

Uma proposta para a melhoria da descoberta de vizinhos em Redes Cognitivas

Yngrid Keila S. Cabral ^[1], Joab de A. Silva ^[2], Marcelo Portela Sousa ^[3]

[1] E-mail: yngrid.k.cabral@ieee.org; [2] E-mail: joab.a.silva@ieee.org; [3] E-mail: marcelo.portela@ieee.org1,2 - Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba - Campus Campina Grande

RESUMO

Diversos serviços sem fio fazem uso do espectro para comunicação, desde radiocomunicação espacial até uma simples rede de computadores sem fio. A considerável quantidade de serviços que fazem uso do espectro nos últimos anos tem sido, porém, responsável pela limitada disponibilidade e ineficiência de sua utilização. As redes cognitivas ou redes de rádios cognitivos são uma tecnologia que oferecem a utilização eficiente do espectro por meio do acesso oportunista às faixas de frequência. Em meio ao cenário de rádios cognitivos, este trabalho apresentará uma variação do algoritmo de descoberta de vizinhos JENNA, além de propor um modelo de sensoriamento para uma abordagem mais eficiente.

Palavras-chave: Rádio Cognitivo. Redes Cognitivas. Descoberta de Vizinhos. Sensoriamento Espectral. JENNA.

ABSTRACT

Several wireless services make use of the spectrum for communication, from space radio communication to a simple wireless computer network. However, the considerable amount of services that make use of spectrum in the last years, has been responsible for its limited availability and inefficiency.. Cognitive networks or cognitive radio networks, are a technology that offer the efficient use of spectrum through opportunistic access to frequency bands. Throughout the cognitive radios scenario, this work will present a variation of the JENNA neighbors discovery algorithm. In addition to that, this research will propose a sensing model for a more efficient approach.

Keywords: *Cognitive Radio. Cognitive Networks. Neighbors Discovery. Spectral Sensing. JENNA.*

1 Introdução

Equipamentos de comunicação sem fio utilizam o espectro como meio para se comunicar. Para evitar, entretanto, que a utilização do espectro torne-se desordenada e para garantir que cada serviço consiga utilizar o espectro sem afetar uns aos outros, regras precisam existir (AKYILDIZ, 2004). O órgão responsável por estabelecer a utilização correta do espectro é a Anatel (Agência Nacional de Telecomunicações), também responsável por determinar qual faixa de espectro cada serviço deve utilizar (ANATEL, 2015).

A Anatel divide o espectro em duas classificações: licenciado e não licenciado; as partes licenciadas do espectro são aquelas destinadas unicamente para um determinado serviço ou usuário primário (P-Primary User) (COUTINHO, 2011). As emissoras de rádio e televisão são exemplos de PRs. As partes não licenciadas são destinadas à utilização por diversos serviços sem contrato prévio com a Anatel, porém os equipamentos utilizados devem ser licenciados por essa Agência, como por exemplo, as frequências utilizadas por microfones sem fio e controles remotos (ANATEL, 2008).

Apenas alguns serviços utilizam o espectro de forma ininterrupta, os demais apenas em momentos em que lhes são necessários, sendo assim, em várias ocasiões, diversas partes do espectro ficam em desuso, ocasionando seu desperdício. A ideia do rádio cognitivo, ou *Cognitive Radio* (CR), é justamente utilizar essas partes do espectro que se encontram em desuso, para efetuar sua comunicação ou quaisquer outros processos (YUE, 2007). Por conta dessa característica, a implementação e o aprimoramento das chamadas redes de rádios cognitivos continuam sendo alvos de pesquisa, com o objetivo de proporcionar um uso eficiente do espectro (AKYILDIZ, 2006; SHU, 2012).

Este trabalho tem por objetivo apresentar uma proposta de aperfeiçoamento de algumas etapas para o processo de descoberta de vizinhos dentro de uma rede de rádios cognitivos, em relação à proposta apresentada no algoritmo JENNA (ASTERJADHI; ZORZI, 2010).

