

Otimização do Período de Sensoriamento em Rádio Cognitivo utilizando Algoritmo Genético com uma Estratégia Multi-Objetivo

Peterson M. S. Yoshioka, Andson M. Balieiro, Kelvin L. Dias¹

Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil

Centro de Informática (CIn) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil

{pmsyoshioka, andson_engcomp37}@yahoo.com.br, kld@cin.ufpe.br

Abstract— A eficiência espectral em redes baseadas na tecnologia de Rádio Cognitivo (RC) pode ser comprometida caso o rádio seja utilizado muito tempo para detecção em vez da transmissão de dados. Por isso, tornam-se necessários esquemas de sensoriamento que obtenham o máximo possível de utilização do espectro, evitando sensoriamento desnecessário, bem como, o mínimo de interferência na transmissão do usuário primário decorrente de detecção incorreta de sua transmissão. Neste trabalho, propomos a utilização de Algoritmos Genéticos para realizar a adaptação do período de sensoriamento. O objetivo é obter um período de sensoriamento ótimo para os canais com vistas a maximizar a descoberta de oportunidades no espectro e minimizar o *overhead* decorrente do sensoriamento. A maioria dos trabalhos relacionados considera que o *overhead* de sensoriamento é fixo, não levando em conta que alguns canais podem ter menor tolerância à interferência que outros. A proposta apresentada neste artigo pode adaptar-se aos requisitos de tolerância à interferência no canal licenciado por meio da determinação de um período de sensoriamento que otimize as oportunidades para qualquer valor de *overhead* definido. Nossa proposta consegue obter um ganho de até 90% em relação às técnicas não otimizadas, bem como resultados similares aos obtidos por uma proposta otimizada presente na literatura, com a vantagem de permitir a adaptação do *overhead* de sensoriamento.

Palavras Chave - rádio cognitivo, sensoriamento, algoritmo genético

I. INTRODUÇÃO

Atualmente, tanto no Brasil quanto em outros países, a política de alocação espectral é estática, ou seja, uma vez alocado em uma faixa de espectro, o usuário não pode mudar de faixa ou utilizar outro tipo de serviço na mesma. Nos Estados Unidos a divisão e alocação do espectro é realizada pela *Federal Communications Commission* (FCC). No Brasil, o responsável pelo gerenciamento espectral é a Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel). Contudo, existem pesquisas que comprovam que, apesar do crescente aumento do número de dispositivos e serviços sem fio, a política atual não tem proporcionado utilização eficiente do espectro [1]. Embora o espectro seja um recurso natural escasso, ele tem sido subutilizado. Essa subutilização varia de acordo com fatores como faixa do espectro, período de tempo e localização geográfica.

Para resolver os problemas decorrentes da política de alocação estática do espectro, diversas soluções foram propostas. Uma delas é o Rádio Cognitivo (RC), uma tecnologia que provê acesso dinâmico ao espectro (DSA – *Dynamic Spectrum Access*), fornecendo a capacidade de compartilhar os canais licenciados com os usuários não-licenciados de forma oportunista [2]. Em Redes baseadas na tecnologia de Rádio Cognitivo (RRC), o usuário primário (UP) tem alta prioridade ou direitos legais para utilizar uma faixa específica do espectro, isto é, a faixa licenciada. Por outro lado, o usuário secundário (US) tem baixa prioridade e deve explorar o espectro sem causar interferência no UP quando estiver utilizando o canal licenciado. Para viabilizar o acesso oportunista, o seguinte conjunto de funções é adotado pelo RC: sensoriamento, decisão, compartilhamento e mobilidade do espectro. Tais funções são fundamentais para superar desafios como: determinar a porção de espectro disponível, selecionar o melhor canal disponível, coordenar o acesso ao canal com outros usuários e desocupar o canal quando o usuário licenciado for detectado [2].

