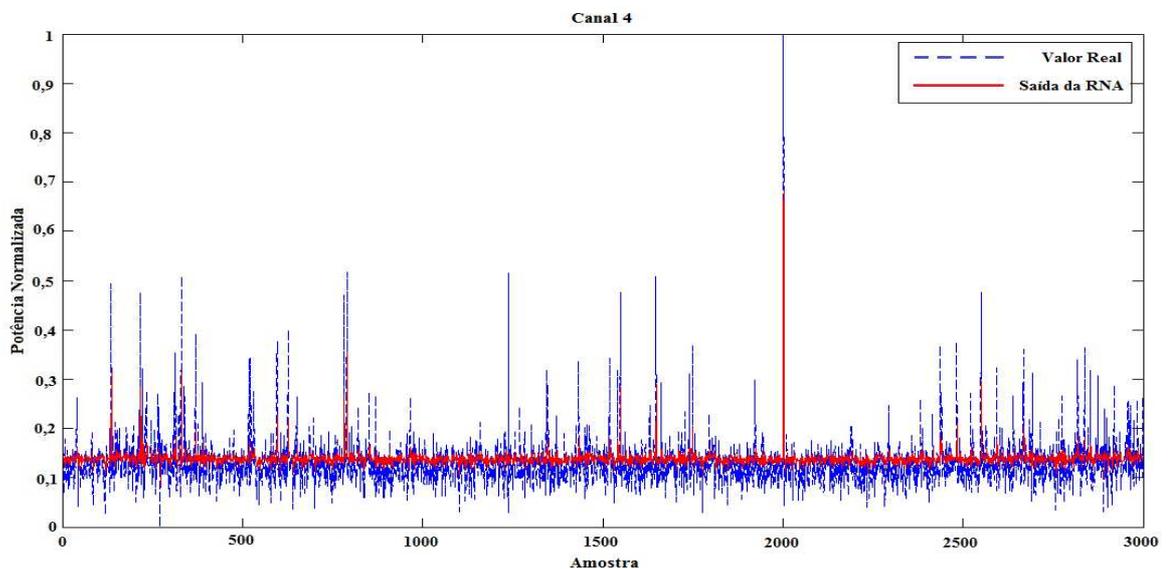


Figura 41 – Valor Real e Resposta da RNA para o canal 4

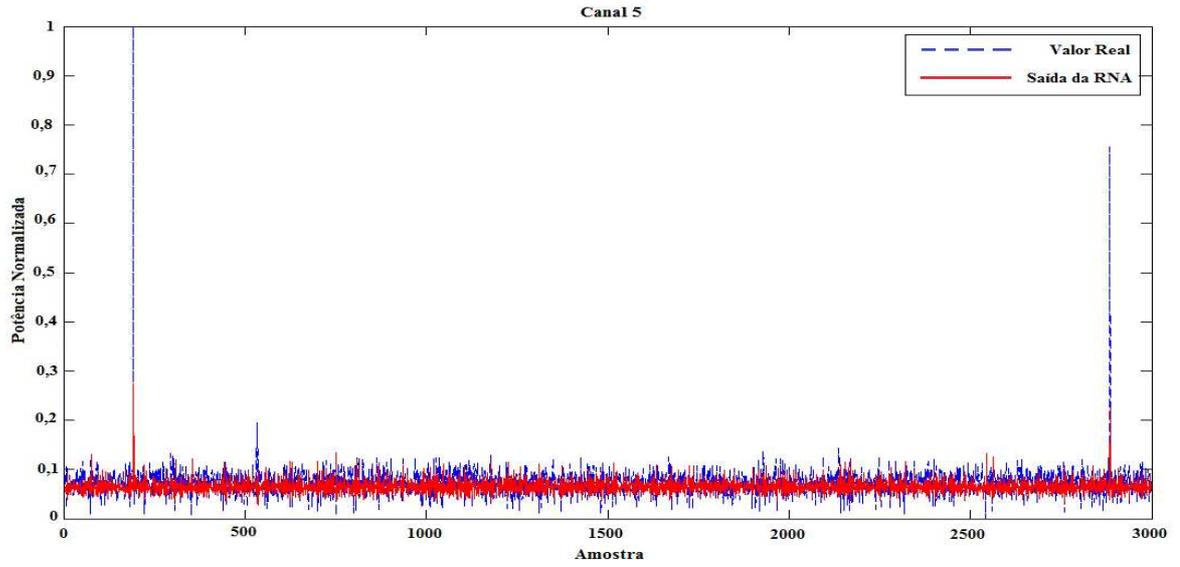


Figura 42 – Valor Real e Resposta da RNA para o canal 5

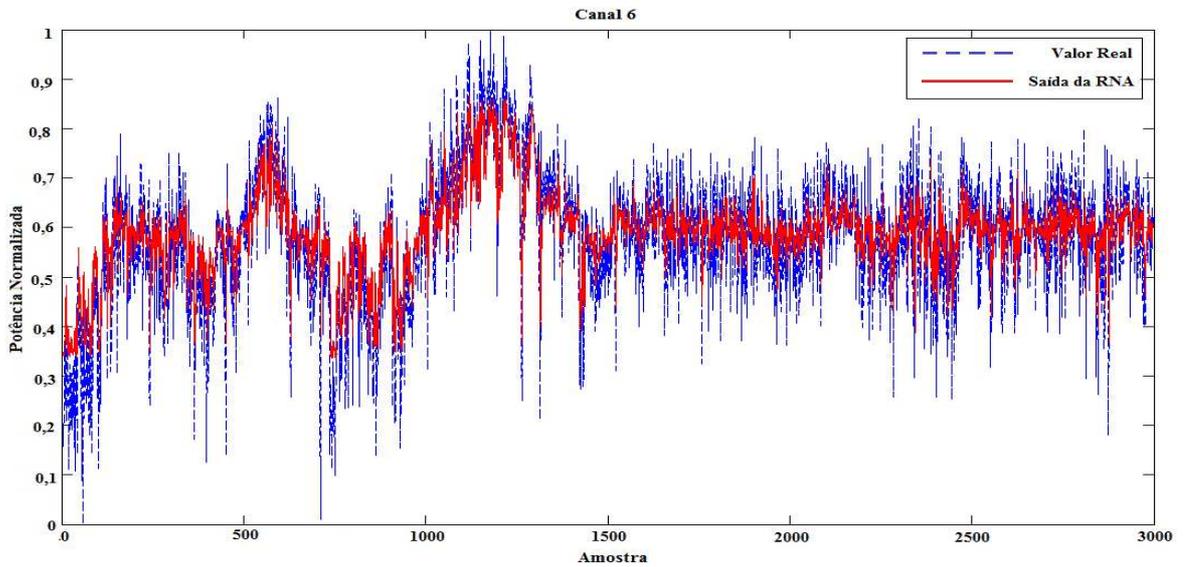


Figura 43 – Valor Real e Resposta da RNA para o canal 6

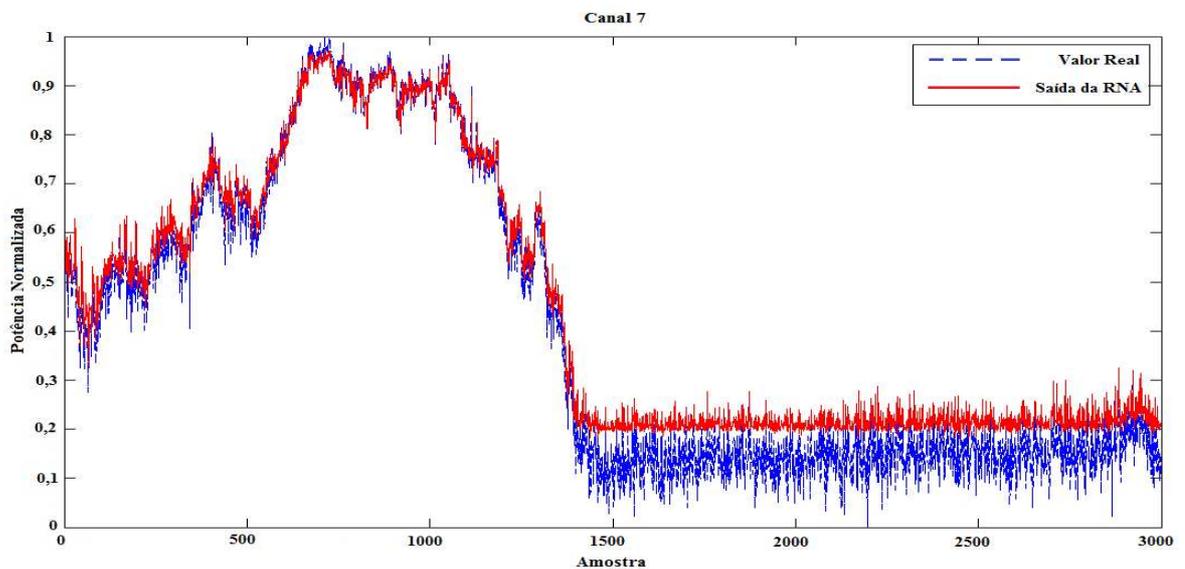


Figura 44 – Valor Real e Resposta da RNA para o canal 7

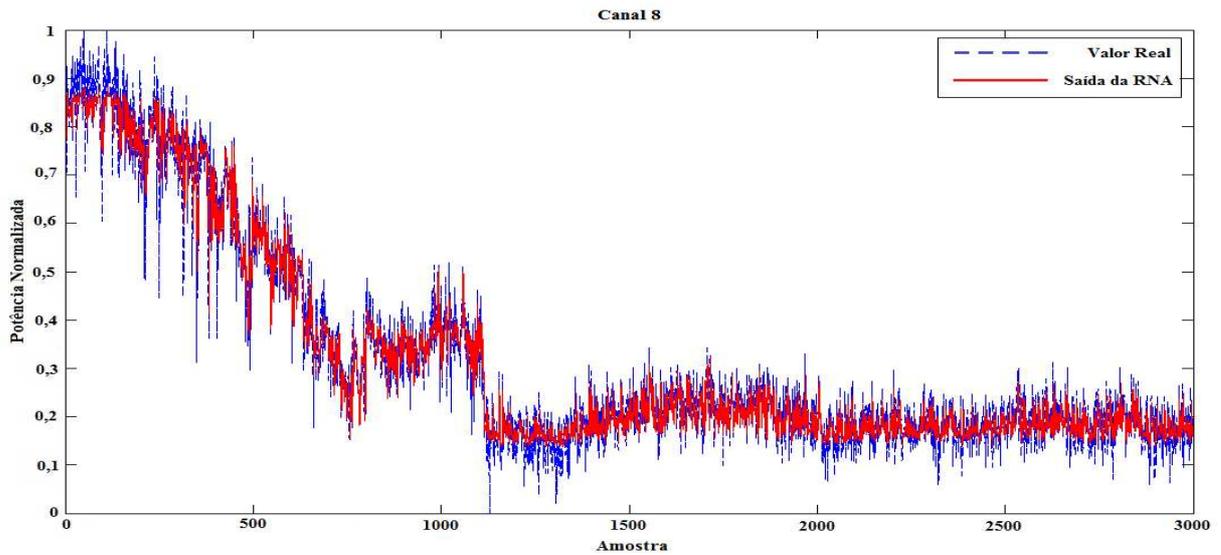


Figura 45 – Valor Real e Resposta da RNA para o canal 8

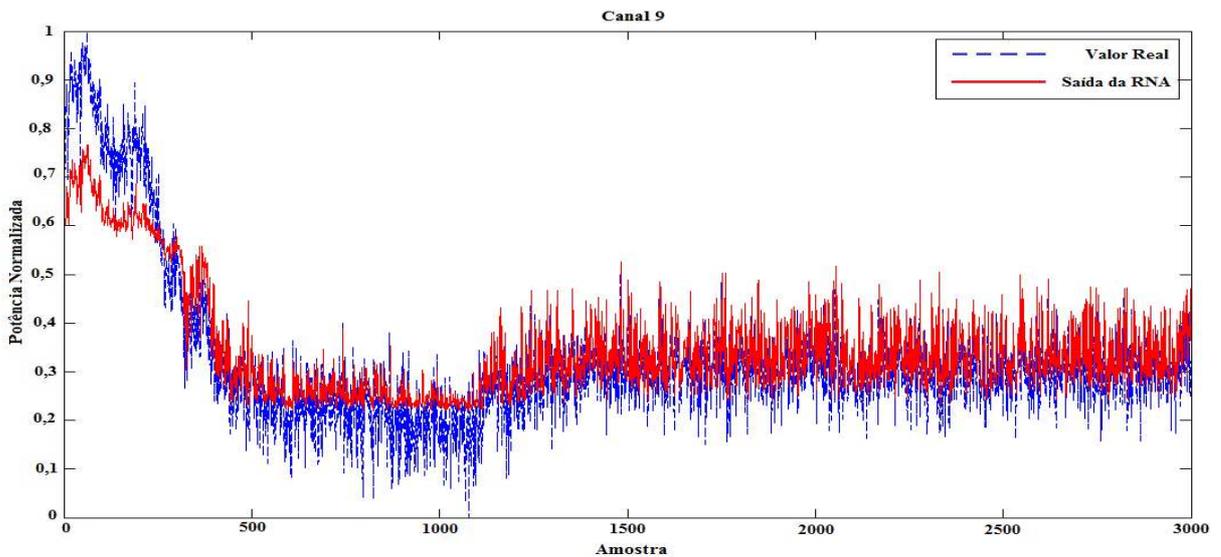


Figura 46 – Valor Real e Resposta da RNA para o canal 9

6.2 Métricas Analisadas

Para realizar a avaliação da abordagem proposta foram utilizadas três métricas na análise. A primeira é quantidade de interferência gerada pelo usuário secundário na operação do usuário primário. A análise desta métrica é de grande importância, já que um dos requisitos da utilização oportunista do espectro licenciado pelo rádio cognitivo é a minimização da interferência ao usuário primário, detentor de licença de utilização de tal faixa.

Outra métrica adotada é a taxa de utilização do espectro pelo usuário secundário, que recobre outra justificativa preponderante da utilização de RC em sistemas de comunicação sem fio, que é proporcionar uma melhor eficiência espectral. Tal utilização, do ponto de vista do usuário secundário, é dada pela Equação 6, que é a relação entre o tempo que o usuário secundário realiza a sua transmissão pelo somatório de tal tempo com o tempo que ele fica sem realizar transmissão.

$$U_{us} = \frac{\textit{tempo_transmitindo}}{\textit{tempo_sem_transmitir} + \textit{tempo_transmitindo}} \quad (6)$$

A terceira métrica utilizada na avaliação refere-se ao número de *handoffs* de espectro realizados pelo US. Esta métrica tem impacto na garantia de QoS da aplicação secundária, pois quanto maior o número de *handoffs*, mais recursos e tempo do sistema serão requeridos. Isto pode provocar a degradação da comunicação não-licenciada.

A avaliação da estratégia proposta, com base nas métricas apresentadas anteriormente, será realizada em comparação ao mecanismo que realiza *handoff* de espectro reativo, o qual foi referenciado no Capítulo 5.

6.3 Cenários de Simulação

Esta Seção apresenta os cenários de simulação adotados na avaliação do esquema proposto.

Para mostrar a generalidade da nossa estratégia, adotamos três instâncias de simulação, que diferem quanto ao número de canais, as quais apresentam quatro, seis e nove canais. A Tabela 7 apresenta as características de cada instância de simulação adotada no estudo.

