

Handoff de Espectro em Redes Baseadas em Rádio Cognitivo Utilizando Redes Neurais Artificiais

Andson Marreiros Balieiro, Kelvin Lopes Dias¹, Adriana Rosa Garcês Castro, Elton Rafael Alves

Universidade Federal do Pará (UFPA) – Belém, PA – Brasil

andson_engcomp37@yahoo.com.br, kld@ufpa.br, adcastro@ufpa.br, elton-rafael@hotmail.com

Abstract. *The Cognitive Radio (CR) technology aims at improving the spectral efficiency through the opportunistic access to the electromagnetic spectrum. The CR enables secondary users, which utilize unlicensed bands (e.g., 2.4GHz WiFi) to occupy licensed band (e.g., TV bands) without causing interference to the primary users. To this end, the efficient spectrum handoff is a critical requirement to be taken into account for the success of CR systems. This paper 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 obtained by a reactive scheme. Differently from previous works, our 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.*

Resumo. *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, a mobilidade ou handoff de espectro é um dos requisitos essenciais e críticos na adoção desta tecnologia. Neste artigo propõe-se e avalia-se uma estratégia pró-ativa 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, utilizamos traces de dados reais de sensoriamento disponibilizados pelo IEEE Dyspan 2008 para avaliar a proposta. Resultados numéricos mostram a superioridade do esquema proposto.*

1. Introdução

¹ Este trabalho foi apoiado pelo CNPq, processos 475814/2008-8 (Universal Faixa A) e 309142/2008-3 (Produtividade em Pesquisa)

Atualmente, tem-se verificado o crescimento no desenvolvimento de aplicações e sistemas baseados em comunicação sem fio [Menezes 2007]. 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 as concessões de utilização das faixas licenciadas aos chamados usuários primários (UPs), apresenta uma escassez artificial [Yang 2007]. No entanto, estudos têm mostrado uma subutilização do espectro eletromagnético em algumas faixas licenciadas em determinados instantes de tempo e localizações, onde os usuários primários as utilizam apenas em certas frações de tempo, provocando assim uma ineficiência espectral [Akyildiz 2006][Lee 2008].

Com o intuito de proporcionar uma melhor eficiência espectral, permitindo que novas aplicações sem fio possam ser suportadas em um espectro já segmentado, sem interferência às operações licenciadas, surgiu a tecnologia de Rádio Cognitivo (RC) [Haykin 2005]. Esta tecnologia busca dotar de inteligência os dispositivos de rádio a fim de que eles possam prover aos chamados usuários secundários ou não licenciados a utilização oportunista das faixas de espectro não utilizadas ou subutilizadas pelos usuários primários.

Dentro desta perspectiva, o rádio cognitivo apresenta duas principais capacidades: cognitiva e de reconfigurabilidade [Akyildiz 2006]. A primeira refere-se à habilidade da tecnologia de rádio para capturar ou sentir as informações do ambiente de rádio como porções do espectro não utilizadas em um dado tempo, localização dos usuários vizinhos, tipos de serviços/sistemas disponíveis, entre outras, com o intuito de estimar a melhor faixa espectral disponível e os parâmetros mais apropriados de operação a ser utilizado pelo usuário rádio cognitivo para ocupá-la. Já a segunda, permite ao dispositivo de rádio ser dinamicamente programado segundo o ambiente de rádio. Com isso, 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*.

Ademais, no âmbito de Rádio Cognitivo, a mobilidade de espectro é uma dos requisitos essenciais e críticos para a sua adoção, haja vista que o usuário secundário (US), que utilize tal tecnologia para realizar a sua transmissão, necessita liberar a faixa de espectro licenciada que atualmente ocupa, caso o usuário primário retorne à sua banda e, então, buscar outra faixa disponível para retomar a sua comunicação. Esta troca de canais, bem como a busca por faixas de espectro disponíveis deve ocorrer de forma mais suave e rápida possível com o intuito de reduzir a degradação na comunicação tanto do usuário primário quanto do secundário.