O sensoriamento de espectro é considerado um dos componentes mais importantes do RC, pois identifica oportunidades no espectro e sinaliza o retorno do usuário primário ao canal licenciado. No processo de sensoriamento, a determinação do período com que os canais são sentidos é um desafio de pesquisa, pois a sua definição deve levar em consideração o compromisso entre o número de oportunidades descobertas e o *overhead* de sensoriamento causado. Uma oportunidade pode ser considerada como uma determinada banda de frequência que não está sendo utilizada em um momento específico, numa determinada área. Já o *overhead* de sensoriamento é o tempo durante o qual o US deve suspender a transmissão de dados para medir a disponibilidade do canal. O alto *overhead* de sensoriamento pode comprometer a eficiência espectral, pois, neste caso, o rádio é utilizado muito tempo para detecção de sinal do usuário primário ao invés de transmissão de dados. Fatores como limiar de detecção de usuário primário (IDT- *Incumbent Detection Threshold*), por exemplo -116 dBm para sinais de TV Digital (DTV), probabilidade de detecção desejada, além do tempo de atualização e verificação também influenciam no tempo que usuário fica sem realizar transmissão. Dessa forma, a otimização do período de sensoriamento visa determinar

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

o período, para um determinado canal, que proporcione um grande número de oportunidades com um mínimo de *overhead* de sensoriamento.

Este trabalho propõe uma estratégia que identifica um período ótimo de sensoriamento para os canais de modo a maximizar o número de oportunidades encontradas com um mínimo ou um especificado *overhead* de sensoriamento. Para tanto, utiliza-se uma técnica de inteligência computacional baseada em Algoritmo Genético (AG). Não é do conhecimento dos autores deste artigo que haja outro trabalho na área de sensoriamento de espectro que utilize AG para adaptar o período de sensoriamento.

O artigo está organizado da seguinte forma: na Seção II apresentamos os principais conceitos relacionados à tecnologia de RC e o problema de sensoriamento de espectro. Os principais trabalhos relacionados à otimização do período de sensoriamento em RC são descritos na Seção III. Em seguida, a estrutura da abordagem proposta baseada em Algoritmos Genéticos com uma estratégia multi-objetivo é apresentada na Seção IV. Simulação e análise de resultados são apresentadas na Seção V. Finalmente, na Seção VI apresentamos as conclusões e trabalhos futuros.

II. RÁDIO COGNITIVO

Uma das principais tarefas a ser realizada pelo rádio cognitivo é o sensoriamento do espectro, que consiste em um processo periódico e dinâmico de monitoramento do ambiente de rádio. Este mecanismo visa determinar as faixas de frequências disponíveis, evitar interferência à comunicação licenciada, bem como detectar as características dos sinais presentes, como: tipo de modulação, forma de onda, frequência da portadora, por exemplo. Segundo [3], o sensoriamento de espectro é a tarefa de obter consciência sobre o espectro utilizado e a existência do UP na área geográfica. Quando uma faixa espectral é passível de utilização, o usuário de rádio cognitivo 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 rádio cognitivo deve parar a sua transmissão, vagar aquela faixa e buscar outra faixa disponível para retomar a sua comunicação.

Segundo [3], o sensoriamento de espectro pode ser realizado como um mecanismo de duas camadas: física (PHY) e controle de acesso ao meio (MAC). Do ponto de vista da camada PHY busca-se detectar eficientemente os sinais do usuário primário e as oportunidades de acesso, adaptando-se esquemas do rádio secundário relacionados à codificação, modulação, entre outros. Vários métodos de sensoriamento de espectro são apresentados na literatura para a camada PHY, entre eles estão: detecção de energia, filtro casado, detecção de característica, entre outros [2]. Por outro lado, da perspectiva da camada MAC, o sensoriamento determina quando o usuário não licenciado tem que sentir os canais, além de determinar quais canais devem ser sentidos.

Na camada MAC, um dos aspectos fundamentais para a eficácia do sensoriamento é a definição da

periodicidade com que os canais serão sentidos pelo US, ou seja, de quanto em quanto tempo o US deve sentir o canal. Para tanto, deve-se considerar um compromisso entre o número de descobertas de oportunidades de utilização do espectro e o *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 despenderá muito tempo sentindo os canais, o que fará com que a sua utilização espectral seja reduzida. A Figura 1 ilustra esta situação em que o período de sensoriamento é muito pequeno para o canal representado por um modelo ON-OFF, realizando assim uma série de sensoriamentos desnecessários.