O ambiente de simulação é composto por um usuário secundário e quatro, seis ou nove usuários primários, de acordo com a instância de simulação, cujo comportamento de uso do espectro foi mostrado na Seção 5.1.3. Neste caso, o US buscará utilizar os canais licenciados de forma oportunista para realizar a sua comunicação. A abordagem proposta é extensível para mais USs, onde o gerenciamento de alocação do espectro pode ser realizado através de uma entidade, estação base, por exemplo, ou através de trocas de mensagens entre os

USs, em um modo descentralizado. Para a detecção do sinal do usuário licenciado, a rede secundária é formada por nós sensores, além do nó que realiza a comunicação do usuário secundário.

Tabela 7 – Instâncias de simulação

Instância	Nº de canais	Canais
1	4	1,2,3,4
2	6	1,2,3,4,5,6
3	9	1,2,3,4,5,6,7,8,9

Durante o *handoff* de espectro tem-se um atraso associado à troca de canais. Neste estudo, o tempo definido para este atraso foi de 0,01s, similar ao definido em Yang et, al (2007).

6.4 Determinação do Fator de Segurança (F)

Para definir o fator de segurança a ser adotado no esquema proposto, realizaram-se diversos testes variando o valor de tal fator, em dBm, no intervalo de 0 a 3, com incremento de 0,5, avaliando o seu impacto no desempenho da estratégia, em cada instância de simulação, no que diz respeito às métricas adotadas no estudo: número de *handoffs* de espectro, utilização espectral do US e interferência provocada no UP.

A Tabela 8 apresenta os resultados de utilização espectral obtidos em todas as instâncias de simulação de acordo com o fator de segurança adotado. Nesta tabela, nota-se que o esquema proposto apresentou valores de utilização próximos de 100% para todos os fatores de segurança avaliados, sendo que os fatores 1 e 1,5 foram que apresentaram os melhores resultados. Além disso, nota-se que a partir de 1,5, à medida que se aumenta o valor do fator de segurança, a utilização espectral decai suavemente, obtendo o menor valor na instância de simulação de nove canais, conforme ilustra o gráfico da Figura 47. Isto ocorre, pois com a elevação do fator de segurança, o US, possivelmente, realizará mais trocas de canais, como será mostrado em seguida. Bem como, existem situações em que o US, com o esquema proposto, prefere não realizar a sua transmissão, a fim de evitar uma possível interferência ao usuário primário.

Tabela 8 – Avaliação do fator de segurança quanto à utilização espectral

Fator	Utilização Espectral (%)		
	4 canais	6 canais	9 canais
0	99,9995	99,9995	99,9995
0,5	99,9995	99,9995	99,9995
1	99,9996	99,9996	99,9996
1,5	99,9996	99,9996	99,9996
2	99,9993	99,9989	99,9989
2,5	99,9980	99,9980	99,9980
3	99,9876	99,9874	99,9869