2 Referencial teórico

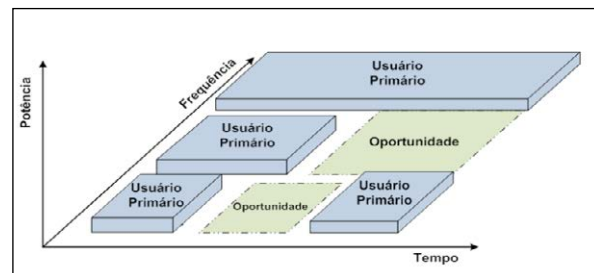
A definição de rádios cognitivos e outros aspectos importantes para o entendimento do desenvolvimento deste trabalho são apresentados nas subseções a seguir.

2.1 Rádios Cognitivos

Rádios Cognitivos, ou CRs, são dispositivos que tem como principal objetivo a reutilização das lacunas espectrais que se encontram em desuso. A utilização dessas lacunas se dá de forma oportunista, ou seja, o CR só permanece utilizando enquanto o serviço proprietário ou PR desta lacuna não estiver presente (SOUSA, 2010).

Algumas das principais características dos CRs são: sua capacidade cognitiva, ou seja, de sensoriar o espectro e, diante dos resultados alcançados, determinar qual canal oferece melhor oportunidade para estabelecer uma comunicação estável e que não ofereça riscos aos PRs (a Figura 1 exemplifica essas oportunidades); e a capacidade de alterar seus parâmetros de configuração, como faixa de frequência ou modulação, de acordo com a necessidade de comunicação (COUTINHO, 2011).

Figura 1 – Oportunidades de transmissão no domínio do tempo e da frequência



Fonte: ALMEIDA, 2010.

A *Federal Communications Commission* (FCC) define o Rádio Cognitivo da seguinte forma:

“um rádio ou sistema que sensoria o seu ambiente operacional eletromagnético e pode, dinamicamente e autonomamente, ajustar seus parâmetros de operação de rádio para modificar a operação do sistema, para maximizar a vazão de dados, mitigar a interferência, facilitar a interoperabilidade ou acessar mercados secundários.” (FCC, 2005, p. 73).

Uma das utilizações dos CRs é na implementação de Redes Cognitivas, Redes de Rádios Cognitivos ou *Cognitive Network* (CN) que, de modo geral, são redes capazes de planejar decisões futuras a partir do cenário atual da rede e de decisões tomadas, sem perder como foco a qualidade de transmissão (SOUSA et al., 2010).

2.2 Sensoriamento Espectral

O processo de sensoriamento espectral tem como objetivo analisar e determinar quais canais estão disponíveis para comunicação (ROCHA *et al.*, 2014). Há diversas técnicas existentes e em desenvolvimento, como é o exemplo da técnica de detecção de energia, uma das mais simples, a escolhida para ser utilizada neste trabalho, na etapa em que os CRs irão inicialmente ocupar um canal.

O detector de energia não precisa conhecer previamente as características dos sinais que irá avaliar durante a etapa de sensoriamento, o seu objetivo é somente determinar se há ou não a presença de um sinal válido no canal. Sendo assim, o detector avalia apenas duas hipóteses, conforme exemplificado na Expressão 1.

$$\begin{aligned} H_0 : y(n) &= z(n) \\ H_1 : y(n) &= x(n) + z(n) \end{aligned} \quad (1)$$

A hipótese diz respeito apenas à presença de ruído no canal, ou seja, o canal está livre, e a hipótese representa a presença de um sinal válido no canal, ou seja, o canal está ocupado (ALMEIDA, 2010).

2.3 Codificação de Canal

Informações transmitidas em sistemas de comunicação sem fio estão constantemente sujeitas à diversas degradações, por exemplo, a degradação ocasionada pela inserção do ruído presente no canal utilizado à informação, em que, dependendo do grau de influência do ruído, a informação pode se tornar incompreensível. Para atenuar os efeitos dos ruídos de canal, técnicas de codificação de canal podem ser adotadas (LOYOLA-CAMORIM, 2010).