Neste artigo, 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 chaveamento de canais e a quantidade de interferências causadas às operações licenciadas, bem como prover uma melhor eficiência espectral, através de uma abordagem pró-ativa. A avaliação da estratégia proposta utiliza dados reais de sensoriamento disponibilizados pelo IEEE Dyspan 2008 [Dyspan 2008] a fim de mostrar a sua aplicabilidade em sistemas reais baseados em rádio cognitivo.

Este artigo encontra-se assim organizado. Na Seção 2 são apresentados trabalhos relacionados. Em seguida, na Seção 3 descrevemos a estrutura da estratégia para a

mobilidade de espectro proposta. Os dados utilizados na avaliação da abordagem são descritos na Seção 4. Na Seção 5 os resultados da avaliação da estratégia são apresentados e discutidos. Finalmente, na Seção 6 apresentamos as conclusões e trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

O *handoff* de espectro é uma das características importantes do rádio cognitivo. Neste processo, o usuário secundário busca as melhores bandas do espectro para retomar a sua comunicação, dado que a faixa atual se torna indisponível ou não atende os requisitos da sua aplicação. Propostas iniciais para este processo de busca e troca de faixas de espectro têm utilizado uma abordagem reativa. Nesta forma de acesso, a procura por uma faixa disponível é iniciada somente após o aparecimento do usuário primário na faixa atual ocupada pelo usuário secundário, o que ocasiona um dado instantâneo de interferência à operação licenciada [Arslan 2007].

Outra abordagem para *handoff* de espectro é a chamada pró-ativa. Na abordagem pró-ativa o US busca estimar o padrão de uso dos canais licenciados. Com isso, a troca de canais ocorre antes do retorno do UP ao canal atualmente ocupado pelo US, minimizando a interferência do US à comunicação licenciada [Cabric' 2004].

No trabalho apresentado em [Yang 2007], os autores propõem uma abordagem pró-ativa 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 pró-ativo 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 *handoff* de espectro realizados pelo usuário secundário.

Em [Kim 2008] propõe-se, 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.* [Zhu 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.

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. 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, em [Baldo 2008] propõe-se 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 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 propomos a utilização de RNA 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 US e alcançar uma melhor eficiência espectral.

3. Estratégia Proposta

Nesta seção apresentamos a estratégia pró-ativa 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 de Qualidade de Serviço (QoS) de sua comunicação; prover uma melhor utilização do espectro. Além do que, 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 1.

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 estrutura, o método de sensoriamento adotado é o de detecção de energia.

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 $C_{e1}, C_{e2}, C_{e3}, \dots, C_{en}$. Aqui, C_{ei} , 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 3.1 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 3.2.