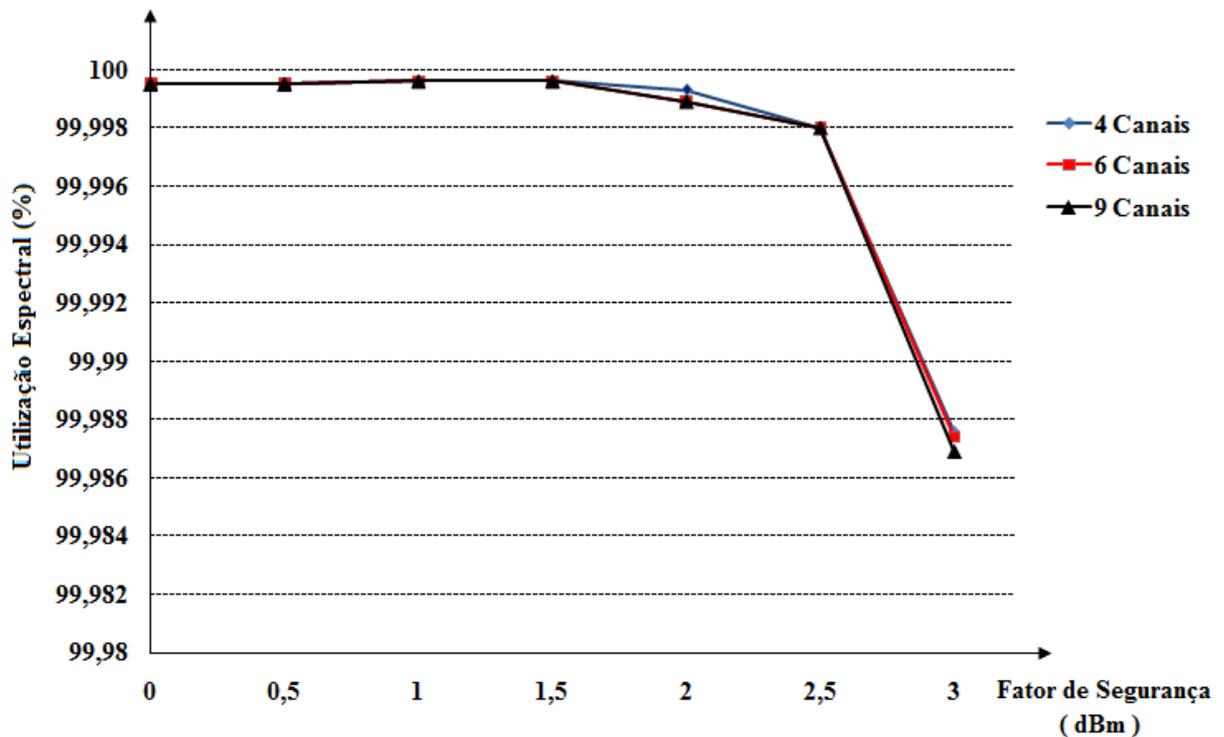


Figura 47- Influência do fator de segurança na utilização espectral

Quanto ao número de *handoffs* de espectro realizados pelo usuário secundário, a Tabela 9 sumariza os resultados obtidos pelo esquema proposto variando o fator de segurança. Nota-se que o menor número de *handoffs* de espectro é alcançado com o fator de segurança 1 ou 1,5. Para estes valores, o esquema proposto conseguiu realizar melhores decisões no momento da escolha do canal alvo, permanecendo nele por maior tempo e evitando *handoffs* de espectro desnecessários. Para valores de fator de segurança maiores que 1,5, o número de

handoffs de espectro aumenta, sendo mais expressivo com o fator de segurança igual a 3, conforme pode ser verificado no gráfico da Figura 48. Com o aumento no fator de segurança, menor será o tempo que em que os canais satisfarão o critério de disponibilidade, ou seja, nível de potencia abaixo do limiar IDT_F . Com isso o usuário secundário realizará mais troca de canais, com vista a ocupar o canal considerado disponível e evitar a interferência ao usuário licenciado. Além disso, nos casos onde se adota para o fator de segurança valor a partir de 2, o número de *handoffs* de espectro aumenta com o aumento do número de canais adotado na simulação, pois aumenta a possibilidade de canais alvo.

Esse aumento no número de trocas influencia a utilização espectral alcançada pelo usuário secundário, conforme verificado na Figura 47, onde se obteve menor utilização espectral utilizando o fator de segurança igual a 3.

Tabela 9 – Avaliação do fator de segurança quanto ao número de handoffs de espectro

Fator	Número de handoffs de espectro		
	4 canais	6 canais	9 canais
0	3	3	3
0,5	3	3	3
1	2	2	2
1,5	2	2	2
2	4	6	6
2,5	11	11	11
3	69	70	73

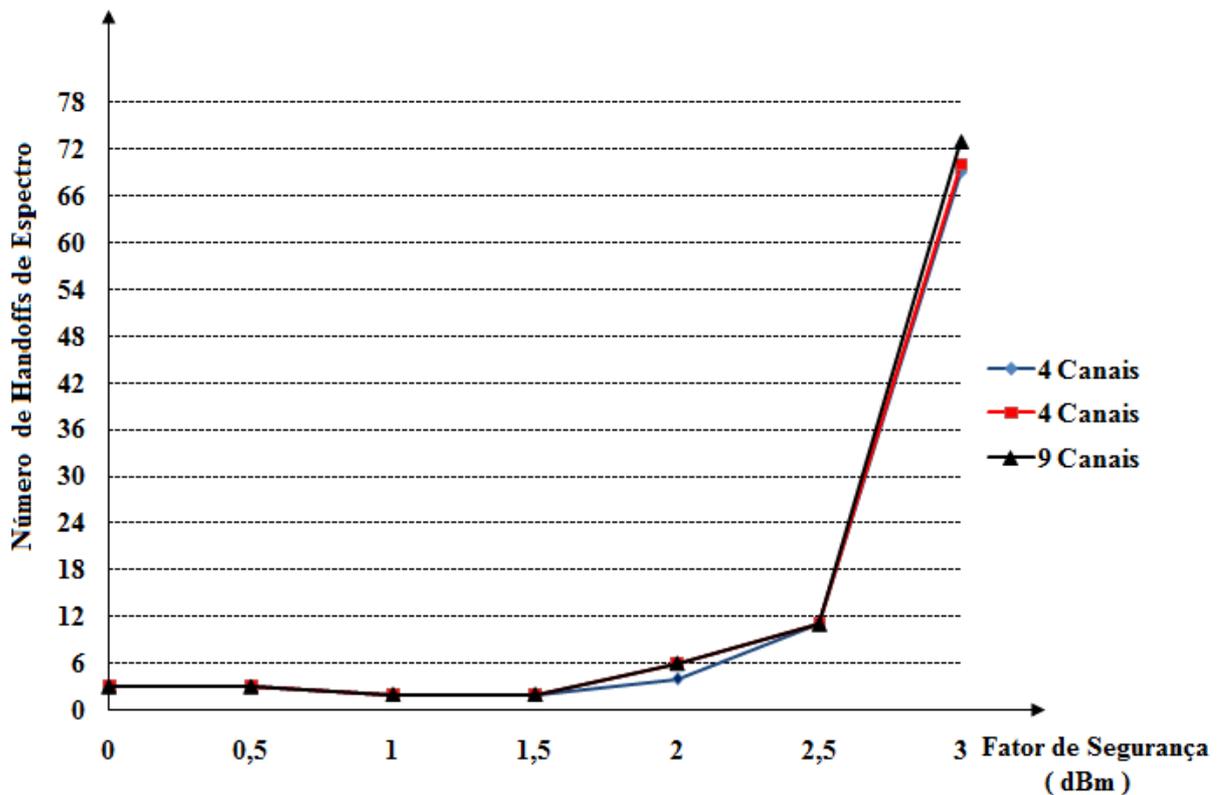


Figura 48- Influência do fator de segurança no número de handoffs de espectro

Em relação à terceira métrica avaliada, interferência provocada ao usuário primário, em todas as instâncias de simulação e valores de fator de segurança adotados, o esquema proposto não causou interferência na comunicação licenciada. Isto se deve ao bom desempenho do módulo de previsão, que proveu subsídios ao usuário secundário na escolha do melhor canal para realizar a sua transmissão, da estrutura proativa da abordagem, que realiza a troca de canais antes do retorno do usuário primário. Bem como da idéia adotada na tomada de decisão que prioriza a não interferência à comunicação licenciada, ao invés de realizar transmissão secundária com incerteza da disponibilidade do canal.

Diante dos testes realizados, o fator de segurança a ser adotado na avaliação e comparação do mecanismo proposto com o esquema reativo, apresentado na seção seguinte, será igual a 1. Este valor foi o que proporcionou melhores resultados em todas as métricas analisadas.

6.5 Avaliação da Estrutura Global

Esta seção discute os resultados obtidos no processo de simulação da estratégia proposta, denotada por “Proativo-RNA”, bem como os resultados obtidos utilizando o esquema de acesso reativo ao espectro, adotado para comparação de desempenho com a abordagem proposta. O esquema reativo foi implementado conforme descrito em Yang et. al(2007) . Não se avaliou a abordagem proposta em relação a outro esquema proativo devido aos esquemas dispostos na literatura serem baseados em considerações estocásticas e não em medições reais.

Assim como na seção anterior, a avaliação dos esquemas se dará com a utilização das três instancias de simulação definidas na Seção 6.3.

A Figura 49 mostra os resultados numéricos obtidos para a métrica de interferência em ambos os esquemas de acesso ao espectro. Para todas as instâncias de simulação, o usuário secundário não provocou interferência à comunicação licenciada com o emprego do esquema Proativo-RNA, o que representa melhoria de até 800% em relação ao acesso reativo. Para todas as instâncias de simulação, o esquema Proativo-RNA foi superior ao esquema reativo. Este por sua vez, manteve o mesmo número de interferências nos dois primeiros casos de simulação. No entanto, utilizando 9 canais na avaliação, a quantidade de interferências provocadas ao usuário licenciado aumentou em 100% em relação as instancias de simulação composta de 4 e 6 canais. A superioridade do esquema proposto é decorrente do bom desempenho da estrutura de previsão, que foi capaz de estimar o padrão de uso dos canais de comunicação. Com isso, o usuário secundário obteve subsídios para realizar o *handoff* de espectro antes do retorno do UP ao canal atualmente ocupado pelo US. Bem como, proporcionou a tomada de decisão inteligente ao usuário não licenciado, indicando quando e para qual canal disponível comutar proativamente. Tal resultado é bastante relevante, devido ao requisito para a utilização oportunista do espectro: evitar interferência na comunicação primária. Ademais, sem interferência tanto a comunicação primária quanto a secundária não sofrem degradação.