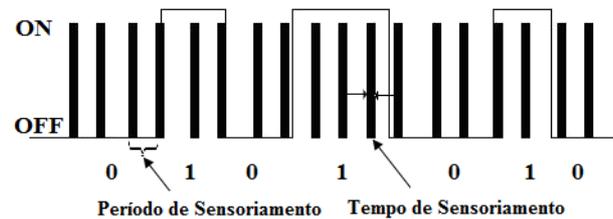


Figura 1: Período de sensoriamento muito pequeno

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, como mostrado na Figura 2. Neste caso, o UP estava presente no canal, representado pelo estado ON do canal, mas não foi detectado em função de um valor grande para o período de sensoriamento adotado. Com isso, apesar do *overhead* de sensoriamento obtido ser menor neste segundo caso e o US poderá passar mais tempo realizando a sua transmissão, no entanto provocará maior interferência à comunicação primária.

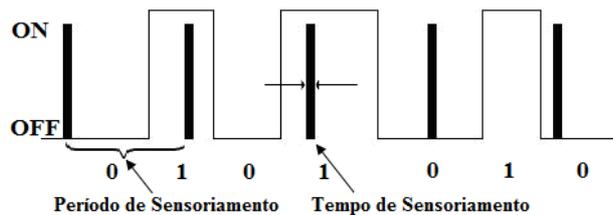


Figura 2: Período de sensoriamento muito grande

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, como ilustra a Figura 3. Logo, um grande desafio é encontrar um período de sensoriamento para cada canal que proporcione o máximo de descobertas de oportunidades possíveis nele sem prejudicar a transmissão primária e secundária.

Além disso, o sensoriamento de espectro também é afetado por outro fator: a tolerância a interferência do UP. Em alguns canais como, por exemplo, os pertencentes à banda de segurança pública, quando o RC explora suas

oportunidades, o sensoriamento deve ser feito freqüentemente tanto quanto possível a fim de prevenir a interferência aos usuários primários [3]. Com isso, um dos grandes desafios na área de sensoriamento de espectro é encontrar um período de sensoriamento ótimo para cada canal com vista a obter um bom compromisso entre o número de descobertas encontradas e o conseqüente *overhead* de sensoriamento proporcionado.

O sensoriamento na camada MAC pode ser classificado como pró-ativo ou reativo [5]. Quando o requisito de largura de banda de uma rede secundária (RS) ou baseada em rádio cognitivo pode ser satisfeito com apenas um canal, torna-se suficiente para o US descobrir apenas um canal ocioso e permanecer nele até a chegada de um UP. Assim, o sensoriamento é realizado sob demanda, apenas quando o US da RS tem que mudar para outro canal. Este tipo de sensoriamento é chamado de detecção reativa.

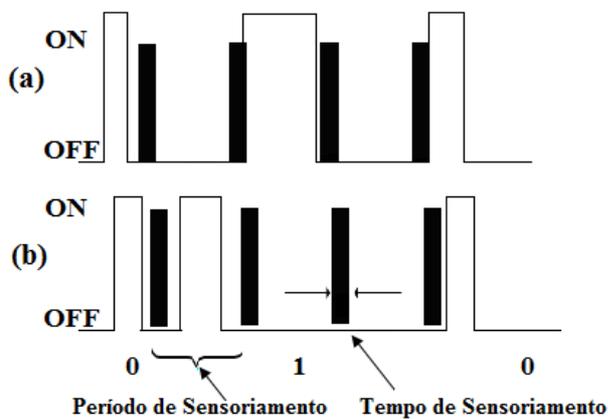


Figura 3. (a) Período sensoriamento bom desempenho. (b) Mesmo período de sensoriamento, com desempenho ruim.

Por outro lado, para descobrir mais canais ociosos/vagos deve-se realizar um sensoriamento pró-ativo, ou seja, cada canal deve ser sentido regularmente com seu próprio período, possibilitando que as oportunidades existentes nos canais sejam encontradas. É este processo de descoberta se dá de forma contínua, não apenas sob demanda. Na nossa abordagem, adotamos esta forma de sensoriamento, onde buscamos encontrar um conjunto de períodos de sensoriamento ótimo para os canais objetivando um bom compromisso entre oportunidades no espectro encontradas e *overhead* de sensoriamento desejado.

