

Algoritmo de decisão espectral usando teoria dos jogos para rádios cognitivos

Roberto M. Schmidt¹, Lauro Tremea Culau¹, Matias Schimunek¹, Matheus Eidt¹, Rafael Nicolay¹,

Cristiano Both¹, Leonardo Roveda Faganello², Maicon Kist²

Universidade de Santa Cruz do Sul¹, Universidade Federal do Rio Grande do Sul²

{rmainardi, laurotc, matiass, matheus, rafaelrodrigo}@mx2.unisc.br,

cboth@unisc.br, {lrfaganello, maicon.kist}@inf.ufrgs.br

Resumo—A atual alocação do espectro de frequências, fundamental para realizar acesso à redes sem fio, é ineficiente, uma vez que os canais não são distribuídos conforme sua disponibilidade. Dessa maneira, muitos canais estão alocados, porém ociosos. Nesse contexto, Rádio Cognitivo surgiu como uma ferramenta para aprimorar o uso do espectro de frequências. O princípio por trás deste conceito é detectar canais não utilizados por usuários que detêm sua licença de uso e permitir que usuários não licenciados possam utilizá-los. Para isso, é preciso que cumpram alguns requisitos, como por exemplo, interromper sua transmissão assim que um usuário licenciado inicie uma transmissão no mesmo canal. Desta forma é necessário dotar os dispositivos de inteligência, ou seja, fazer com que os dispositivos possuam capacidade cognitiva ou de aprendizado. Esse artigo descreve um algoritmo que utiliza técnicas de Aprendizado de Máquina, que mais especificamente usa Teoria dos Jogos para auxiliar a Seleção Dinâmica de Canal e apresenta os resultados obtidos através da implementação do algoritmo proposto.

I. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por acesso à redes sem fio pode ser observada pelo crescimento exponencial do uso de telefones celulares nas últimas décadas e de dispositivos que disponibilizam acesso à Internet sem fio, como por exemplo, *Access Points*. Devido ao crescimento do número desses dispositivos, ocorre um aumento da utilização do espectro de frequências, que é o recurso essencial para o provimento de serviços sem fio, entre eles, redes WiFi e de celular.

A responsável por regulamentar o acesso ao espectro de frequências no Brasil, é a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), vinculada ao Ministério das Comunicações. Atualmente, a regulamentação para acesso ao espectro consiste na alocação de faixas de frequências para entidades licenciadas. Estas entidades, possuem o uso prioritário do recurso e faixas de frequências livres denominadas ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) para uso compartilhado entre dispositivos não licenciados [1]. Entretanto, essa alocação é feita de forma estática, por longos períodos de tempo e em grandes regiões geográficas [2]. Essa política dificulta a alocação de novas faixas de frequência, devido à escassez de canais livres no espectro. Além disso, como nem todos os usuários licenciados estão transmitindo durante todo o tempo, ocorre a geração dos denominados "espaços em branco" (*white spaces*) [3], que são regiões do espectro de frequências que encontram-se ociosas.

A baixa utilização efetiva dos canais estimulou a *Federal Communication Commission* (FCC), organização governamental reguladora dos sistemas de Rádio Frequência (RF) nos Estados Unidos¹, a criar uma nova metodologia de acesso

ao espectro de frequências, onde usuários não-licenciados possam utilizar temporariamente as regiões do espectro que encontram-se ociosas. O acesso em períodos nos quais uma determinada frequência não está em uso é conhecido como *Dynamics Spectrum Access* (DSA). Nesse contexto, Rádios Cognitivos (RC) surgiram como principal alternativa para viabilizar a implementação de técnicas de acesso dinâmico ao espectro de frequências, pois permitem que um maior número de usuários possam acessá-lo simultaneamente [4].