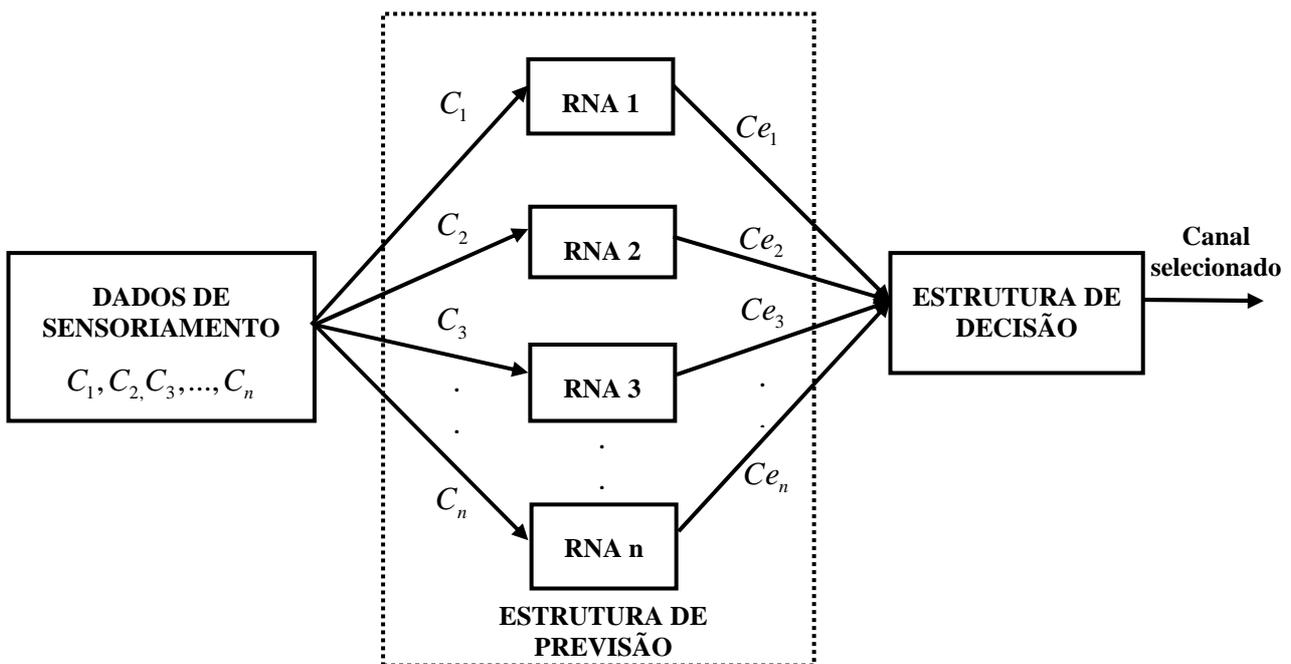


Figura 1: Esquemático da estratégia proposta.

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 2008]. Entretanto, este não é o foco deste trabalho.

3.1 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 que estima o comportamento de cada canal, como mostra a Figura 1, a fim de proporcionar um melhor desempenho de previsão. 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 todas utilizam a mesma topologia.

Para a escolha da estrutura da RNA, realizaram-se vários testes com diversas topologias de redes neurais perceptron multicamadas [Haykin 1994]. Nestes testes, parâmetros como número de neurônios da camada escondida, número de neurônios da camada de entrada (amostras passadas), taxa de aprendizagem e função de ativação dos neurônios da camada escondida foram variados. A topologia da RNA consistindo de dois neurônios na camada de entrada (relacionados a duas amostras de sensoriamento atrasadas no tempo), 20 neurônios na camada escondida com função de ativação tangente hiperbólica, um neurônio na camada de saída com função de ativação linear e taxa de aprendizagem de 0,01 foi a que obteve o melhor desempenho considerando a complexidade da RNA e os critérios I e II definidos. 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 4. O algoritmo de aprendizado usado para o treinamento da RNA foi o *Backpropagation*.

A Tabela 1 sumariza os parâmetros e a topologia das RNAs utilizadas na abordagem. Os resultados da avaliação e desempenho da topologia selecionada serão apresentados na Seção 5, sendo que os critérios I e II foram adotados para escolha da melhor topologia. MSE_{ref} corresponde ao erro quadrático médio desejado (referência), cujo valor utilizado foi de 0,01; MSE_{trein} é o erro quadrático médio obtido na fase de treinamento da RNA; MSE_{valid} é o erro quadrático médio relativo à fase de validação.

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

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

Tabela 1: Parâmetros e topologia da RNA.

N° de neurônios na camada de entrada	2
N° de neurônios na camada escondida	20
N° de neurônios na camada de saída	1
Função de ativação da camada escondida	Tangente hiperbólica
Função de ativação da camada de saída	Linear
Janela de predição	1,86s
Taxa de aprendizagem	0,01
MSEref	0,01

3.2 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, na nossa proposta, 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.

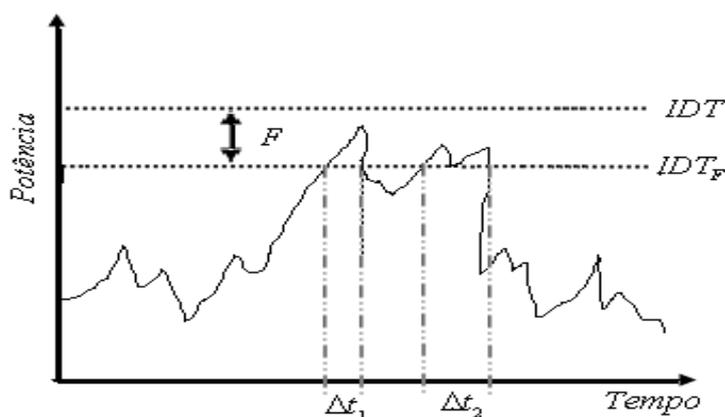


Figura 2 Avaliação de disponibilidade de canal

A Figura 2 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, onde 0.2dBm foi o que proporcionou melhor desempenho da estratégia considerando as métricas definidas na Seção 5.1.