III. TRABALHOS RELACIONADOS

O sensoriamento de espectro em RC objetiva encontrar boas oportunidades de transmissão e detectar a chegada do usuário primário ao canal, de modo a não causar interferência na transmissão primária. A eficiência do sensoriamento é dada por quão capaz ele é de descobrir as oportunidades no espectro, bem como evitar a interferência a comunicação licenciada. Quando o rádio sente mais que transmite, a eficiência espectral fica degradada, pois ele utilizado muito tempo para detecção

do UP ao invés de transmissão secundária. Por outro lado, sentir os canais de comunicação com pouca freqüência pode resultar em perdas de oportunidades, bem como interferência a comunicação licenciada. Por isso, tornam-se necessários procedimentos de sensoriamento que tenham o objetivo de obter máxima utilização espectral possível sem causar interferência na transmissão do usuário primário.

Em [4] foi desenvolvido um sistema de sensoriamento que propõe a melhoria da utilização do espectro decidindo, adaptativamente, se o RC sente o canal ou se transmite dados do usuário. A tomada de decisão é baseada em resultados de sensoriamento e transmissão de dados anteriores, sensoriamento atual e troca de canal. O comportamento do UP foi modelado como um processo de Markov com dois estados. Os autores desenvolveram um algoritmo que utiliza o processo de decisão de Markov parcialmente observável para otimizar o mecanismo de sensoriamento. Dessa forma, o esquema proposto evita sensoriamentos desnecessários. No entanto, o autor considera uma rede em pequena escala, *Wireless Personal Area Network* (WPAN), com a topologia em estrela e nó central, denominado de “nó mestre”, que tem a função de fazer o sensoriamento e tomar as decisões de qual canal utilizar e quando ele deve ser utilizado. Além disso, existem os “nós escravos” que recebem a ordem do nó mestre de quando transmitir, qual canal utilizar, bem como de quando realizar a troca de canal. Assim, os nós escravos não realizam sensoriamento. Essa arquitetura pode ser considerada limitada, pois funciona em condições demasiadamente específicas. Sendo que num ambiente onde não exista o nó mestre, um nó escravo não tem inteligência suficiente para realizar sozinho o sensoriamento e a tomada de decisão. Ademais, os autores não citam o efeito do *overhead* de fluxo na rede causado pelas trocas de informação entre nó mestre e escravos. Este parâmetro é considerado importante, pois o nó mestre faz o sensoriamento continuamente e atualiza os nós escravos a todo o momento.

Em [5] é proposto um algoritmo adaptativo que busca determinar a periodicidade ótima com que cada canal é sentido. O objetivo é maximizar a descobertas de oportunidades no espectro e minimizar o atraso na busca por um canal disponível. Na proposta, adota-se modelo de canais ocupado/desocupado (ON/OFF), cuja duração de cada período ON/OFF segue uma distribuição exponencial. Os resultados obtidos foram apresentados em termos de utilização do canal licenciado pelo usuário secundário. No entanto, o conjunto de períodos de sensoriamento encontrado baseia-se numa estratégia que leva em consideração o comportamento médio dos canais e não as amostras dos canais, gerados a partir de uma distribuição exponencial. Com isso, não fica claro se o desempenho do período de sensoriamento obtido com esta proposta seria ótimo caso os autores considerassem/avaliassem as amostras geradas dos canais ao invés da informação do comportamento médio deles. Ademais, os autores não consideram a influência da seleção do período de sensoriamento sobre a interferência ao usuário

primário. Além disso, o resultado encontrado tem *overhead* de sensoriamento fixo, não levando em conta que alguns canais têm menos tolerância a interferência que outros.

As estratégias de sensoriamento nas quais cada usuário secundário leva em conta somente o seu resultado de sensoriamento para decidir sobre a disponibilidade do canal apresentam dificuldades em solucionar situações como o problema do terminal escondido. Neste caso, uma possível solução é adoção do sensoriamento cooperativo, que, em síntese, é o compartilhamento de informações entre os USs, combinando o resultado de várias medições [3]. Nesse sentido, em [6] foi proposta uma forma de melhorar a utilização do canal através de um sistema de sensoriamento de espectro cooperativo e adaptativo, que tem o objetivo de regular adaptativamente os períodos de sensoriamento de espectro conforme características de uso do canal e número de usuários secundários que participam do sensoriamento cooperativo. No entanto, essa proposta aumenta muito a troca de mensagens na rede, pois os USs trocam mensagens entre si ou as enviam para uma entidade central.