A codificação de canal é uma técnica na quais *bits* de redundância são inseridos à informação, de modo que, após a transmissão, a recuperação da informação se torna mais simples (CABRAL *et al.*, 2016). Para o desenvolvimento deste trabalho, foi escolhida a técnica de codificação de canal em blocos Cíclica, pois, conforme exposto por Cabral *et al.* (2016), esta técnica se mostra mais eficiente quanto a recuperação da informação e o desempenho computacional.

2.4 Proposta

Dentro de uma CN os CRs precisam ter conhecimento da existência uns dos outros, para que as decisões em conjunto possam ser tomadas. Neste ponto, entra o conceito de descoberta de vizinhos entre CRs. Asterjadhi e Zorzi (2010) propuseram um algoritmo, chamado JENNA, para realizar esta tarefa, no qual o sensoriamento para descobrir os canais livres é aleatório, se estiver livre, o CR começa a utilizá-lo, senão, todo o processo é realizado novamente. Também, o CR que deseja descobrir os demais deverá enviar pacotes de controle aleatoriamente pelos canais, de modo que, se outro CR sincronizar ou estiver sincronizado no canal em que o pacote foi enviado, começará o seu processo de descoberta de vizinhos.

Dois pontos relevantes quanto ao algoritmo JENNA são: após o processo de descoberta terminar, os CRs precisarão sensoriar constantemente a faixa de espectro na qual a CN se encontra, para verificar se algum outro CR mudou de canal; e quando um CR precisar mudar de canal utilizará o sensoriamento aleatório para encontrar um canal livre.

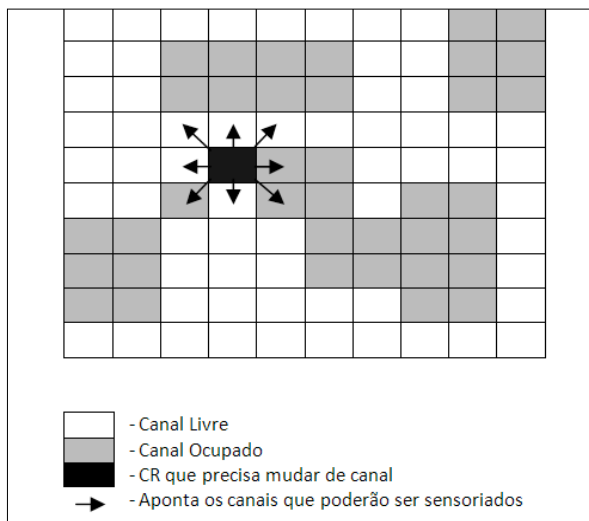
Diante das observações levantadas acerca do algoritmo JENNA, e após estudos aprofundados ao tema, o desenvolvimento deste trabalho buscou propor uma abordagem diferente para etapas do processo de descoberta e pós-descoberta de vizinhos. As propostas são:

Uso de um modelo de sensoriamento baseado no proposto por Rocha *et al.*, quando um CR precisar mudar de canal - Rocha *et al.* (2014), propôs uma nova abordagem para o processo de sensoriamento espectral, no qual se baseia na frequência e no ângulo de chegada. Segundo o algoritmo, o CR escolhe aleatoriamente um canal, se estiver livre, os canais adjacentes são sensorizados com o objetivo de aumentar a largura de banda ou a abertura do ângulo de chegada.

No modelo proposto neste trabalho, os CRs que precisarem mudar de canal pela presença do usuário primário, deverão sensoriar os canais adjacentes em busca de canais livres, visando o menor uso de processamento, pois o deslocamento do CR será menor.