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 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 [Cordeiro 2007]. 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 2.

4. 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 2006]. Ademais, a largura de bandas de tais sinais é de 200 kHz, conforme definido no padrão.

Na avaliação, foram utilizados quatros canais de comunicação com características descritas acima, cujos comportamentos podem ser observados nas Figuras 3, 4, 5 e 6 em linha tracejada. No entanto, esta abordagem é totalmente extensível para mais canais, conforme visto na Figura 1. 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 os resultados da comparação com a abordagem reativa utilizaram 2.998 amostras. A Tabela 2 sintetiza os parâmetros e dados utilizados no estudo da estratégia proposta

Tabela 2: Dados utilizados na avaliação da estratégia.

Faixa de Frequência	450 MHz à 500 MHz
Número de Canais	4
Largura de banda dos canais	200 KHz
Usuário Primário	Sinal de microfone sem fio
IDT	-107 dBm
Número de amostras	4152
Período de sensoriamento	1,86 s

5 Resultados e Avaliação

Nesta seção 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 na Seção 4. O desempenho da proposta em termos de nível de interferência no UP, número de handoffs e utilização, é comparado com os obtidos por um esquema reativo. Para a implementação dos esquemas utilizou-se o *software* Matlab[MathWorks 2010].

5.1 Avaliação da Estrutura de Previsão

Nesta Seção apresentam-se os resultados obtidos pela estrutura de previsão, composta pelas RNAs, cujas topologias foram definidas na Seção 3.1. Os resultados de desempenho de cada RNA, tanto no processo de treinamento quanto de validação para o canal correspondente, são apresentados na Tabela 3.

A avaliação da topologia utilizada nas RNAs e justificativa da sua escolha são baseadas nos critérios definidos em (I) e (II), 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 3, 4, 5 e 6, as RNAs conseguiram na fase de treinamento aprender o comportamento dos canais utilizados. Esta aprendizagem pode ser inferida através dos valores de MSE_{trein} obtidos para cada RNA, os quais estão dispostos na Tabela 3. Nota-se que todas as RNAs conseguiram valor de MSE_{trein} 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 3. Com isso, os modelos de RNAs adotados podem ser utilizados para estimar o padrão de uso dos canais licenciados, possibilitando o acesso oportunista e pró-ativo do espectro ao usuário secundário.