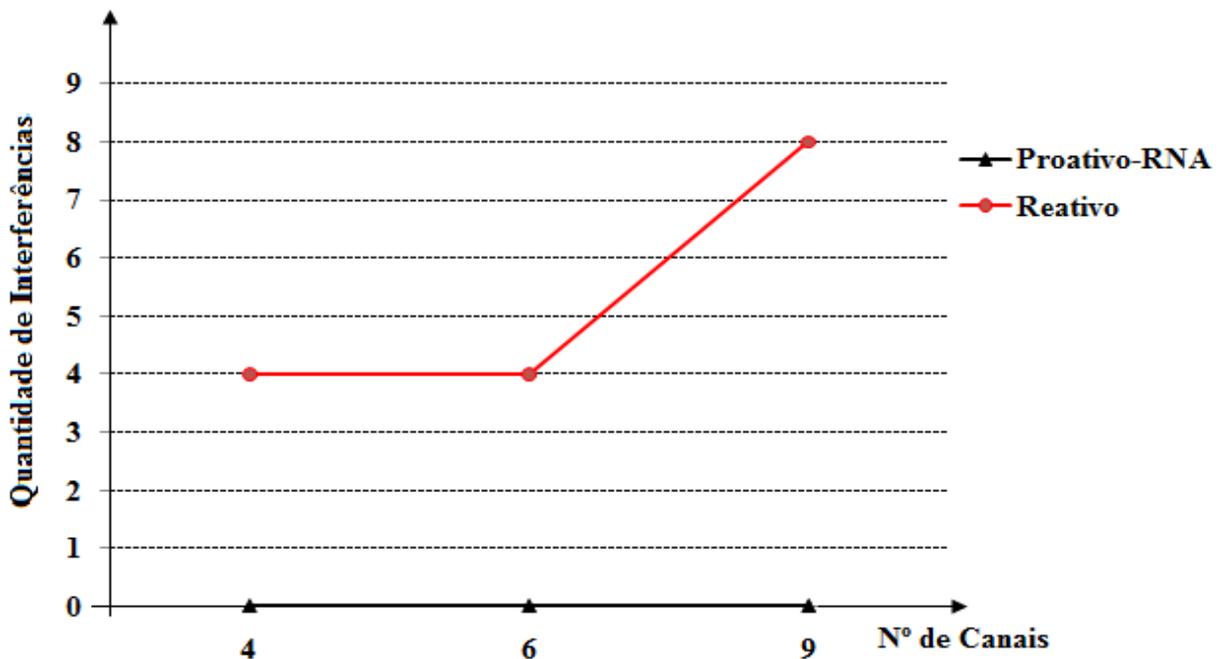


Figura 49- Resultados quanto à interferência provocada ao UP

Além disso, o esquema proposto mostrou-se com desempenho ótimo mesmo com o aumento do número de canais adotados na simulação, ao contrário do esquema reativo, cujo desempenho se deteriorou na última instância de simulação.

Em relação ao número de *handoffs* de espectro realizados pelos US, que influencia diretamente na garantia de QoS de sua aplicação, com o esquema Proativo-RNA proposto, o usuário não licenciado manteve constante e igual a 2 o número de *handoffs* de espectro em todas as instâncias de simulação. Já com o esquema reativo, o usuário secundário realizou 4 *handoffs* de espectro nas duas primeiras instâncias de simulação, representando um aumento de 100% em relação a abordagem proposta, e 8 *handoffs* de espectro na terceira instância de simulação, o que representa um desempenho de 300% inferior ao esquema Proativo-RNA. Tal desempenho é devido à tomada de decisão inteligente realizada pelo US utilizando a abordagem proposta. Com a estimação do padrão de uso dos canais, o US escolhe antecipadamente os melhores canais disponíveis para retomar a sua comunicação, dado que o canal atual se torna indisponível. E a disponibilidade do canal leva em consideração o fator de segurança definido, que busca dar mais segurança na escolha do melhor canal, bem como suavizar os possíveis erros de predição. Além disso, na escolha do canal alvo, um dos aspectos levados em consideração pela abordagem proposta é a redução do número de comutação de canais, pois isto

degrada a comunicação secundária. Os resultados da simulação quanto ao número de *handoffs* de espectro são apresentados na Figura 50.

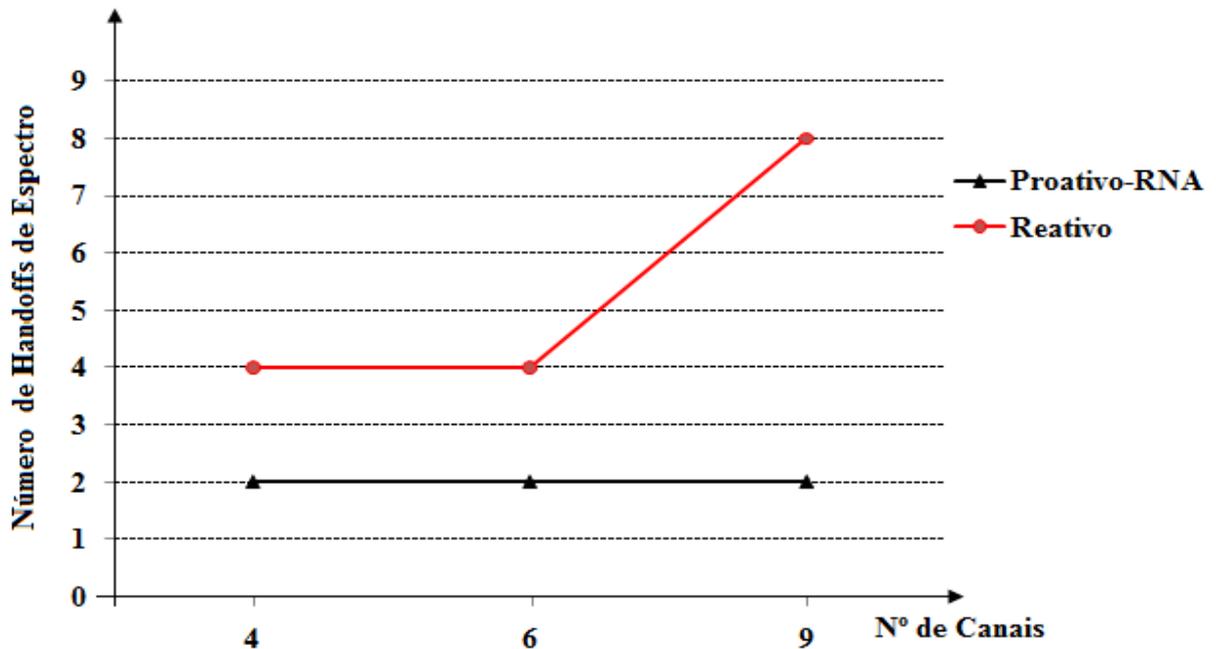


Figura 50- Resultados quanto ao número de *handoffs* de espectro do US

Como se observa na Figura 50, o esquema proposto mostrou-se novamente superior ao esquema reativo, apresentando desempenho constante, mesmo com o aumento do número de canais e conseqüentemente possibilidade de realização de trocas de canais. Enquanto que o esquema reativo para *handoff* de espectro apresentou perda de desempenho na última instância de simulação.

Quanto à utilização espectral, os esquemas apresentaram desempenhos semelhantes, conforme apresentado na Tabela 10. Nota-se que o esquema proposto manteve a utilização espectral do US constante, próxima de 100% e superior à obtida com a abordagem reativa para todas as instâncias de simulação. Além disso, verifica-se que o esquema reativo de *handoff* de espectro na última instância de simulação apresenta leve perda de desempenho. Esta perda de desempenho do esquema reativo é devido ao aumento no número de interferências ao UP e *handoffs* de espectro realizados pelo US, bem como ao tempo de busca por canais disponíveis inerentes ao esquema reativo. Tais fatores influenciam na utilização espectral alcançada pelo usuário não licenciado.

Tabela 10 – Resultados quanto à utilização espectral

Nº de Canais	Utilização espectral (%)	
	Proativo-RNA	Reativo
4	99,9996	99,8639
6	99,9996	99,8639
9	99,9996	99,7246

Como mostrado, o esquema proposto apresentou resultados satisfatórios em relação a todas as métricas adotadas no estudo, as quais são requisitos fundamentais na avaliação de desempenho de mecanismos de acesso oportunista ao espectro que utilize a tecnologia de Rádio Cognitivo.

Capítulo 7

Considerações Finais

Neste capítulo finalizamos com as conclusões sobre o trabalho desenvolvido, ratificando as principais contribuições e apresentando direcionamento para trabalhos futuros.

7.1 Conclusões

A tecnologia de Rádio Cognitivo apresenta-se como uma solução para resolver o problema da ineficiência espectral, permitindo que novos sistemas sem fio possam ser suportados através de uma abordagem oportunista de utilização do espectro eletromagnético. Neste contexto, o *handoff* de espectro eficiente e rápido de espectro é um requisito chave para o bom desempenho de redes baseadas na tecnologia de Rádio Cognitivo.

Este trabalho buscou explorar tal tecnologia, retratando conceitos, características, funcionalidades, aplicações, entre outros, culminando no desenvolvimento e proposição de uma vantajosa estratégia proativa para a *handoff* de espectro de espectro em redes de rádio cognitivo utilizando Redes Neurais.

A abordagem proposta apresentou resultados satisfatórios, demonstrando sua superioridade quanto às métricas adotadas. A estrutura de predição utilizando redes neurais artificiais mostrou-se eficiente na estimação do comportamento dos canais, dando subsídios fundamentais no processo de decisão de *handoff de espectro*. Este processo utilizou o conceito de margem de segurança com o objetivo de proporcionar maior robustez à estratégia, quanto aos possíveis erros inerentes ao processo de previsão, bem como na escolha do canal alvo.

Ademais, diferentemente de outros estudos e métodos propostos na literatura, a estratégia apresentada foi avaliada utilizando dados reais obtidos de sensoriamento de espectro, ao invés de dados gerados sinteticamente e simplificações estocásticas, o que mostra a sua adaptabilidade a sistemas reais. Além do que a utilização de dados reais fez com que características não lineares

subjacentes ao ambiente espectral fossem levadas em consideração através dos valores medidos. Isso torna a utilização da proposta mais factível ao ambiente real. Adicionado a isso, o esquema proposto apresentou bons resultados, mesmo com a variação ao número de canais, mostrando-se extensível para situações onde se tenha pouco ou muito canais.

7.2 Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros, pretende-se avaliar a estratégia proposta em cenários de simulação com aplicações comumente usadas em redes sem fio como áudio e vídeo, por exemplo. Analisando seu desempenho em relação às métricas de QoS como, *vazão*, *jitter*, perda de pacotes, entre outras.