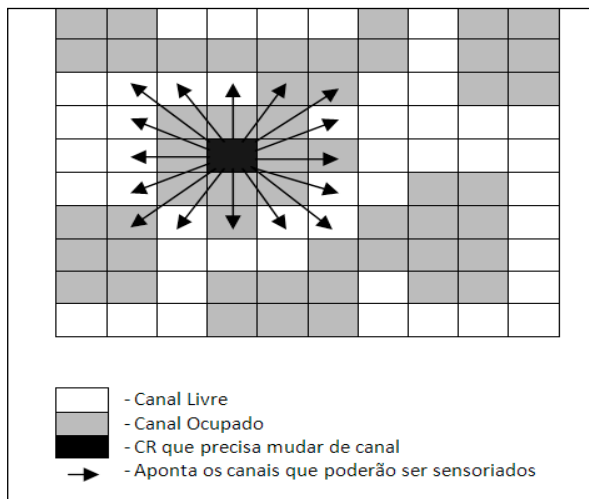
O CR procurará por todos os canais adjacentes, conforme exemplificado na Figura 2, caso não encontre, irá ampliar o raio de adjacência, como mostrado na Figura 3, continuando o processo até que um canal livre seja encontrado.

Figura 2 – Exemplo gráfico do sensoriamento do CR aos canais adjacentes



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 3 – Exemplo gráfico do sensoriamento do CR aos canais adjacentes em um raio ampliado



Fonte: Elaborada pelo autor.

Envio dos pacotes de controle para os canais ocupados - Como dito anteriormente, no algoritmo JENNA, o início do processo de descoberta de vizinhos se dá pelo envio de pacotes de controle por canais aleatórios, no qual outro CR só receberá se estiver sincronizado ou sincronizar no canal em que o pacote foi enviado.

No modelo proposto neste trabalho, para início do processo de descoberta de vizinho, após o sensoriamento e ocupação de um canal, o CR deve enviar um pacote de controle contendo seu ID, que será seu identificador na rede, e a informação do canal que

está ocupando para todos os canais que encontrou como ocupados, de modo a garantir que os outros CRs que se encontram ativos recebam o pacote e comecem o processo de descoberta. Ao receber o pacote de controle, o CR deverá atualizar sua tabela de vizinhos e enviar um pacote de controle contendo suas informações.

Vale salientar que até esta etapa do trabalho não foi considerada a presença de agentes maliciosos na rede.

O CR que mudar de canal deverá informar sua localização aos demais - Após o estabelecimento da rede, os CRs permaneceram utilizando o canal de forma oportunista enquanto os PRs se encontraram ausentes. Porém, no momento em que um PR desejar ocupar o espectro, o CR deverá utilizar o modelo de sensoriamento proposto para encontrar um novo canal, e após ocupar, deverá enviar um pacote de controle aos demais CRs contendo o ID e a informação referente ao novo canal ocupado. Ao receber o pacote, os demais CRs irão atualizar sua tabela de vizinhos. Este processo deve se repetir sempre que um CR mudar de canal.

Desse modo, o CR não precisará sensoriar constantemente o canal para manter a tabela de vizinhos atualizada, o uso de sensoriamento constante será apenas para verificar a chegada do PR para utilizar o espectro.

3 Materiais e métodos

Para a elaboração deste trabalho, um simulador da criação de uma rede de rádios cognitivos foi desenvolvido com a utilização da ferramenta MATLAB (*MATrix LABoratory*), na versão R2015a, que é uma plataforma utilizada para resolver problemas científicos e de engenharia (MATLAB, 2016).

Na primeira etapa do simulador, é executado o sensoriamento espectral da rede CR, para verificação dos canais livres e ocupados. A rede é simulada por uma matriz 30x30 e foi adotado um limiar de 20% para a detecção energia. Se a energia no canal for abaixo do limiar, considera-se o canal livre e acima do limiar, canal ocupado. Também, foram simulados 20 CRs e PRs.

Após o sensoriamento espectral, o CR ocupa o primeiro canal livre disponível e preenche sua tabela de vizinhos, contendo a informação dos canais livres e ocupados. Além das informações das tabelas já informadas anteriormente, o CR contém sua ID, que

é sua identificação na rede, e a informação de qual canal está ocupando naquele momento.

Simulando vários CRs, após a fase de sensoriamento, estes ocupam os canais livres e iniciam o processo de descoberta de vizinhos e a atualização das tabelas de canais livres e canais ocupados na rede.