Neste artigo, propõe-se um algoritmo de alocação de usuários não-licenciados no espectro de frequências utilizando técnicas de aprendizado de máquina. O aprendizado de máquina é uma área da inteligência artificial que utiliza raciocínio indutivo e procura prever eventos futuros baseados em acontecimentos prévios. No contexto de decisão espectral, essa característica é particularmente útil, porque as condições do canal podem mudar rapidamente, sendo necessário um algoritmo inteligente, capaz de prever qual canal ficará disponível por mais tempo. Quando é iniciada uma transmissão de um usuário primário no canal escolhido, é necessário efetuar *handoff* de espectro, ou seja, alterar o canal de transmissão. A implementação do algoritmo de aprendizado de máquina foi realizada utilizando-se o *software* GNU Radio² e prototipado em um *hardware* da Ettus, modelo USRP N210³. Com a utilização desses equipamentos é possível realizar transmissões e fazer a troca dos canais durante a transmissão. Os resultados obtidos através do algoritmo proposto apresentam uma transmissão com maior qualidade, pelo fato de o transmissor escolher sempre o melhor canal disponível para efetuar a transmissão.

O restante deste trabalho está organizado como segue: Na Seção II são expostos os conceitos que englobam a proposta de Rádios Cognitivos bem como a técnica de Teoria dos Jogos. Na Seção III são apresentados trabalhos relacionados ao assunto de Aprendizado de Máquina. Na Seção IV é descrita a metodologia de implementação do Algoritmo de Teoria dos Jogos. Na Seção V são expostos o cenário e o ambiente utilizado nos testes. A Seção VI apresenta os resultados obtidos a partir dos experimentos realizados. Por fim, a Seção VII apresenta as considerações finais e trabalhos futuros que poderão ser implementados.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As próximas subseções apresentam com mais detalhes a fundamentação teórica referente ao trabalho proposto.

¹ <http://www.fcc.gov/>; ² <http://www.gnuradio.org/>; ³ <http://www.ettus.com>

A. Rádio Cognitivos

A tecnologia de RCs consiste na capacidade de dispositivos de comunicações sem-fio inteligentes modificarem seus parâmetros de transmissão, tais como: frequência de operação, tipo de modulação, potência de transmissão, protocolos de comunicação entre outros, baseados em iterações com o ambiente em que operam. Com isso, um dispositivo de RC é capaz de conhecer o meio em que transmite e tomar decisões baseado nesse conhecimento, visando oferecer uma utilização mais eficiente do espectro de frequências [5]. Duas características principais de RC são:

- **Capacidade Cognitiva:** Refere-se à capacidade de extrair informações para obter um aprendizado sobre o meio a partir de sua observação, visto que, é possível identificar porções não utilizadas do espectro (*white spaces*) em determinado tempo, como mostrado na Figura 1.

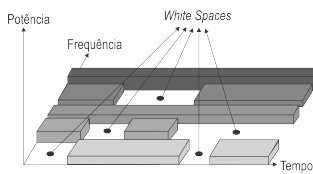


Figura 1. Uso do espectro por usuários licenciados e os *white spaces* criados

- **Reconfigurabilidade:** Através das informações obtidas por meio da capacidade cognitiva, os parâmetros de transmissão do rádio passam por um processo de adaptação às novas condições do meio. Adicionalmente, RC pode ser reprogramado para transmitir e receber dados em diferentes faixas de frequências.

Os requisitos que devem ser atendidos por um RC incluem: I) determinar quais frequências do espectro estão disponíveis, II) selecionar a melhor frequência disponível, III) compartilhar essa frequência com outros usuários e IV) liberar a frequência quando um usuário primário (PU) for detectado [6].

B. Teoria dos Jogos

A Teoria dos Jogos é uma área da matemática aplicada, que estuda as situações estratégicas onde agentes escolhem diferentes ações na tentativa de melhorar seu retorno. Essa teoria visualiza qualquer ambiente multiagentes como um jogo, onde, para qualquer agente, será necessário considerar as ações de outros agentes, bem como o modo que essas ações afetam o próprio agente.