Adicionalmente, pretende-se associar sistema de lógica fuzzy à estrutura de decisão, a fim de avaliar o seu impacto no desempenho do mecanismo de *handoff* de espectro proposto.

Referências Bibliográficas

AKYILDIZ, Ian F.; VURAN, Mehmet C.; LEE, Won-Yeol; MOHANTY, Shantidev. **NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey**. Computer Networks, n. 50, 2006.

AKYILDIZ, Ian F.; LEE, Won-Yeol; CHOWDHURY, Kaushik R. **CRAHNS: Cognitive radio ad hoc networks**. Ad Hoc Networks, n.7, 2009.

ARSLAN, Huseyin. **Cognitive Radio, Software Defined Radio, and Adaptive Wireless Systems**. Springer, 2007.

BALDO, Nicola; ZORZI, Michele. **Learning and Adaptation in Cognitive Radio Networks**. IEEE Consumer Communications and Networking Conference, 2008.

BALIEIRO, Andson Marreiros; DIAS, Kelvin Lopes; CASTRO, Adriana R. G; ALVES, Elton Rafael. **Handoff de Espectro em Redes Baseadas em Rádio Cognitivo Utilizando Redes Neurais Artificiais**. In: IX WPerformance. XXX Congresso da Sociedade Brasileira de Computação, 2010.

BERLEMANN, Lars; DIMITRAKOPOULOS; George; MOESSNER, Klaus. HOFFMEYER, Jim. **Cognitive Radio and Management of Spectrum and Radio Resources in Reconfigurable Networks**. Wireless World Research Forum, 2005.

BELERMANN, Lars; MANGOLD, Stefan. **Cognitive Radio and Dynamic Spectrum Access**. Wiley, 2009.

CABRIC´, Danijela; MISHRA, Shridhar Mubaraq; BRODERSEN, Robert. **Implementation Issues in Spectrum Sensing for Cognitive Radios**. Signals, Systems and Computers, 2004.

CABRIC´, Danijela; MISHRA, Shridhar Mubaraq; WILLKOMM, Daniel; BRODERSEN, Robert; WOLISZ, Adam. **A Cognitive Radio Approach for Usage of Virtual Unlicensed Spectrum**. 14th IST Mobile Wireless Communications Summit. Dresden, 2005.

CAVALCANTI, Dave; DAS, Sushanta; WANG, Jianfeng; CHALLAPALI, Kiran. **Cognitive Radio based Wireless Sensor Networks**. 17th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN), 2008.

CORDEIRO, Carlos; CHALLAPALI, Kiran; BIRRU, Dagnachew. **IEEE 802.22: An Introduction to the first Wireless Standard based on Cognitive Radio**. Journal of Communications, vol. 1, N° 1, 2006.

CORDEIRO, Carlos; KIM, Hyoil; CHALLAPALI, Kiran; SHIN, Kang G. **An Experimental Approach to Spectrum Sensin in Cognitive Radio Networks with Off-the-Shelf IEEE 802.11 Devices**.4th IEEE Consumer Communications and Network Conference (CCNC), 2007.

CHEN, Hsiao-Hwa; GUIZANI, Mohsen. **Next Generation Wireless System and Networks**. John Wiley & Son, 2006.

CLANCY, T. Charles. **Formalizing the Interference Temperature Model**. Wiley Journal on Wireless Communications & Mobile Computing, 2007.

Divisão do Espectro no Brasil. Anatel. Disponível em <http://www.anatel.gov.br/Portal/exibirPortallInternet.do>. Acesso em Dezembro/2009

DYSPAN. Disponível em : <http://www.ctvr.ie/en/dyspan/ChicagoMeasurementsDySPANDemoPack.zip>. Acesso em Dezembro/2008.

FENG, Xue ; DAIMING, Qu; GUANGXI, Zhu ; YACHUN, Li. **Smart Channel Switching in Cognitive Radio Networks**. International Congress on Image and Signal Processing, 2009.

GIUPPONI, L. ; NEIRA, ANA I. PÉREZ. **Fuzzy-based Spectrum Handoff in Cognitive Radio Networks**. International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications(CrownCom), 2008.

GHOZZI, Mohamed; DOHLER, Mischa; MARX; François; PALICOT, Jacques. **Cognitive radio: methods for the detection of free bands**. Comptes Rendus Physique. Elsevier, vol. 7, 2006.

HAYKIN, Simon. **Neural Netwoks: a comprehensive foundation**. Prentice-Hall, 1994.

HAYKIN, Simon. **Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications**. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 23, n. 2, 2005.

HE, An; BAE, Kyung Kyoong; NEWMAN, Timothy R; GEDDERT, Joseph; KIM, Kyouwoong; MENON, Rekha; TIRADO, Lizdabel Morales; NEEL, James Jody;

IANCULESCU, Cristian; MUDRA, Andy. **Cognitive Radio and Dynamic Spectrum Sharing**. Proceeding of the SDR 05 Technical Conference and Product Exposition, 2005.

KALIGINEEDI, Praveen; KHABBAZIAN, Majid; BHARGAVA, Vijay K. **Secure Cooperative Sensing Techniques for Cognitive Radio Systems**. IEEE International Conference on Communications, 2008.

KALIL, Mohamed A.; AL-MAHDI, Hassan.; MITSCHLE-THIEL, Andreas. **Spectrum Handoff Reduction for Cognitive Radio Ad Hoc Networks**. 7th International Symposium on Wireless Communications Systems, 2010.

KIM, Hyoil; SHIN, Kang G. **Adaptative MAC-Layer Sensing of Spectrum Availability in Cognitive Radio Networks**. Technical Report, CSE-TR-518-06, University of Michigan, 2006.

KIM, Hyoil; SHIN, Kang G. **Efficient Discovery of Spectrum Opportunities with MAC-Layer Sensing in Cognitive Radio Networks**. IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol. 7, n° 5, 2008.

LEE, Yon -Yeol; AKYILDIZ, Ian F. **Optimal spectrum sensing framework for cognitive radio networks**. IEEE Transactions on Wireless Communications. Vol.7, 2008.

LOPEZ-BETINEZ, Miguel; UMBERT, Anna; CASADEVALL, Fernando. **Evaluation of Spectrum Occupancy in Spain for Cognitive Radio Applications**. 69th IEEE Vehicular Technology Conference, 2009.

MARTIAN, Alexandru.; MARCU, Ioana.; MARGHESCU, Ion. **Spectrum Occupancy in an Urban Environment: A Cognitive Radio Approach**. Sixth Advanced International Conference on Telecommunications, 2010

MATHWORKS. Disponível em: [HTTP://www.mathworks.com](http://www.mathworks.com). Acesso em Janeiro/2010.

MENEZES, Alam Silva. **Avaliação de Desempenhos de Rádio Cognitivos e Proposta de Estrutura de Equalização Temporal em Sistemas OFDM**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

MITOLA III, Joseph. **Na Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio**. Tese de Doutorado. Royal Institute of Technology (KTH), Sweden, 2000.

PENG, Y. -J; CHEN, K.-C; PRASAD, N.; LIANG, Y.-C; SUN, S. **Cognitive Radio Architecture: Part I – General Structure**. Conference On Ubiquitous Information Management And Communications, Suwon, 2008.

Shared spectrum company. Disponível em <<http://www.sharedspectrum.com/news/announcements>>. Acesso em Agosto/2008.

THANAYANKIZIL, Lakshmi; KAILAS, Aravind. **Spectrum Sensing Techniques (II):Receiver Detection and Interference Management**. Disponível em <aravind.kailas.googlepages.com/ece_8863_report.pdf >. Acesso em Setembro/2008.

TSAGKARIS, K.; KATIDIOTIS, A.; DEMESTICHAS, P. Neural **network-based learning schemes for cognitive radio systems**. Computer Communications. Vol 31, 2008.

VURAN, Mehmet C.; AKYILDIZ, Ian F.; LEE, Won-Yeol; MOHANTY, Shantidev. **A Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks**. IEEE Communications Magazine. Abril, 2008.

ZHAO, Youping; REED, Jeffrey H.; TRANTER, William H. **A Survey on Artificial Intelligent for Cognitive Radio**. IEEE Transactions on Vehicular Technology. Vol. 5, n. 4, 2010.

ZHU, X.; SHEN, L.; YUM, T. P. **Analysis of Cognitive Radio Spectrum Access with Optimal Channel Reservation**. IEEE Communications Letters. Vol 11, n.4, 2007.

YANG, Lei; CAO, Lili; ZHENG, Haitao. **Proactive channel access in dynamic spectrum networks**. Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM), 2007.

YUAN, Yuan; BAHL, Paramvir; CHANDRA, Ranveer; MOSCIBRODA, Tomas; WU, Yunnan. **Allocating Dynamic Time-Spectrum Blocks In Cognitive Radio Networks**. International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing, 2007.

YUCEK, Tevfik; ARSLAN, Huseyin. **A Survey on Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive Radio Applications**. IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol. 11, n. 1, 2009.