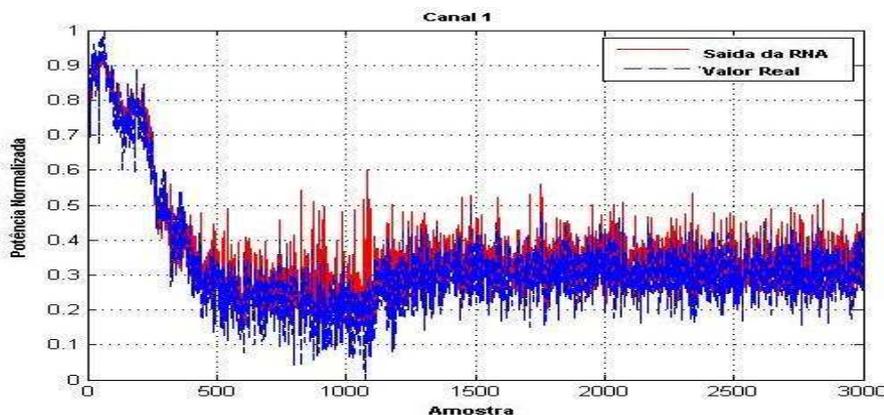


Figura 3: Resposta RNA e valor real para o canal 1

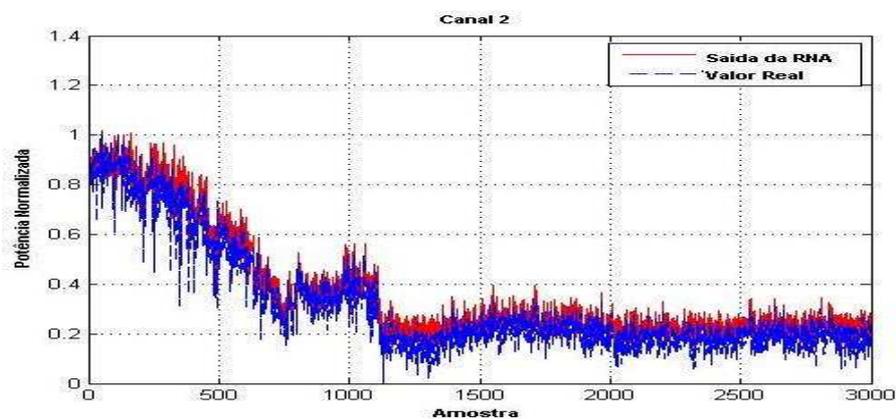


Figura 4: Resposta RNA e valor real para o canal 2

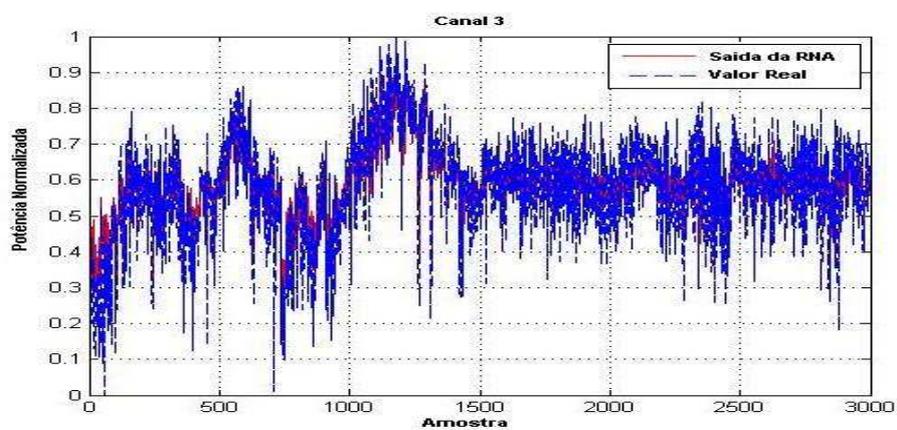


Figura 5: Resposta RNA e valor real para o canal 3

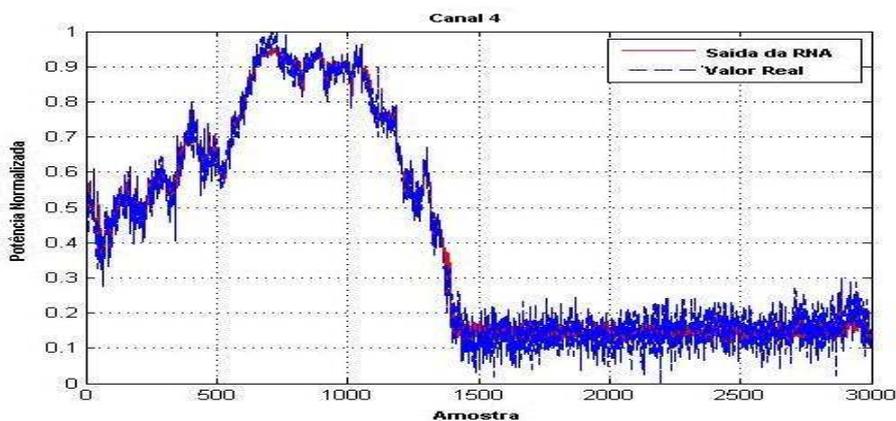


Figura 6: Resposta RNA e valor real para o canal 4

Tabela 3: Resultados das RNAs

Canal	MSE_{trein}	MSE_{valid}	$ MSE_{\text{trein}} - MSE_{\text{valid}} $
Canal 1	0,004592	0,005644	0,001052
Canal 2	0,003985	0,003934	0,000051
Canal 3	0,009613	0,009698	0,000085
Canal 4	0,001692	0,003182	0,001490

5.1 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 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 U_{US} , 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 por (III), 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:

$$U_{US} = \frac{\text{tempo}_{\text{transmitindo}}}{\text{tempo}_{\text{sem}_{\text{transmitir}}} + \text{tempo}_{\text{transmitindo}}} \quad (\text{III})$$

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 na Seção 2.