Diferentemente de outros trabalhos, a nossa proposta busca encontrar um período de sensoriamento que maximize a descoberta de oportunidades no espectro para qualquer valor de *overhead* de sensoriamento definido.

IV. ABORDAGEM PROPOSTA

Esta seção descreve a proposta e a metodologia utilizadas para definir o conjunto de períodos de sensoriamento ótimo para os canais de comunicação. O objetivo desta abordagem é obter um bom compromisso entre o número de oportunidades encontrado nos canais e a taxa de *overhead* de sensoriamento estipulada para estes canais. Para alcançar este objetivo, um Algoritmo Genético com uma estratégia de múltiplos objetivos foi adotado e é detalhado na Seção B.

Neste trabalho, o período de sensoriamento do canal i será representado pela variável x_i . Qualquer canal ocioso descoberto pelo sensoriamento periódico torna-se uma nova oportunidade de utilização oportunista do canal licenciado pelo US. Embora a detecção periódica seja realizada em todos os canais de forma independente, a detecção simultânea de N canais deve ser programada de tal maneira que não haja nenhuma outra, enquanto a medição sobre o canal i estiver sendo realizada para x_i .

A. Modelo de Canal

Para simular um ambiente propício ao sensoriamento na camada MAC, assim como em [5], foram adotados canais que seguem o modelo Ocupado (ON)/ Desocupado (OFF). Neste modelo, um período ON representa o tempo em que o canal de comunicação está sendo ocupado pelo usuário primário, portanto não passível de utilização pelo US. Já o período OFF representa o tempo em que o canal está disponível e que, portanto, o US pode utilizá-lo oportunisticamente para efetuar a sua transmissão. A duração dos períodos ON e OFF de cada canal i é dada por funções densidade de probabilidade

(f.d.p) exponenciais, com médias $\frac{1}{\lambda_{i_{ON}}}$ e $\frac{1}{\lambda_{i_{OFF}}}$, conforme

mostra (1) e (2), respectivamente.

$$f_{T_{ON}^i}(y) = \lambda_{i_{ON}} e^{-\lambda_{i_{ON}} y} \quad (y > 0) \quad (1)$$

$$f_{T_{OFF}^i}(x) = \lambda_{i_{OFF}} e^{-\lambda_{i_{OFF}} x} \quad (x > 0) \quad (2)$$

Nesta abordagem, assim como em [4], os períodos ON e OFF são considerados como independentes entre si e identicamente distribuídos.

Sendo $S^i(t)$ o estado do canal i no instante t . O processo de sensoriamento se resume ao processo de amostragem dos canais a cada intervalo de tempo. Neste caso, uma amostra dos estados ON e OFF pode ser representada pelos dígitos 1 e 0, respectivamente. Com isso, para determinar o conjunto ótimo de períodos de sensoriamento, a nossa proposta utiliza os valores amostrados dos canais ao invés do comportamento médio de cada período ON/OFF, como em [5]. Dessa forma, nosso estudo proporciona um cenário de avaliação mais próximo do real, pois informações do comportamento médio dos canais podem não estar disponíveis ou demandar muito tempo e medições para serem obtidas.

B. Algoritmo Genético

Como visto anteriormente, no sensoriamento pró-ativo cada canal é sentido com seu próprio período de sensoriamento, os quais são independentes entre si. E neste aspecto, a adaptação do período de sensoriamento de cada canal é um grande desafio, haja vista que na definição de qual valor adotar deve-se levar em conta o compromisso entre o número de oportunidades descobertas e o *overhead* de sensoriamento.

Com isso, nesta abordagem busca-se através dos conceitos evolutivos inerentes aos algoritmos genéticos encontrar um conjunto de períodos de sensoriamento ótimo a ser utilizado no processo de sensoriamento de canal. Neste processo de evolução, a cada geração, um conjunto de possíveis soluções para o problema é avaliado e as boas características das melhores soluções são transferidas para as gerações seguintes, dando continuidade ao processo de otimização. Com isso, características como o paralelismo, implícito ao AG, e sua abrangência de aplicação tornam o AG uma interessante ferramenta a ser utilizada em RC.