Com os CRs ocupando os canais anteriormente livres, foi simulada a chegada de PRs na rede, em que, o CR que estiver ocupando o canal de um PR deverá desocupar e buscar um novo canal livre. Vários PRs foram simulados, e os modelos de sensoriamento, previamente mencionados, foram aplicados e testados em diferentes simulações.

Como dito, cada CR que mudar de canal, deverá informar a sua nova localização aos demais e, conseqüentemente, cada CR atualizará suas respectivas tabelas de vizinhos.

Por fim, são apresentados gráficos e tabelas com comparativos de desempenho entre as duas técnicas abordadas, com foco no tempo gasto por cada modelo, número de canais ocupados e a quantidade de tentativas para ocupar um canal, com o objetivo de demonstrar qual modelo consumiu menos recurso computacional.

4 Simulação

Foram simulados os dois modelos de sensoriamento espectral, o modelo baseado no proposto por Rocha *et al.* (2014) e o JENNA.

Após a fase de sensoriamento, os vinte CRs simulados buscaram ocupar o primeiro canal livre que encontraram. Para que pudessem ocupar os canais livres, cada CR terá as seguintes informações:

- ID;
- Posição atual;
- Tabela de canais livres;
- Tabela de canais ocupados;
- Vizinhos;
- **Flag.**

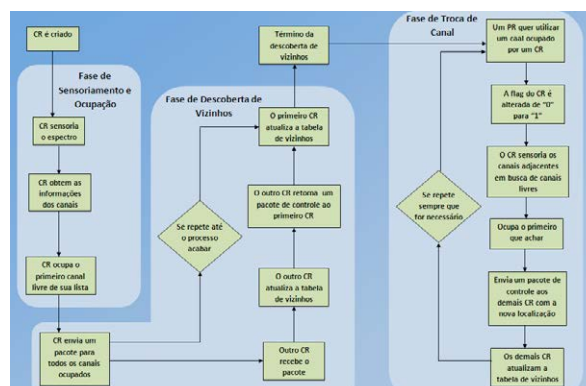
De posse das informações citadas, o CR iniciará a fase de descoberta dos vizinhos enviando um pacote de controle com seu ID e a informação do canal que está ocupando para todos os canais que estão na tabela de canais ocupados, de modo que, ao receber, os demais CRs atualizarão suas tabelas de vizinhos,

canais livres e ocupados e enviarão como retorno um pacote de controle semelhante ao recebido. Dessa forma, todos os CRs serão atualizados da estrutura da rede.

Na primeira simulação, foi utilizado o modelo baseado no proposto por Rocha *et al.* (2014), em que, ao detectar a presença de um PR, o valor da Flag do CR é alterado do padrão '0', para '1'. O CR fará o sensoriamento nos canais adjacentes, buscando algum canal livre para que possa ocupá-lo,

caso não encontre nos seus adjacentes, o escopo de busca aumentará, até encontrar um canal livre. Ao ocupar o canal livre, o CR atualizará suas informações e enviará essas informações para os vizinhos para que possam atualizar suas tabelas. Por fim, com o canal livre, o PR poderá ocupá-lo. A Figura 4 apresenta um fluxograma das etapas realizadas durante a simulação.

Figura 4 – Fluxograma das etapas da simulação



Fonte: Elaborado pelo autor

Na segunda simulação, utilizando o modelo JENNA, ao ocupar o canal de um PR, a Flag do CR é ligada ('0' para '1'). Com a Flag em '1', o CR busca um novo canal livre de forma aleatória, gerando um número de 1 a 900, tendo em vista que a rede foi simulada como uma matriz 30x30, usando a função randi que gera inteiros aleatórios distribuídos uniformemente. O número gerado é referente ao canal que o CR verificará se está livre, caso esteja, o CR ocupará, desligará sua Flag ('1' para '0') e atualizará as suas informações, caso contrário, o CR gerará outro número aleatório, até que encontre um canal livre para ocupar. Por fim, enviará as informações do novo canal ocupado para os outros CRs na rede.