Apêndice

Tabela 11 – Casos de teste do canal 1

R N A	NNO	FNO	η	MSE_{treino}	MSE_{valid}	 MSE_{treino} - MSE_{valid}
1	5	Tansig	0,01	0,005417100247747	0,005041397166772	0,000375703080975
2	5	Logsig	0,01	0,005088626268527	0,004582769071245	0,000505857197282
3	10	Tansig	0,01	0,006855361921197	0,005224712110751	0,001630649810446
4	10	Logsig	0,01	0,006110608224039	0,006234768622196	0,000124160398157
5	15	Tansig	0,01	0,006470221334718	0,005780167870504	0,000690053464214
6	15	Logsig	0,01	0,005458753181948	0,005267337149977	0,000191416031971
7	20	Tansig	0,01	0,006368982961229	0,005559848142475	0,000809134818754
8	20	Logsig	0,01	0,005458735910538	0,004868272453576	0,000590463456962
9	25	Tansig	0,01	0,006288853'983239	0,005037119011753	0,001251734971486
10	25	Logsig	0,01	0,006865316759437	0,005677363371402	0,001187953388035
11	30	Tansig	0,01	0,009825625485818	0,007985007451804	0,001840618034014
12	30	Logsig	0,01	0,007254260991800	0,006339407176599	0,000914853815201
13	5	Tansig	0,045	0,005093340373169	0,004642280842170	0,000451059530999
14	5	Logsig	0,045	0,006456638917755	0,006665018897130	0,000208379979375
15	10	Tansig	0,045	0,006328538606049	0,006460429201642	0,000131890595593
16	10	Logsig	0,045	0,005496995934777	0,004962336389641	0,000534659545136
17	15	Tansig	0,045	0,007349128494603	0,006454605347726	0,000894523146877
18	15	Logsig	0,045	0,007174704237449	0,006183495218011	0,000991209019438
19	20	Tansig	0,045	0,009828538531300	0,009133104080554	0,000695434450746
20	20	Logsig	0,045	0,006217382472473	0,004785233303396	0,001432149169077
21	25	Tansig	0,045	0,006473068597501	0,005034952924222	0,001438115673279
22	25	Logsig	0,045	0,005379755619066	0,004810890425460	0,000568865193606
23	30	Tansig	0,045	0,006540187079681	0,006599475239727	0,000059288160046
24	30	Logsig	0,045	0,008495959906696	0,006981223258464	0,001514736648232
25	5	Tansig	0,1	0,006736235152587	0,005574025803968	0,001162209348619
26	5	Logsig	0,1	0,005069927772571	0,004553148707900	0,000516779064671
27	10	Tansig	0,1	0,006844424133932	0,007142215584844	0,000297791450912
28	10	Logsig	0,1	0,005564571982082	0,005225105820033	0,000339466162049
29	15	Tansig	0,1	0,006883704961795	0,005918804492732	0,000964900469063
30	15	Logsig	0,1	0,005517577245677	0,005310796838060	0,000206780407617
31	20	Tansig	0,1	0,006644669014822	0,006066649676121	0,000578019338701
32	20	Logsig	0,1	0,007138927303352	0,007523531043625	0,000384603740273
33	25	Tansig	0,1	0,006191191880278	0,005513633717475	0,000677558162803
34	25	Logsig	0,1	0,005734682427244	0,005388280710874	0,00034640171637
35	30	Tansig	0,1	0,008057734871045	0,007769017362032	0,000288717509013
36	30	Logsig	0,1	0,006149871326162	0,005949521173804	0,000200350152358

Tabela 12 – Casos de teste do canal 2

R N A	NNO	FNO	η	MSE_{treino}	MSE_{valid}	 MSE_{treino} - MSE_{valid}
1	5	Tansig	0,01	0,009330222879367	0,010004180596243	0,000673957716876
2	5	Logsig	0,01	0,006274507408066	0,006465583553094	0,000191076145028
3	10	Tansig	0,01	0,006629859139064	0,006583665519273	0,000046193619791
4	10	Logsig	0,01	0,006413902135509	0,006510967744929	0,00009706560942
5	15	Tansig	0,01	0,006776798613557	0,006508522029848	0,000268276583709
6	15	Logsig	0,01	0,006639131681620	0,006836412094742	0,000197280413122
7	20	Tansig	0,01	0,009445373245065	0,009567714400224	0,000122341155159
8	20	Logsig	0,01	0,006290799587727	0,006283179139073	0,000007620448654
9	25	Tansig	0,01	0,008739930575137	0,008236563971751	0,000503366603386
10	25	Logsig	0,01	0,007746207790397	0,007835036992502	0,000088829202105
11	30	Tansig	0,01	0,009725028724036	0,010036996431988	0,000311967707952
12	30	Logsig	0,01	0,006928299895749	0,006989385595557	0,000061085699808
13	5	Tansig	0,045	0,009177681989199	0,01017758138721	0,000999906149522
14	5	Logsig	0,045	0,005608391227137	0,005622662694605	0,000014271467468
15	10	Tansig	0,045	0,007213005660755	0,007037497002484	0,000175508658271
16	10	Logsig	0,045	0,009419918462038	0,009366469171219	0,000053449290819
17	15	Tansig	0,045	0,006537443786904	0,006607294992798	0,000069851205894
18	15	Logsig	0,045	0,006755434019817	0,006933626340703	0,000178192320886
19	20	Tansig	0,045	0,008617095101376	0,008707759410080	0,000090664308704
20	20	Logsig	0,045	0,005936390834925	0,006029443808683	0,000093052973758
21	25	Tansig	0,045	0,008500923400343	0,008634164833487	0,000133241433144
22	25	Logsig	0,045	0,006486056657765	0,006363613961255	0,00012244269651
23	30	Tansig	0,045	0,005929116231777	0,005929772690216	0,000000656458439
24	30	Logsig	0,045	0,009212929382352	0,008611984128094	0,000600945254258
25	5	Tansig	0,1	0,006365263198007	0,006458001328405	0,000092738130398
26	5	Logsig	0,1	0,005962293632583	0,005905631048540	0,000056662584043
27	10	Tansig	0,1	0,005778477981148	0,005805982805178	0,00002750482403
28	10	Logsig	0,1	0,005655868639000	0,005717991689696	0,000062123050696
29	15	Tansig	0,1	0,008576083474158	0,008647113038694	0,000071029564536
30	15	Logsig	0,1	0,006216429847929	0,006349081614764	0,000132651766835
31	20	Tansig	0,1	0,009049156409194	0,008700863111370	0,000348293297824
32	20	Logsig	0,1	0,006831986196867	0,006869480551421	0,000037494354554
33	25	Tansig	0,1	0,009398377806720	0,009127718909441	0,000270658897279
34	25	Logsig	0,1	0,006902349161348	0,006931724298482	0,000029375137134
35	30	Tansig	0,1	0,006597880071411	0,006356979612955	0,000240900458456
36	30	Logsig	0,1	0,006425100190398	0,006577904777929	0,000152804587531

Tabela 13 – Casos de teste do canal 3

R N A	NNO	FNO	η	MSE_{treino}	MSE_{valid}	 MSE_{treino} - MSE_{valid}
1	5	Tansig	0,01	0,009102721184158	0,027055858321636	0,017953137137478
2	5	Logsig	0,01	0,006917080081700	0,019470587865083	0,012553507783383
3	10	Tansig	0,01	0,006669736940207	0,016575270727031	0,009905533786824
4	10	Logsig	0,01	0,007176435746810	0,019186770665561	0,012010334918751
5	15	Tansig	0,01	0,008026701693854	0,021067406690798	0,013040704996944
6	15	Logsig	0,01	0,009549140498333	0,034550896056120	0,025001755557787
7	20	Tansig	0,01	0,009912866791045	0,029830324863268	0,019917458072223
8	20	Logsig	0,01	0,008187376305566	0,022403554703109	0,014216178397543
9	25	Tansig	0,01	0,009586935712295	0,029212282515245	0,019625346802950
10	25	Logsig	0,01	0,009855276789884	0,028437122722566	0,018581845932682
11	30	Tansig	0,01	0,007710732634270	0,053300714905350	0,045589982271080
12	30	Logsig	0,01	0,006216836167872	0,022334529408062	0,016117693240190
13	5	Tansig	0,045	0,007902821752392	0,014463098207212	0,006560276454820
14	5	Logsig	0,045	0,006289612275699	0,015052165197731	0,008762552922032
15	10	Tansig	0,045	0,005907338335277	0,015130688551176	0,009223350215899
16	10	Logsig	0,045	0,009260242743041	0,038419616591532	0,029159373848491
17	15	Tansig	0,045	0,007551002640976	0,0099872604722371	0,002436257831261
18	15	Logsig	0,045	0,006297100906986	0,014652130472434	0,008355029565448
19	20	Tansig	0,045	0,008974269111799	0,021101960681950	0,012127691570151
20	20	Logsig	0,045	0,009925009326411	0,027128728273689	0,017203718947278
21	25	Tansig	0,045	0,009236436376822	0,014366800890659	0,005130364513837
22	25	Logsig	0,045	0,006035403245115	0,021530915723747	0,015495512478632
23	30	Tansig	0,045	0,008307276646739	0,028477879557695	0,020170602910956
24	30	Logsig	0,045	0,009626929887332	0,055809957697722	0,046183027810390
25	5	Tansig	0,1	0,007037774802854	0,017523689896079	0,010485915093225
26	5	Logsig	0,1	0,006557767573269	0,018810071569314	0,012252303996045
27	10	Tansig	0,1	0,007556587319815	0,018218943753772	0,010662356433957
28	10	Logsig	0,1	0,008170477331654	0,026170939073374	0,018000461741720
29	15	Tansig	0,1	0,007611072102081	0,015690286854144	0,008079214752063
30	15	Logsig	0,1	0,006108051005325	0,016948688996402	0,010840637991077
31	20	Tansig	0,1	0,009565008497148	0,018947875377296	0,009382866880148
32	20	Logsig	0,1	0,005845722779146	0,016486590718380	0,010640867939234
33	25	Tansig	0,1	0,006465997342248	0,016268575708582	0,009802578366334
34	25	Logsig	0,1	0,008093332712561	0,024678848399604	0,016585515687043
35	30	Tansig	0,1	0,007319117872500	0,019870749943424	0,012551632070924
36	30	Logsig	0,1	0,008394736615469	0,025942716970313	0,017547980354844