No AG proposto, cada indivíduo é formado por N parcelas, onde cada uma representa o período de sensoriamento de um canal, sendo N o número de canais. A codificação binária de cada parcela com P casas decimais de precisão utiliza K bits, definido de acordo com (3). Onde X_{max} e X_{min} são os limites, superior e inferior, do intervalo de definição do período de sensoriamento. Com isso, a codificação de um indivíduo é dada por $N \times K$ bits. A Figura 4 ilustra a composição de cada indivíduo que compõe a população de possíveis soluções para o nosso problema.

$$2^K \geq (X_{max} - X_{min}) \times 10^P \quad (3)$$

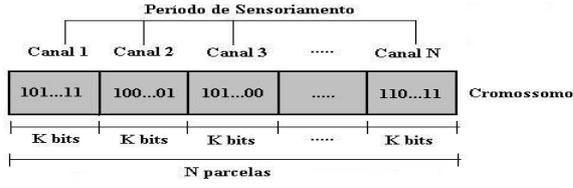


Figure 4: Indivíduo ou solução de um AG

Para avaliar cada possível solução ao problema (indivíduo) durante o processo de evolução, utilizou-se a estratégia de conjuntos pareto, devido ao problema da determinação do conjunto de períodos de sensoriamento de canais apresentar múltiplos objetivos.

A otimização utilizando conjuntos pareto baseia-se no conceito de dominância. Para que uma solução α domine sobre outra solução β , cada coordenada da avaliação de α deve ser maior ou igual que a respectiva coordenada de β , sendo que há pelo menos uma coordenada de α que seja maior que β [7]. Supondo a função de avaliação como um vetor $f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_s(x)]$, onde x representa o indivíduo ou solução para um problema e $f(x)$ representa a avaliação para determinado indivíduo. O conceito de dominância pode ser representado matematicamente (considerando o símbolo \equiv como dominância) conforme (4).

$$\alpha \equiv \beta \Rightarrow \forall i \in \{1, 2, \dots, s\} f_i(\alpha) \geq f_i(\beta) \quad \text{e} \quad (4)$$

$$\exists j \in \{1, 2, \dots, s\} f_j(\alpha) > f_j(\beta)$$

Na nossa abordagem, a função de avaliação $f(x)$ foi definida conforme (5), onde cada indivíduo na estratégia de conjuntos pareto é avaliado em relação ao número de oportunidades descobertas (Op) e *overhead* de sensoriamento proporcionado (Ov).

$$f(x) = [Ov(x), Op(x)] \quad (5)$$

O *overhead* de sensoriamento proporcionado por cada indivíduo é dado por (6).

$$Ov(x) = \sum_{i=1}^N \frac{t_s}{x_i} \quad (6)$$

Já o número de oportunidades encontradas nos canais adotando o conjunto de períodos de sensoriamento determinado por cada indivíduo é dado por (7).

$$Op(x) = \sum_{i=1}^N \sum_{h=1}^M S_i(x_i h) \quad (7)$$

Onde:

$x = [x_1, x_2, \dots, x_N]$ é o vetor que representa um indivíduo no AG, com $i=1, 2, \dots, N$ e N o número de canais;

x_i representa a parcela i do indivíduo x . Refere-se ao período de sensoriamento do canal i ;

$Ov(x)$ é o *overhead* de sensoriamento proporcionado pelo indivíduo x ;

$Op(x)$ refere-se ao número de oportunidades encontradas utilizando o indivíduo x ;

$S_i(x_i h)$ representa o estado do canal i , 1 ou 0, no instante $x_i h$, com h variando de 1 a M , sendo M o número total de amostras do canal i com período de sensoriamento;

t_s é o tempo de sensoriamento;