A técnica de Teoria dos Jogos estuda decisões que são tomadas em um ambiente onde vários jogadores interagem entre si ou onde não possui interação entre os jogadores, chamadas de Jogo Cooperativo e Jogo Não-Cooperativo, respectivamente. No primeiro, as escolhas de comportamentos ótimos são tomados a partir das escolhas dos outros jogadores. Já no segundo, cada jogador escolhe uma estratégia que é ótima para si, dado que outro jogador escolherá a estratégia ótima para ele.

C. Software Defined Radio

O *Software Defined Radio* (SDR), é um dispositivo de comunicação sem fio que possui parte de suas funções implementadas por *software* em um computador, ao invés de

usar componentes fixos de *hardware*. A grande vantagem desse paradigma está na possibilidade de integrar e configurar diferentes parâmetros e mecanismos, que possam ser utilizados apenas alterando a programação de seu *software*.

Um SDR pode ser facilmente reconfigurado para desempenhar diferentes funções de acordo com a necessidade. Para suportar diferentes padrões de comunicação, e.g. WiFi, como também ajustar-se às variações do canal de comunicação, basta carregar diferentes tipos de *software* em memória, sem precisar substituir todo o equipamento de rádio [5].

III. TRABALHOS RELACIONADOS

No contexto de Aprendizado de Máquina, o trabalho de Faganello et al. [7] propõe algumas melhorias no Q-Learning para utilização no contexto de decisão espectral. Uma das modificações propostas, foi analisar uma quantidade finita de épocas anteriores, diminuindo o peso de épocas passadas, uma vez que essa informação envelhece. A segunda modificação foi considerar a qualidade do canal como critério para contabilizar a recompensa do Q-Learning. Adicionalmente, os autores propuseram um modelo de comportamento de tráfego no espectro de frequências, com base no trabalho de Ghosh [8].

No mesmo contexto, porém utilizando a técnica de Teoria dos Jogos, Nie et al. [9] propõe um algoritmo que utiliza aprendizado não supervisionado para analisar o comportamento dos RCs para alocação do canal. Para isso, os autores definem duas funções com objetivos diferentes para o *spectrum sharing*, usuários egoístas e usuários cooperativos. Os autores assumem que os rádios podem medir a temperatura local, a interferência em diferentes frequências e podem ajustar-se, otimizando a taxa de transmissão de informação para uma dada qualidade do canal (utilizando codificação adaptativa do canal) e alterando para uma frequência diferente do canal.

Nenhum dos estudos acima leva em conta a abordagem proposta neste trabalho, que se baseia em um algoritmo de Decisão Espectral para decidir qual o melhor canal de frequência para efetuar a transmissão, entre os canais disponíveis no ambiente de Rádio Frequência.

IV. ALGORITMO DE DECISÃO ESPECTRAL

O algoritmo de Decisão Espectral se baseia no modo de Jogo Não-Cooperativo, onde existem dois jogadores, e esses jogadores não interagem entre si. Os *Universal Software Radio Peripherals* (USRPs) são os participantes do jogo. No decorrer desse jogo, cada um dos USRPs possuirá uma pontuação, baseada no valor total do tráfego enviado. A lista com os canais é dividida em quatro partes iguais: canais de muito alta, alta, média e baixa prioridade.

Cada USRP possuirá uma tabela equivalente à Tabela I, obtida a partir dos valores máximos e mínimos de transmissão que esse USRP observou desde o início de sua operação. Os índices dessa tabela são atualizados com o passar do tempo. Com base nessa tabela, cada USRP define qual parte da lista de canais deve utilizar. Dessa forma, dependendo da sua pontuação ele definirá sua prioridade. Baseando-se nessa prioridade, o USRP verifica a lista de canais, já dividida em quatro partes, e, assume que deseja utilizar o primeiro canal de sua prioridade da lista. O USRP, então, informa o canal que deseja utilizar para o módulo sensoramento espectral.

Para a Tabela I, os valores são obtidos da seguinte forma: para cada USRP, MIN é o valor mínimo do tráfego observado, MAX é o valor máximo do tráfego observado e $X = \frac{MAX}{4}$.