Em ambas simulações, foram empregadas a codificação de canal Cíclica, pois conforme apresen-

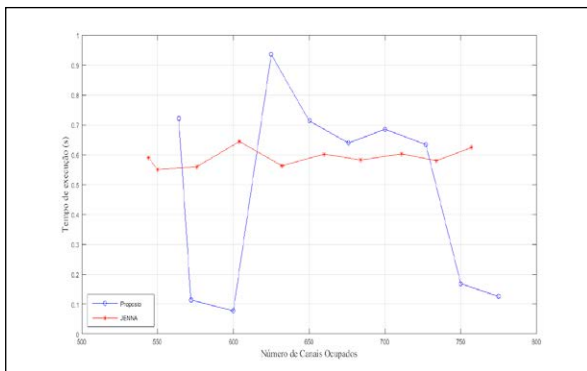
tado em Cabral *et al.* (2016), esta mostrou-se mais eficiente. Nas simulações, a codificação foi aplicada na comunicação entre CRs, durante o processo de descoberta de vizinhos.

No final de cada simulação, foi armazenado o tempo gasto na simulação, a quantidade de tentativas para a ocupação do canal e o número de canais ocupados naquele momento, para uso nos gráficos e tabelas das simulações. Vale salientar que foram executadas 10 iterações em cada simulação e 10 simulações para cada modelo, de modo a poder coletar a média de cada simulação e, por fim, gerar uma média global para ambos os métodos.

5 Resultados e discussão

A Figura 5 apresenta um gráfico no qual o eixo vertical diz respeito ao tempo e o eixo horizontal representa a quantidade de canais ocupados. O tempo abordado no resultado obtido se refere ao tempo de processamento gasto em cada iteração da simulação e a informação do eixo horizontal tem relação à quantidade de canais ocupados em cada iteração da simulação.

Figura 5 – Gráfico com o tempo de execução da simulação

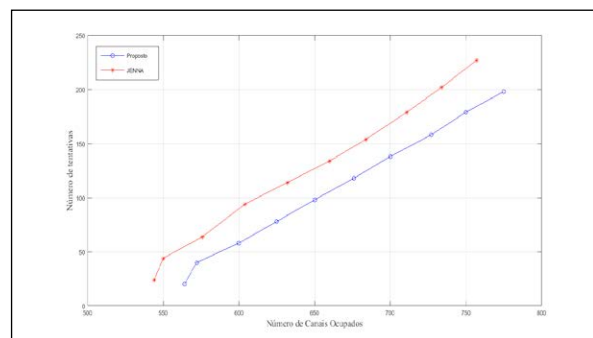


Fonte: Dados da pesquisa.

É possível observar que o método proposto obteve maior variação de tempo em cada interação em relação ao método JENNA, que se manteve praticamente constante. Vale salientar que, mesmo com grandes variações de tempo, o método proposto em dado momento obteve tempos de execução baixos, se comparado ao método JENNA, sendo assim, pode-se dizer que, na média, o método proposto mostra-se melhor, conforme mostrado nas tabelas 1 e 2.

Na Figura 6, é apresentado o número de vezes em que os CRs executaram o sensoriamento espectral a cada interação. Pode-se observar que os CRs, no método proposto, conseguiram encontrar canais livres com menos tentativas em comparação com o método JENNA. É preciso salientar que, nas simulações feitas neste trabalho, foram consideradas como tentativas todas as vezes que os CRs realizaram o sensoriamento para encontrar um canal livre, seja usando o método proposto ou o JENNA.

Figura 6 – Gráfico com o número de tentativas



Fonte: Dados da pesquisa.

Na Tabela 1, são expostas as médias de tempo e de tentativas de cada método nas simulações realizadas. Diante dos resultados obtidos, é possível observar de forma um pouco mais clara, o que já foi dito anteriormente, no qual, por mais que o método proposto tenha obtido bastante variação nos tempos de execução, de forma geral, obteve as melhores médias. Utilizando o tempo de 0,5 segundos como um parâmetro de comparação, o método proposto obteve seis médias abaixo de 0,5 segundos, enquanto o método JENNA obteve apenas quatro médias abaixo dos 0,5 segundos.