5.2 Avaliação da estrutura global

Esta seção discute os resultados obtidos no processo de simulação da estratégia proposta, denotada por “Pró-ativo-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 2007]. Não se avaliou a abordagem proposta em relação a outro esquema pró-ativo devido aos esquemas dispostos na literatura serem baseados em considerações estocásticas e não em medições reais.

O ambiente de simulação é composto por um usuário secundário e quatro usuários primários, cujo comportamento de uso do espectro foi mostrado na Seção 4. 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 1, por exemplo ou através de trocas de mensagens entre os USs, em um modo descentralizado.

A Figura 7 mostra os resultados numéricos obtidos para a métrica de interferência em ambos os esquemas de acesso ao espectro. O US provocou apenas 14 interferências à comunicação licenciada com o emprego do esquema Pró-ativo-RNA, o que representa 26,31% de melhoria em relação ao acesso reativo que, por sua vez, causou 19 interferências na transmissão do UP. 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, bem como da inserção do fator de segurança na abordagem. 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 US, indicando quando e para qual canal disponível comutar proativamente. Tal resultado é bastante relevante, devido ao requisito para a utilização oportunista do espectro: a minimização da interferência na comunicação primária.

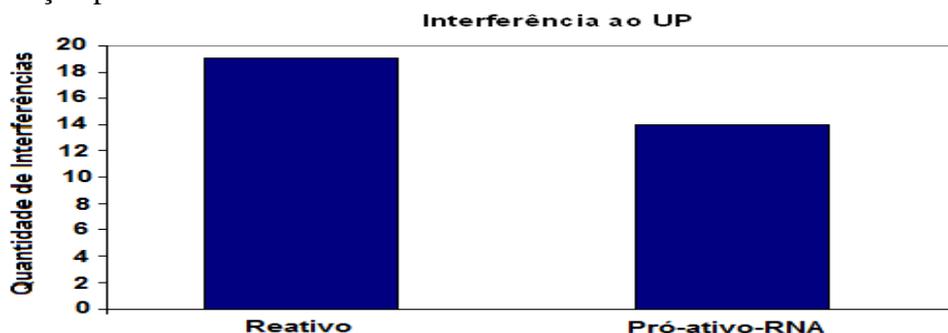


Figura 7: Resultados quanto à interferência provocada ao UP

Em relação ao número de *handoffs* (Figura 8) realizados pelo US, que influencia diretamente na garantia de QoS de sua aplicação, com o esquema pró-ativo-RNA proposto, o US realizou apenas 15 *handoffs* de espectro, enquanto que com a abordagem reativa foram realizados 38 *handoffs*. Isto representa um desempenho superior à abordagem reativa em aproximadamente 60,52%. Tal desempenho é devido à tomada de decisão inteligente realizada pelo US utilizando a abordagem proposta. Com a estimativa 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. Nesta escolha, um dos aspectos levados em consideração pela abordagem proposta é a minimização do número de comutação de canais, pois isto degrada a comunicação secundária.



Figura 8: Resultados quanto ao número de handoffs do US

Na utilização espectral, no esquema pró-ativo-RNA o usuário secundário obteve uma utilização de 89,78% do espectro, representando uma melhoria de 2% em relação ao esquema reativo, que proporcionou uma utilização espectral de 89,76% ao US. A Figura 9 exibe os resultados de utilização espectral. Um fator que pode ter influenciado na proximidade dos resultados obtidos, quanto à utilização, foi o número de canais tomados na simulação, pois neste caso existiam períodos de tempo que o US ficou sem

transmitir, devido a indisponibilidade de canais. No entanto, mesmo neste caso, o esquema proposto mostrou superioridade em relação à abordagem reativa.