Durante o processo de avaliação, para definir o valor de aptidão de cada indivíduo, *fitness*, faz-se a comparação dele com os demais de sua geração. Se um indivíduo tem um número de oportunidades maior que outro, soma-se uma unidade ao seu valor de *fitness*, e assim prossegue-se até compará-lo com todos os indivíduos de sua geração. Além disso, se o indivíduo em questão tem uma taxa de *overhead* de sensoriamento menor que um limiar definido, também se adiciona uma unidade ao seu valor de *fitness*. Portanto, antes do cálculo do valor de *fitness* de um indivíduo é necessário descobrir o número de oportunidades e *overhead* de sensoriamento de todos da sua geração. A abordagem utilizada consistiu em fazer com que a função de avaliação de cada cromossomo seja dada pelo número de indivíduos que ele domina mais um. No contexto deste trabalho, uma solução α domina outra solução β se ela possuir um número de oportunidades maior ou igual ao de β e apresentar um *overhead* de sensoriamento menor ou igual um valor estabelecido, sendo que pelo menos a oportunidade deverá maior ou o *overhead* de sensoriamento deverá menor.

B.1. Os operadores Genéticos

O operador de seleção do AG, em que os indivíduos são selecionados para realizar o cruzamento, busca simular o mecanismo de seleção natural que atua sobre as espécies biológicas, em que pais mais capazes são mais prováveis de gerar filhos do que pais menos aptos. Diante disso, nesta abordagem adotou-se como operador de seleção para o AG a roleta ponderada, a qual é baseada no valor de *fitness* dos indivíduos. Assim, indivíduos com maiores valores de aptidão são mais prováveis a deixar descendentes e, assim, transferir seu material genético para gerações seguintes do que indivíduos que possuem baixos valores de *fitness*.

Como operador de cruzamento ou *crossover*, que realiza a troca de material genético entre os indivíduos definidos pelo processo de seleção, adotou-se neste trabalho o operador uniforme para realizar o cruzamento entre pares de indivíduos. Ademais, a probabilidade ou taxa de cruzamento entre os indivíduos foi configurada para 0.8, que permaneceu constante durante todo o processo de simulação. Este valor foi escolhido por proporcionar melhor desempenho médio ao AG, verificado através de várias simulações com valores no intervalo de 0.1 a 0.8.

A operação de mutação utilizada foi simples, onde cada indivíduo está sujeito sofrer a mutação. Neste processo, o valor de um gene (bit) em um cromossomo é trocado seguindo a seguinte idéia: caso o gene selecionado para a mutação possua valor 1, o seu valor após a mutação será 0 e vice-versa. A taxa de mutação

utilizada foi de 0.01, que, assim como de cruzamento, permaneceu constante durante o processo de evolução. Esta taxa proporcionou melhor desempenho médio do AG, durante simulações utilizando taxas no intervalo de 0.001 a 0.01.

A Figura 5 mostra o fluxograma de utilização do AG no problema de otimização do período de sensoriamento dos canais de comunicação. Inicialmente, a população é gerada aleatoriamente, apresentando diversos conjuntos de períodos de sensoriamento candidatos a solução do problema. Em seguida, tais conjuntos são utilizados na realização do sensoriamento dos canais. Após o sensoriamento, os indivíduos são avaliados de acordo com a função de *fitness* definida em (5), que leva em conta o número de oportunidades encontradas e o *overhead* de sensoriamento obtido. Posteriormente, eles são submetidos aos operadores genéticos de seleção, cruzamento e mutação, dando origem aos indivíduos que irão compor a nova população. Com a nova população, o critério de parada, número de gerações, é avaliado. Caso o número de gerações atual seja menor que o definido previamente, então o processo se repete a partir da etapa do sensoriamento dos canais. Caso contrário, os indivíduos da nova população são submetidos ao sensoriamento dos canais e avaliados, onde o melhor dentre todos é escolhido como solução para o problema, representando o conjunto de períodos de sensoriamento ótimo para os canais.

Após o AG definir o período de sensoriamento de cada canal, simula-se o sensoriamento através das amostras dos canais modelados na distribuição exponencial. Com isso, determina-se o número de oportunidades encontradas e o *overhead de sensoriamento* obtido em cada canal. Os períodos de sensoriamento podem variar no intervalo de (0, 10] segundos. A Tabela I sumariza os parâmetros que foram adotados na implementação do AG. Esses parâmetros foram definidos a partir de testes com diversos valores, sendo escolhidos os que tiveram melhores resultados nas simulações. Quanto à precisão (P) adotada na representação dos indivíduos, adotou-se 10 casas decimais. Com isso, cada parcela de um indivíduo, período de sensoriamento de um canal, é codificada utilizando 75 bits, valor definido de acordo com (3).