Tabela 1 – Tabela de Médias das simulações

| Médias de Tempo em segundos | | Médias de Tentativas | |
|-----------------------------|--------|----------------------|-------|
| PROPOSTO | JENNA | PROPOSTO | JENNA |
| 0,6716 | 0,6059 | 109 | 126 |
| 0,6610 | 0,5804 | 109 | 128,5 |
| 0,1506 | 0,5886 | 107,5 | 114 |
| 0,3071 | 0,2637 | 112 | 111 |
| 0,6360 | 0,5863 | 108 | 124 |
| 0,2909 | 0,5915 | 107 | 118 |
| 0,3536 | 0,4634 | 107 | 120 |
| 0,5174 | 0,5364 | 108 | 112 |
| 0,2434 | 0,2218 | 113 | 123 |
| 0,2464 | 0,2408 | 107 | 112 |

Fonte: Dados da pesquisa.

Na Tabela 2, é apresentada a média geral de ambos os métodos após as 10 simulações. É observado claramente que o método proposto obteve a melhor média, apesar de suas variações no tempo de execução.

Tabela 2 – Média Geral

| Método | Tempo de Execução em segundos | Tentativas |
|----------|-------------------------------|------------|
| PROPOSTO | 0,3304 | 108 |
| JENNA | 0,5584 | 119 |

Fonte: Dados da pesquisa.

Vale observar que ambos os métodos tiveram comportamento semelhante, no que se diz respeito ao número de tentativas, porém, com a vantagem de que o método proposto, em sua maior parte, precisou de menos tentativas do que o método JENNA. Em relação à métrica tempo de execução, que se trata de um fato importante para qualquer ambiente, em alguns momentos, o método JENNA se mostrou melhor, porém, como mostrado na Figura 5, este método mantém uma média, independentemente se o ambiente proposto na simulação tem muitos ou poucos canais livres, isso não é um comportamento interessante, visto que, espera-se que com mais canais livres o algoritmo tenha desempenho melhor,

no entanto, devido a sua característica aleatória isso não ocorre.

O método proposto tem duas características que influenciam em seu desempenho, que é o canal em que o CR se encontra e o uso computacional que o método exige. O canal em que o CR se encontra influencia, pois, se o mesmo estiver em um canal em que seus canais vizinhos estejam ocupados, o escopo de sensoriamento precisará aumentar, ou seja, quanto mais canais ocupados o CR tiver como vizinhos, maior será o tempo de busca por um canal livre. O uso computacional é óbvio, pois esse método de sensoriamento abrange mais canais por vez, em relação ao método JENNA. Logo, o fato do método proposto precisar utilizar mais recurso computacional, diante do cenário exposto, revela um ponto negativo deste método. Outro ponto de impacto neste modelo diz respeito à complexidade do algoritmo, tendo em vista que a técnica de sensoriamento proposta necessita de uma inteligência computacional superior em relação ao modelo aleatório da técnica JENNA.

Observando no âmbito geral da simulação e os resultados obtidos, mesmo que em certo ponto ambos modelos se mostraram com comportamentos semelhantes, o modelo proposto neste trabalho, em sua maior parte, se mostrou com um desempenho superior.

6 Conclusão

Em ambientes de comunicações sem fio, a disponibilidade de espectro livre é um fator crucial para a qualidade e disponibilidade na comunicação entre meios que usam do espectro.

Torna-se um desafio maior, quando se fala de ambientes onde CRs e PRs utilizam do espectro, então técnicas que permitem maior eficiência na troca de canais por parte dos CRs são necessárias para que permitam que CRs possam utilizar dos espaços vazios no espectro, sem prejudicar o uso das faixas espectrais por parte dos PRs.

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, é possível observar que o modelo proposto por Rocha *et al.* (2014) adequa-se mais a proposta desse trabalho. Além de se mostrar mais eficiente em questão de tempo de execução e de número de tentativas, em um ambiente real esse modelo traria benefícios, visto que sistemas mais eficientes para a descoberta de vizinhos possibilitam que o processo de troca de canal torne-se mais rápido.