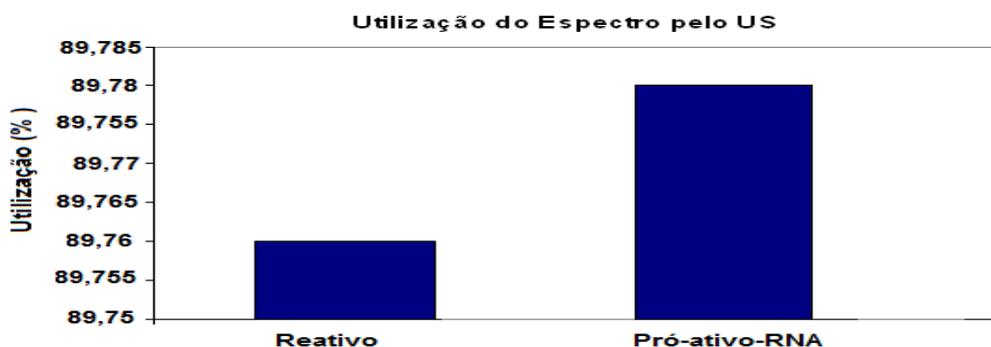


Figura 9: Resultados quanto à utilização pelo US.

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 RC.

6. Conclusão e Trabalhos Futuros

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* eficiente e rápido de espectro é um requisito chave para o uso eficiente de redes baseadas em RC.

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.

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.

Para trabalhos futuros, pretende-se avaliar a estratégia utilizando um número maior de canais, bem como associar sistema de lógica fuzzy à estrutura de decisão a fim de se obter um sistema inteligente na sua totalidade para *handoff* de espectro.

Referências

- Akyldiz I. F., Vuran M.C., Lee W. Y., Mohanty S. (2006). “Next generation/dynamic spectrum access/ cognitive radio wireless networks: A survey”. *Computer Networks*. Nº 50.
- Arslan H. (2007). “Cognitive Radio, Software Defined Radio, and Adaptive Wireless Systems”. *Springer*.
- Baldo N., Zorzi M. (2008). “Learning and Adaptation in Cognitive Radios using Neural Networks”. *IEEE Consumer Communications and Networking Conference*.
- Cabric’ D., Mishra S.M., Brodersen R.W. (2004). “Implementations Issues in Spectrum Sensing for Cognitive Radio”. *Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*.
- Cordeiro C., Challapali K., Birru D. (2006), “An Introduction to the first Wireless Standard based on Cognitive Radio”, *Journal of Communications*. Vol. 1. Nº 1.
- Cordeiro C., Challapali K., Kim H., Shin K. G. (2007), “ An experimental approach to Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks with Off-the-Shelf IEEE 802.11 Devices”. *IEEE Consumer Communications and Network Conference(CCNC)*.
- Dyspan (2008) <http://www.ctvr.ie/en/dyspan/ChicagoMeasurementsDySPANDemoPack.zip>
- Haykin S. (1994) “Neural Networks: a comprehensive foundation”. *Prentice-Hall*.
- Haykin S. (2005). “Radio: Brain-Empowered Wireless Communications”. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. Vol 23. Nº. 2
- Kim H., Shin K.G. (2008). Efficient Discovery of Spectrum Opportunities with MAC-Layer Sensing in Cognitive Radio Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*. Vol. 7. Nº 5.
- Lee W.Y., Akyldiz I. F. (2008). “Optimal spectrum sensing framework for cognitive radio networks”. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. Vol. 7. Nº. 10
- MathWorks (2010) <http://www.mathworks.com/>
- Menezes A.S. (2007). “Avaliação de Desempenhos de Rádios Cognitivos e Proposta de Estrutura de Equalização Temporal em Sistemas OFDM”. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.
- Tsagkaris K., Katidiotis A., Demestichas P. (2008). “Neural network-based learning schemes for cognitive radio systems”. *Computer Communications*. Vol. 31.
- Vuran M.C., Akyldiz I. F., Lee W. Y., Mohanty S.(2008). “A survey on spectrum management in cognitive radio networks”. *IEEE Communications Magazine*.
- Zhu X., Shen L., Yum T.P. (2007). “Analysis of Cognitive Radio Spectrum Access with Optimal Channel Reservation”. *IEEE Communications Letters*. Vol. 11. Nº 4.
- Yang L., Cao L., Zheng H. (2007). “Proactive channel access in dynamic spectrum networks”. *Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM)*.