Média de Tráfego (μ)	Prioridade
$0 < \mu <= MIN$	Baixa
$(MIN + 1) < \mu <= 2X$	Média
$(2X + 1) < \mu <= 3X$	Alta
$(3X + 1) < \mu <= MAX$	Muito Alta

Tabela I
ATRIBUIÇÃO DA PRIORIDADE

O módulo de sensoriamento espectral então realiza um rápido sensoriamento somente no canal escolhido, certificando-se de que ainda está livre, ou seja, não foi selecionado por nenhum outro jogador. Caso este canal esteja ocupado, uma mensagem é retornada ao USRP informando-o que este canal está temporariamente indisponível. Dessa forma, o USRP deverá excluir esse canal de sua lista, dividi-la novamente em quatro partes iguais e refazer o processo de seleção do canal. Entretanto, caso o canal não esteja ocupado, o USRP ganha o direito de realizar sua transmissão por este canal.

V. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO

Esta seção apresenta detalhes da metodologia utilizada para avaliação da implementação do algoritmo de Decisão Espectral. O foco do trabalho é em um algoritmo para decidir qual o melhor canal de radiofrequência para realizar uma transmissão. A seguir, apresenta-se o ambiente de testes utilizado para execução dos experimentos e o cenário avaliado.

A. Ambiente de Experimentação

Para realizar os experimentos em um cenário real, foi utilizado o software GNU Radio. Ele é um conjunto de ferramentas de código aberto que provê um ambiente de desenvolvimento de componentes de processamento de sinais e blocos de processamento, que possibilita a implementação dos SDRs. O GNU Radio é desenvolvido sob a licença GNU General Public License (GPL), versão 3 e todos os direitos autorais do seu código-fonte pertencem à Free Software Foundation (FSF).

Outra ferramenta utilizada foi o *Universal Software Radio Peripheral* (USRP), que é uma plataforma de SDR flexível e de baixo custo desenvolvido pela Ettus Research. Seus circuitos são formados por dois componentes principais: a placa-mãe, responsável pelas funções programáveis mais complexas, e duas placas-filhas, que possuem os módulos de RF.

O USRP foi o equipamento utilizado na implementação da decisão do espectro, junto com as ferramentas do GNU Radio, visto que, possuem compatibilidade entre si.

B. Cenário

Nesta seção é apresentado um cenário (Figura 2) para comprovar o funcionamento da modelagem proposta neste trabalho. De modo a testar a implementação, foi utilizado um ambiente que contenha dois USRPs, cada um com uma rede sem-fio operando em 2.4 GHz, com seus respectivos dispositivos disputando acesso ao meio.

Dessa forma, para cada USRP, foi realizada uma varredura no espectro de frequências pelo módulo Sensoriamento, extraindo as informações do ambiente. Em seguida, o módulo ChiMaS é responsável pelo armazenamento do histórico de ocupação e das condições de cada canal. Caso o canal seja considerado ocupado, ele é retirado da lista de canais candidatos. Em seguida, de acordo com as informações armazenadas anteriormente, estipula-se uma pontuação para os canais, ordenando-os da maior pontuação (menos ocupado, melhores

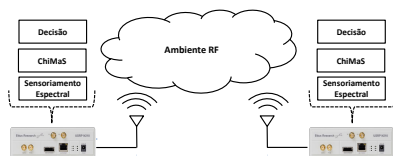


Figura 2. Cenário proposto

condições) para a menor (mais ocupado, piores condições). Por fim, o módulo Decisão é responsável por realizar a decisão de qual canal utilizar. A partir desse cenário de teste, é possível identificar o correto funcionamento do sistema proposto.

Este cenário foi modelado utilizando o software GNU Radio². Para a prototipação desse sistema, foi utilizado um *hardware* de RF desenvolvido pela Ettus Research chamado de USRP-N210³. Estes equipamentos proporcionam a implementação de aplicações robustas de sistemas de SDR, ou seja, sistemas de rádio que podem ter suas características de operação alteradas por um software, como por exemplo, os dispositivos de RC.