Tabela 14 – Casos de teste do canal 4

R N A	NNO	FNO	η	MSE_{treino}	MSE_{valid}	 MSE_{treino} - MSE_{valid}
1	5	Tansig	0,01	0,002375120788264	0,006263176315673	0,003888055527409
2	5	Logsig	0,01	0,003665843042626	0,008140341309155	0,004474498266529
3	10	Tansig	0,01	0,005849605576622	0,022318450255290	0,016468844678668
4	10	Logsig	0,01	0,003371689835699	0,009746528238213	0,006374838402514
5	15	Tansig	0,01	0,002720218611846	0,011403684673763	0,008683466061917
6	15	Logsig	0,01	0,002211570418860	0,010176875738084	0,007965305319224
7	20	Tansig	0,01	0,004478164837860	0,011023799196293	0,006545634358433
8	20	Logsig	0,01	0,002638231546292	0,008283323056706	0,005645091510414
9	25	Tansig	0,01	0,003019015998972	0,021834970723580	0,018815954724608
10	25	Logsig	0,01	0,002215104617314	0,009137090680377	0,006921986063063
11	30	Tansig	0,01	0,003361623074659	0,015297421697761	0,011935798623102
12	30	Logsig	0,01	0,002936562255101	0,009162391010855	0,006225828755754
13	5	Tansig	0,045	0,004603925335015	0,016306110307740	0,011702184972725
14	5	Logsig	0,045	0,004128932313721	0,024389370684746	0,020260438371025
15	10	Tansig	0,045	0,002615526273853	0,010902019762639	0,008286493488786
16	10	Logsig	0,045	0,002410505965552	0,007555826383214	0,005145320417662
17	15	Tansig	0,045	0,002230675782781	0,008519471378622	0,006288795595841
18	15	Logsig	0,045	0,002256019157977	0,007725367098584	0,005469347940607
19	20	Tansig	0,045	0,004445142952581	0,017945354105497	0,013500211152916
20	20	Logsig	0,045	0,002693464776937	0,008864323633023	0,006170858856086
21	25	Tansig	0,045	0,005991432029655	0,020433837272319	0,014442405242664
22	25	Logsig	0,045	0,002509870361375	0,011830411893081	0,009320541531706
23	30	Tansig	0,045	0,004802738811624	0,014119389258893	0,009316650447269
24	30	Logsig	0,045	0,002712531722384	0,010166516171285	0,007453984448901
25	5	Tansig	0,1	0,004936480479135	0,009841194013280	0,004904713534145
26	5	Logsig	0,1	0,005412360392354	0,009268049846081	0,003855689453727
27	10	Tansig	0,1	0,004142192797295	0,009862515410357	0,005720322613062
28	10	Logsig	0,1	0,002124873874906	0,012355243029013	0,010230369154107
29	15	Tansig	0,1	0,002447581614244	0,017231805793034	0,01478422417879
30	15	Logsig	0,1	0,002553743784881	0,014178431925918	0,011624688141037
31	20	Tansig	0,1	0,002885484292207	0,009234006983429	0,006348522691222
32	20	Logsig	0,1	0,002146498502093	0,009253601727635	0,007107103225542
33	25	Tansig	0,1	0,002983148567854	0,014690323905629	0,011707175337775
34	25	Logsig	0,1	0,002141742193356	0,012385650677208	0,010243908483852
35	30	Tansig	0,1	0,009436203355602	0,020448557031624	0,011012353676022
36	30	Logsig	0,1	0,003957595497001	0,010374753284183	0,006417157787182

Tabela 15 – Casos de teste do canal 5

R N A	NNO	FNO	η	MSE_{treino}	MSE_{valid}	 MSE_{treino} - MSE_{valid}
1	5	Tansig	0,01	0,001551412926644	0,004056173612041	0,002504760685397
2	5	Logsig	0,01	0,001248072708805	0,003617640965416	0,002369568256611
3	10	Tansig	0,01	0,003813721067113	0,010335210930557	0,006521489863444
4	10	Logsig	0,01	0,001095771231342	0,003664399653596	0,002568628422254
5	15	Tansig	0,01	0,002918683435950	0,010737259562497	0,007818576126547
6	15	Logsig	0,01	0,003128708934510	0,005274674120051	0,002145965185541
7	20	Tansig	0,01	0,002346031501395	0,008715038339115	0,00636900683772
8	20	Logsig	0,01	0,002410503779103	0,008588301529567	0,006177797750464
9	25	Tansig	0,01	0,001043389219696	0,015403856063383	0,014360466843687
10	25	Logsig	0,01	0,001323506246574	0,004004165593963	0,002680659347389
11	30	Tansig	0,01	0,007018652532521	0,020053020325622	0,013034367793101
12	30	Logsig	0,01	0,005274573320250	0,009330117396437	0,004055544076187
13	5	Tansig	0,045	0,005209048352409	0,014243826598648	0,009034778246239
14	5	Logsig	0,045	0,001051567324373	0,003511766136651	0,002460198812278
15	10	Tansig	0,045	0,001012101867481	0,004175827321810	0,003163725454329
16	10	Logsig	0,045	0,003014479019553	0,005061619746868	0,002047140727315
17	15	Tansig	0,045	0,001762976846303	0,005818599199340	0,004055622353037
18	15	Logsig	0,045	0,001352535680954	0,003781632783897	0,002429097102943
19	20	Tansig	0,045	0,002993601712120	0,008184817231449	0,005191215519329
20	20	Logsig	0,045	0,007748786515055	0,011778121570197	0,004029335055142
21	25	Tansig	0,045	0,004821489988712	0,014428958259861	0,009607468271149
22	25	Logsig	0,045	0,001286984946753	0,008651525837982	0,007364540891229
23	30	Tansig	0,045	0,001573909879912	0,049373686565423	0,047799776685511
24	30	Logsig	0,045	0,001403213781673	0,006501809363620	0,005098595581947
25	5	Tansig	0,1	0,001166986339685	0,003768548155860	0,002601561816175
26	5	Logsig	0,1	0,002036622592884	0,004275137034620	0,002238514441736
27	10	Tansig	0,1	0,001028413604557	0,004862128967044	0,003833715362487
28	10	Logsig	0,1	0,001368079171536	0,004071719658713	0,002703640487177
29	15	Tansig	0,1	0,001077067159793	0,007150372489308	0,006073305329515
30	15	Logsig	0,1	0,001356607415506	0,004826213349601	0,003469605934095
31	20	Tansig	0,1	0,001500642270505	0,005938277794714	0,004437635524209
32	20	Logsig	0,1	0,002603137861280	0,005429897548034	0,002826759686754
33	25	Tansig	0,1	0,001846418186635	0,007630762295072	0,005784344108437
34	25	Logsig	0,1	0,002198886473102	0,005204234341979	0,003005347868877
35	30	Tansig	0,1	0,001550827062447	0,021611088130279	0,020060261067832
36	30	Logsig	0,1	0,003022883931396	0,006982263961213	0,003959380029817

Tabela 16 – Casos de teste do canal 6

R N A	NNO	FNO	η	MSE_{treino}	MSE_{valid}	 MSE_{treino} - MSE_{valid}
1	5	Tansig	0,01	0,009761168694656	0,010168335219443	0,000407166524787
2	5	Logsig	0,01	0,009748903920062	0,010063082837751	0,000314178917689
3	10	Tansig	0,01	0,009964598971010	0,010814737057339	0,000850138086329
4	10	Logsig	0,01	0,009424543073392	0,009703771150951	0,000279228077559
5	15	Tansig	0,01	0,009563224214447	0,010692623428584	0,001129399214137
6	15	Logsig	0,01	0,009606810905570	0,010225333697596	0,000618522792026
7	20	Tansig	0,01	0,009942430872688	0,010728428235778	0,00078599736309
8	20	Logsig	0,01	0,009638466189944	0,010727784361386	0,001089318171442
9	25	Tansig	0,01	0,009490370301347	0,010210388381715	0,000720018080368
10	25	Logsig	0,01	0,009647774577927	0,010415993723857	0,00076821914593
11	30	Tansig	0,01	0,009921962162545	0,010231575574169	0,000309613411624
12	30	Logsig	0,01	0,009906732279597	0,010374693291795	0,000467961012198
13	5	Tansig	0,045	0,009761168694656	0,010168335219443	0,000407166524787
14	5	Logsig	0,045	0,009988906642179	0,009903179162696	0,000085727479483
15	10	Tansig	0,045	0,009464059048814	0,009967530307260	0,000503471258446
16	10	Logsig	0,045	0,009826543227305	0,009888081032745	0,00006153780544
17	15	Tansig	0,045	0,009801791716713	0,010573555336269	0,000771763619556
18	15	Logsig	0,045	0,009384888929635	0,010264711079463	0,000879822149828
19	20	Tansig	0,045	0,009908387460444	0,010832999858205	0,000924612397761
20	20	Logsig	0,045	0,009426734315741	0,010387123252251	0,00096038893651
21	25	Tansig	0,045	0,009722651060133	0,009859313384165	0,000136662324032
22	25	Logsig	0,045	0,009825240070168	0,011066062616385	0,001240822546217
23	30	Tansig	0,045	0,009776356135021	0,009456199049076	0,000320157085945
24	30	Logsig	0,045	0,009549526283422	0,010840171765967	0,001290645482545
25	5	Tansig	0,1	0,009647927557345	0,009565203268016	0,000082724289329
26	5	Logsig	0,1	0,009456255796291	0,009820278468293	0,000364022672002
27	10	Tansig	0,1	0,009768225895803	0,010338327692076	0,000570101796273
28	10	Logsig	0,1	0,009906354556572	0,010102979916722	0,00019662536015
29	15	Tansig	0,1	0,009594301958380	0,010827215393332	0,001232913434952
30	15	Logsig	0,1	0,009460050693096	0,010366640501626	0,00090658980853
31	20	Tansig	0,1	0,009772624250997	0,010715722361826	0,000943098110829
32	20	Logsig	0,1	0,009676163401300	0,009972565994957	0,000296402593657
33	25	Tansig	0,1	0,009639705857487	0,009756775451913	0,000117069594426
34	25	Logsig	0,1	0,009368239840015	0,010340742324939	0,000972502484924
35	30	Tansig	0,1	0,009741129318931	0,011209203022299	0,001468073703368
36	30	Logsig	0,1	0,009245674401936	0,010363239202921	0,001117564800985