Para trabalhos futuros, os autores pretendem ampliar o escopo do trabalho, considerando a presença de agentes maliciosos, como os *Jammers* (CHEN; PARK; REED, 2008), assim diferenciando se quem ocupa um canal é um PR ou um *Jammer*, bem como buscar formas de amenizar a influência que o canal onde o CR se encontra ocasiona no método proposto. Além disso, pretende-se melhorar o simulador tornando-o mais interativo e, no final, aplicar todo esse estudo na prática, com o uso de SDR (*Software Defined Radios*), podendo, assim, observar como será o comportamento em ambientes reais.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, E. P. L. Desenvolvimento de Técnica de Sensoriamento do Espectro Embasada em Detecção de Energia para Aplicações em Sistemas Rádio-Cognitivos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)—Universidade de Brasília – UnB, p. 4-38, 2010.
- AKYILDIZ, Ian *et al.* AdaptNet: an adaptive protocol suite for the next-generation wireless Internet. *IEEE Communications Magazine*, v. 42, n. 3, p. 128-136, 2004.
- AKYILDIZ, Ian F. *et al.* NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey. *Computer networks*, v. 50, n. 13, p. 2127-2159, 2006.
- ANATEL, Institucional. Brasília, 2015. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/institucional/institucional-menu>>. Acesso em: 18 Jan. 2017.
- ANATEL - RESOLUÇÃO 506. Radiação Restrita. 2008. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2008/104-resolucao-506>>. Acesso em: 13. Mar. 2016.
- ASTERJADHI, A.; ZORZI, M. A Jamming Evasive Network-Coding Neighbor-Discovery Algorithm for Cognitive Radio Networks. University of Padova. **Magazine: IEEE Wireless Communications**, 2010.
- CABRAL, Y. K. S. *et al.* Análise de Desempenho de Códigos de Canal em Sistemas de Transmissão de Imagens. In: CONGRESSO NORTE NORDESTE DE PESQUISA E INOVAÇÃO - CONNEPI. **Anais**—Maceió: IFAL, 2016.
- CHEN, R.; PARK, M.; REED, J. Defense Against Primary User Emulation Attacks in Cognitive Radio Networks. **IEEE JSAC**, v. 26, n. 1, p. 25-37, jan. 2008.
- COUTINHO, P. S. Detecção de Energia para Rádios Cognitivos Usando GNU Radio e USRP2. Projeto de Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica/COPPE, 2011. p. 2.
- FEDERAL COMMUNICATIONS COMMISSION –FCC. Notice of proposed rulemaking and order: Facilitating opportunities for flexible, efficient, and reliable spectrum use employing cognitive radio technologies ET Docket No. 03-108. **Relatório técnico**, 2005.
- LOYOLA-CAMORIM, R. D. Codificação de Canal com Taxa Variável. Monografia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.
- MATLAB. The Language of Technical Computing. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>>. 2016. Acesso em: 30 jan. 2017.
- SHU, Zhihui *et al.* Network coding-aware channel allocation and routing in cognitive radio networks. In: **Global Communications Conference (GLOBECOM), 2012 IEEE**. IEEE, 2012. p. 5590-5595.
- SOUSA, M. P. *et al.* Redes Cognitivas: Um Novo Paradigma para as Comunicações Sem Fio. **Minicursos do XXVIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES E SISTEMAS DISTRIBUÍDOS**, p. 153-190, 2010.
- ROCHA, J. S. *et al.* **Sensoriamento Espectral nas Dimensões Frequência e Ângulo de Chegada**. Emérito SBrT. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB, Instituto de Estudos Avançados em Comunicações – Iecom, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, 2014.
- YUE, Guosen; WANG, Xiaodong; MADHIAN, Mohammad. Design of anti-jamming coding for cognitive radio. In: **Global Telecommunications Conference, 2007. GLOBECOM'07. IEEE**. IEEE, 2007. p. 4190-4194.