Esse capítulo apresentou a solução proposta para este trabalho, bem como o cenário para os testes dessa solução. O próximo capítulo apresentará os resultados obtidos neste trabalho.

VI. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos após uma série de execuções dos experimentos. Os resultados refletem o cenário definido na Seção V.

Para realizar os testes e gerar os resultados, o algoritmo foi executado utilizando 10 medições (ciclos) de tomada de decisão de cada USRP. Dessa maneira, é possível ter uma análise mais detalhada dos valores, pois há um conjunto significativo de amostras para se analisar.

A Figura 3 ilustra, no eixo vertical, a taxa de transmissão de cada USRP, em Kilobytes/segundo (Kbps) e, no horizontal, o número de medições realizadas pelo algoritmo. Isso ilustra o que cada USRP transmitiu ao longo da execução do algoritmo. Esses dados foram coletados pelo algoritmo de decisão espectral, e utilizados no cálculo da escolha da prioridade de cada aparelho.

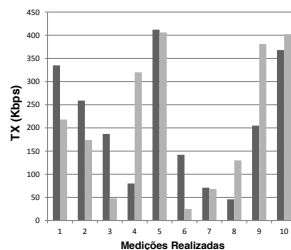


Figura 3. Taxa de Transmissão por medição, para cada USRP

A partir dos valores coletados e observados na Figura 3, o algoritmo definiu as prioridades para cada USRP em cada ciclo de execução (medição), como pode-se analisar na Tabela

II. A escolha da prioridade de cada aparelho é feito segundo a Tabela I. É possível observar que há casos em que ambos os aparelhos tem mesma prioridade, o que faz com que seja necessária uma disputa entre ambos, para determinar quem irá transmitir no melhor canal da prioridade selecionada. Essa escolha também se baseia na quantidade de dados que será transmitida, ou seja, os USRPs com mais dados a serem transmitidos, tendem a ter maior prioridade na escolha do melhor canal.

Medições	Prioridade USRP 1	Prioridade USRP 2
1	Baixa	Baixa
2	Muito Alta	Muito Alta
3	Muito Alta	Muito Alta
4	Alta	Alta
5	Alta	Alta
6	Média	Alta
7	Média	Alta
8	Média	Média
9	Média	Média
10	Alta	Alta

Tabela II
PRIORIDADES DE CADA USRP POR MEDIÇÃO

O algoritmo de decisão espectral, então, utiliza os dados da Figura 3 e da Tabela II para realizar a escolha do canal de transmissão a ser utilizado, que, como mencionado anteriormente, leva em conta a quantidade de dados a serem transmitidos pelo equipamento em determinado ciclo de execução.

Na Figura 4 observa-se que em cada medição do sistema, os USRPs transmitiam em diferentes canais. Vê-se também, que, mesmo quando as prioridades de cada USRP, na Tabela II, são iguais, o algoritmo de decisão espectral consegue escolher um canal diferente para cada um dos equipamentos, devido às técnicas de Teoria dos Jogos utilizadas na implementação.

Como podemos ver na figura 4, os canais de frequência 1 e 2 possuem prioridade Muito Alta, o que torna-os canais com melhor qualidade para transmissão, já os canais 7 e 8 são os canais que possuem prioridade Baixa, pois são os canais com menor qualidade para a transmissão.

Também é possível analisar que, segundo o cálculo de prioridade, o primeiro ciclo de execução, sempre terá prioridade Baixa, que acarretará a escolha de canais de pior qualidade. Isso se dá pelo fato do cálculo utilizar uma média de transmissão. Durante a primeira execução, apenas um valor será observado, tornando-se, assim, tanto o valor mínimo quanto máximo. Todavia, no decorrer da execução, quando mais medições são executadas, novos valores aparecem e é realizado um cálculo de média que tende a alterar a prioridade.