Tabela 17 – Casos de teste do canal 7

R N A	NNO	FNO	η	MSE_{treino}	MSE_{valid}	 MSE_{treino} - MSE_{valid}
1	5	Tansig	0,01	0,004172107762688	0,004478692590241	0,000306584827553
2	5	Logsig	0,01	0,008680687142854	0,007581726404700	0,001098960738154
3	10	Tansig	0,01	0,006674199669995	0,003523531066320	0,003150668603675
4	10	Logsig	0,01	0,009831874974921	0,002559383522789	0,007272491452132
5	15	Tansig	0,01	0,004324064054460	0,004611833580198	0,000287769525738
6	15	Logsig	0,01	0,001760614773226	0,003041975338310	0,001281360565084
7	20	Tansig	0,01	0,005496526355631	0,004415784627985	0,001080741727646
8	20	Logsig	0,01	0,006463577391820	0,002873372438416	0,003590204953404
9	25	Tansig	0,01	0,007747720257000	0,002720595182269	0,005027125074731
10	25	Logsig	0,01	0,004903147799836	0,002807371754615	0,002095776045221
11	30	Tansig	0,01	0,005647016810423	0,004419181513900	0,001227835296523
12	30	Logsig	0,01	0,005888884113852	0,004708193924016	0,001180690189836
13	5	Tansig	0,045	0,008612201810481	0,002491999192434	0,006120202618047
14	5	Logsig	0,045	0,004326902968368	0,007689110854162	0,003362207885794
15	10	Tansig	0,045	0,006025680805008	0,008825645924481	0,002799965119473
16	10	Logsig	0,045	0,009300683224067	0,002689182807186	0,006611500416881
17	15	Tansig	0,045	0,002020530214025	0,002441400166842	0,000420869952817
18	15	Logsig	0,045	0,002376567893923	0,003999033581238	0,001622465687315
19	20	Tansig	0,045	0,004119318073271	0,007560372877944	0,003441054804673
20	20	Logsig	0,045	0,009587470913422	0,007470480034100	0,002116990879322
21	25	Tansig	0,045	0,008844819848724	0,003694885108290	0,005149934740434
22	25	Logsig	0,045	0,005331109377757	0,003115460605213	0,002215648772544
23	30	Tansig	0,045	0,005622055706290	0,007721141275941	0,002099085569651
24	30	Logsig	0,045	0,002268408191854	0,002864760069840	0,000596351877986
25	5	Tansig	0,1	0,004890439293069	0,005663991443993	0,000773552150924
26	5	Logsig	0,1	0,004268479961969	0,002623783662539	0,00164469629943
27	10	Tansig	0,1	0,003281188059604	0,003838838252698	0,000557650193094
28	10	Logsig	0,1	0,002363080496638	0,005808354479701	0,003445273983063
29	15	Tansig	0,1	0,002618372747612	0,002407591208034	0,000210781539578
30	15	Logsig	0,1	0,004908680743669	0,003591339157960	0,001317341585709
31	20	Tansig	0,1	0,002820956179807	0,005127854496238	0,002306898316431
32	20	Logsig	0,1	0,003803749779969	0,002522474933517	0,001281274846452
33	25	Tansig	0,1	0,004845814987135	0,007258692673213	0,002412877686078
34	25	Logsig	0,1	0,004433913707055	0,006744830460135	0,00231091675308
35	30	Tansig	0,1	0,005010336091674	0,004664813914849	0,000345522176825
36	30	Logsig	0,1	0,004369501603377	0,002359903373614	0,002009598229763

Tabela 18 – Casos de teste do canal 8

R N A	NNO	FNO	η	MSE_{treino}	MSE_{valid}	 MSE_{treino} - MSE_{valid}
1	5	Tansig	0,01	0,005842909204756	0,003331293836240	0,002511615368516
2	5	Logsig	0,01	0,004709065469426	0,004204977981917	0,000504087487509
3	10	Tansig	0,01	0,007721535198399	0,006693314847304	0,001028220351095
4	10	Logsig	0,01	0,006684122164330	0,004483268609493	0,002200853554837
5	15	Tansig	0,01	0,006388697212413	0,009333317745337	0,002944620532924
6	15	Logsig	0,01	0,005173497248087	0,004715508036720	0,000457989211367
7	20	Tansig	0,01	0,007888495063976	0,007302095822046	0,00058639924193
8	20	Logsig	0,01	0,004602707813674	0,003063013037856	0,001539694775818
9	25	Tansig	0,01	0,007914586371610	0,007208153287124	0,000706433084486
10	25	Logsig	0,01	0,008423724114397	0,006577835515129	0,001845888599268
11	30	Tansig	0,01	0,006634781592609	0,007588367308277	0,000953585715668
12	30	Logsig	0,01	0,008491658393049	0,005071163347530	0,003420495045519
13	5	Tansig	0,045	0,004391483106130	0,002966089932218	0,001425393173912
14	5	Logsig	0,045	0,005718019112576	0,003943842005093	0,001774177107483
15	10	Tansig	0,045	0,007222470632813	0,009664930330543	0,00244245969773
16	10	Logsig	0,045	0,005885432361558	0,005998020429513	0,000112588067955
17	15	Tansig	0,045	0,008119968825641	0,005009846017093	0,003110122808548
18	15	Logsig	0,045	0,004427751045599	0,003936998488870	0,000490752556729
19	20	Tansig	0,045	0,003657432658236	0,003394736716311	0,000262695941925
20	20	Logsig	0,045	0,005459026890850	0,003004505711366	0,002454521179484
21	25	Tansig	0,045	0,008459751289610	0,004893421291515	0,003566329998095
22	25	Logsig	0,045	0,005191257354546	0,005712453554862	0,000521196200316
23	30	Tansig	0,045	0,008240761882319	0,007317603694163	0,000923158188156
24	30	Logsig	0,045	0,004169955305520	0,003196911253274	0,000973044052246
25	5	Tansig	0,1	0,003775277184747	0,003083567223318	0,000691709961429
26	5	Logsig	0,1	0,004513480866799	0,003444104181831	0,001069376684968
27	10	Tansig	0,1	0,009138100327947	0,006942964133469	0,002195136194478
28	10	Logsig	0,1	0,006848583334545	0,005054473087480	0,001794110247065
29	15	Tansig	0,1	0,009175049553399	0,004996413042925	0,004178636510474
30	15	Logsig	0,1	0,007064914207737	0,007383369029978	0,000318454822241
31	20	Tansig	0,1	0,005444124711987	0,004532883010841	0,000911241701146
32	20	Logsig	0,1	0,006624018694143	0,004199867525205	0,002424151168938
33	25	Tansig	0,1	0,008168781161433	0,006470629761084	0,001698151400349
34	25	Logsig	0,1	0,006703075597933	0,004498364589394	0,002204711008539
35	30	Tansig	0,1	0,009627110471593	0,006185520764601	0,003441589706992
36	30	Logsig	0,1	0,009435609645228	0,004451525284355	0,004984084360873

Tabela 19 – Casos de teste do canal 9

R N A	NNO	FNO	η	MSE_{treino}	MSE_{valid}	 MSE_{treino} - MSE_{valid}
1	5	Tansig	0,01	0,007122277048038	0,007478160884702	0,000355883836664
2	5	Logsig	0,01	0,006505114488120	0,003742124083982	0,002762990404138
3	10	Tansig	0,01	0,005937551983927	0,004122941637889	0,001814610346038
4	10	Logsig	0,01	0,005235564572580	0,008059282855147	0,002823718282567
5	15	Tansig	0,01	0,007368926629487	0,004929239592283	0,002439687037204
6	15	Logsig	0,01	0,004765517359231	0,005549355732809	0,000783838373578
7	20	Tansig	0,01	0,005952843416190	0,004038015504981	0,001914827911209
8	20	Logsig	0,01	0,009540867933654	0,004207400230662	0,005333467702992
9	25	Tansig	0,01	0,008232897548073	0,011090707243533	0,00285780969546
10	25	Logsig	0,01	0,006117770237959	0,004198486506897	0,001919283731062
11	30	Tansig	0,01	0,005383580739093	0,004565333977638	0,000818246761455
12	30	Logsig	0,01	0,007483647448062	0,006282026404879	0,001201621043183
13	5	Tansig	0,045	0,008390444849607	0,008431607788025	0,000041162938418
14	5	Logsig	0,045	0,006808188496860	0,003816065510157	0,002992122986703
15	10	Tansig	0,045	0,005412204318463	0,008064549487407	0,002652345168944
16	10	Logsig	0,045	0,006068297953975	0,008298292287421	0,002229994333446
17	15	Tansig	0,045	0,007051834528527	0,004061571130803	0,002990263397724
18	15	Logsig	0,045	0,005896088625705	0,008531903338317	0,002635814712612
19	20	Tansig	0,045	0,009405040192873	0,008026209312006	0,001378830880867
20	20	Logsig	0,045	0,006744026224316	0,008207604087927	0,001463577863611
21	25	Tansig	0,045	0,008167209324661	0,008155588709014	0,000011620615647
22	25	Logsig	0,045	0,005020614136163	0,008658239992277	0,003637625856114
23	30	Tansig	0,045	0,006414734790813	0,014603538570099	0,008188803779286
24	30	Logsig	0,045	0,004657862557889	0,006313279717494	0,001655417159605
25	5	Tansig	0,1	0,005837844550186	0,005039277425514	0,000798567124672
26	5	Logsig	0,1	0,005995189746883	0,006304380975060	0,000309191228177
27	10	Tansig	0,1	0,008095620681427	0,009232627552599	0,001137006871172
28	10	Logsig	0,1	0,005927038500640	0,004940562882919	0,000986475617721
29	15	Tansig	0,1	0,006512442615284	0,004688474322616	0,001823968292668
30	15	Logsig	0,1	0,005374650864791	0,006307170378272	0,000932519513481
31	20	Tansig	0,1	0,007467397724169	0,009858948737836	0,002391551013667
32	20	Logsig	0,1	0,009664635025484	0,011613386555390	0,001948751529906
33	25	Tansig	0,1	0,007971768874587	0,012626946847257	0,00465517797267
34	25	Logsig	0,1	0,007788808800756	0,008808649469313	0,001019840668557
35	30	Tansig	0,1	0,006418994290031	0,004311662911471	0,00210733137856
36	30	Logsig	0,1	0,005919681355719	0,010412708758168	0,004493027402449