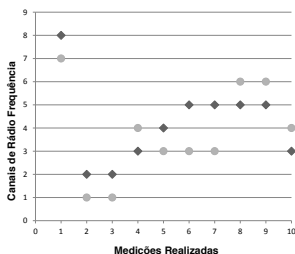


Figura 4. Canais usados por cada USRP para transmissão por medição

VII. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho propôs um algoritmo de decisão espectral utilizando uma técnica de Aprendizado de Máquina em cenários com mais de um dispositivo de rede (USRP), mais especificamente a de Teoria dos Jogos.

O algoritmo de decisão se baseia na quantidade de dados a ser transmitida por cada aparelho e a prioridade dos mesmos. O algoritmo, então, aplica a Teoria dos Jogos que escolhe o melhor canal disponível da prioridade selecionada para efetuar a transmissão dos dados.

Os resultados mostraram que o algoritmo efetua a escolha de canais diferentes para cada aparelho, levando em conta a taxa a ser transmitida e a prioridade dos aparelhos. Essa escolha faz com que a transmissão a ser realizada tenha mais eficiência e qualidade, visto que o algoritmo busca escolher o melhor canal para realizar a transmissão. Conclui-se que o algoritmo de decisão espectral, utilizando a técnica de Teoria dos Jogos, pode trazer benefícios para as transmissões de dados em cenários com mais de um dispositivo de rede.

Através da análise de trabalhos relacionados verificou-se que a tecnologia de RCs é um campo com ampla possibilidade de estudos. No que diz respeito à decisão espectral, observou-se que, até o momento não foram encontrados trabalhos que abordam todos os tópicos que constam neste artigo. Desta forma, espera-se que a contribuição deste trabalho seja de grande importância para este amplo campo de estudo.

Como trabalhos futuros espera-se desenvolver um algoritmo de decisão espectral baseado no modo de Jogo Cooperativo, onde os USRPs compartilham as informações entre si através de um *token*. O *token* define qual dos dispositivos de rede possuirá o privilégio de transmitir no melhor canal. Dessa forma, cada USRP possuirá uma lista de canais disponíveis para transmissão, e o dispositivo que possui o *token* define em qual canal deseja transmitir. Dessa maneira, o dispositivo sempre escolherá o melhor canal da lista. Em seguida, o *token* é repassado para o próximo USRP e o processo se repete.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Ghasemi and E. Sousa, "Spectrum sensing in cognitive radio networks: requirements, challenges and design trade-offs," *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, no. 4, pp. 32–39, 2008.
- [2] I. Akyildiz, W.-Y. Lee, M. C. Vuran, and S. Mohanty, "A survey on spectrum management in cognitive radio networks," *IEEE, Communications Magazine*, vol. 46, no. 4, pp. 40–48, 2013.
- [3] D. Cabric, S. Mishra, and R. Brodersen, "Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios," *Signals, Systems and Computers, 2004. Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on*, vol. 1, pp. 772–776 Vol.1, 2004.
- [4] D. Piazza, P. C. Cosman, L. B. Milstein, and G. Tartara, "A resource allocation algorithm for real-time streaming in cognitive networks," *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pp. 1398–1402, 2009.
- [5] P. S. Coutinho, "Detecção de energia para rádios cognitivos usando gnu radio e usrp2," 2011.
- [6] I. F. Akyildiz, W.-Y. Lee, M. C. Vuran, and S. Mohanty, "Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey," *Computer Networks*, vol. 50, no. 13, pp. 2127–2159, 2006.
- [7] L. R. Faganello, C. B. Both, R. Granville, Z. L. ; Rochol, "Improving reinforcement learning algorithms for dynamic spectrum allocation in cognitive sensor networks," *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, vol. 1, pp. 41–46, 2013.
- [8] C. Ghosh, S. Pagadarai, D. Agrawal, and A. M. Wyglinski, "A framework for statistical wireless spectrum occupancy modeling," *IEEE Wireless Communications, Transactions on*, vol. 9, no. 1, pp. 38–44, 2010.
- [9] N. Nie and C. Comaniciu, "Adaptive channel allocation spectrum etiquette for cognitive radio networks," *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, pp. 269–278, 2005.