TABELA I
PARAMETROS ADOTADOS NO AG

| | |
|------------------------|-----|
| Número de Gerações (G) | 300 |
| Tamanho da População | 100 |
| Precisão (P) | 10 |
| Número de Bits (K) | 75 |

V. SIMULAÇÃO E RESULTADOS

Através das simulações numéricas, examinamos o impacto da seleção do período de sensoriamento sobre canais gerados com distribuição exponencial. Para mostrar a generalidade da nossa estratégia, adotamos três instâncias de simulação, que diferem no número de

canais, as quais apresentam três, seis e nove canais. Comparamos nossa proposta com o método que utiliza período de sensoriamento fixo e igual para todos os canais, o qual é adotado em [8], e com o método adaptativo do período de sensoriamento proposto em [5], que utiliza uma técnica de otimização não-linear irrestrita simplex para encontrar os valores ótimos de período de sensoriamento.

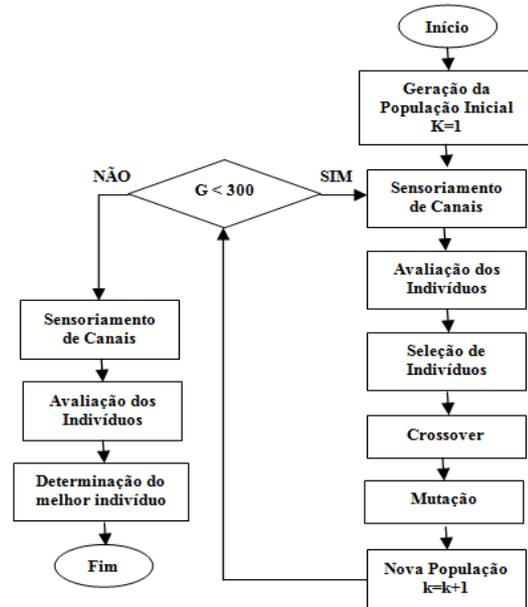


Figura 5: Fluxograma da utilização do AG

O tempo de sensoriamento e de simulação dos canais foi instituído para 20ms e 100s, respectivamente. As médias de tempo ON e OFF dos canais são uniformemente distribuídas no intervalo [0 5], conforme [8]. A Tabela II mostra as médias $E[T_{OFF}^i]$ e $E[T_{ON}^i]$ utilizadas para gerar os canais utilizados na simulação.

Para comparação com o mecanismo que utiliza períodos de sensoriamento fixos e o apresentado em [4], desenvolvemos três versões da nossa estratégia que utiliza algoritmo genético para adaptação do período de sensoriamento, as quais diferem entre si quanto ao limite superior de *overhead* de sensoriamento tolerável nos canais. Estas são denotadas como AG10, G20 e AG40. Nelas, o AG busca encontrar um conjunto de períodos de sensoriamento que maximize o número oportunidades encontradas, proporcionando um *overhead* de sensoriamento menor ou igual a 10%, 20% e 40%, respectivamente. O objetivo é comparar cada uma dessas versões do AG com estratégia definida em [5], que será denotada como *Kim* (nome do autor daquela estratégia) e com as abordagens de períodos de sensoriamento fixo, denotadas como Fixo1 e Fixo2, que adotam períodos de sensoriamento iguais a 0.5s e 1.0s, respectivamente. A Tabela III sumariza as diferentes abordagens adotadas na simulação.

TABELA II.
MÉDIAS UTILIZADAS PARA GERAR CANAIS

| Médias dos Canais | $E[T_{OFF}^i]$ | $E[T_{ON}^i]$ |
|-------------------|----------------|---------------|
| Canal1 | 2.611 | 1.779 |
| Canal2 | 4.947 | 0.791 |
| Canal3 | 2.405 | 3.122 |
| Canal4 | 0.931 | 1.046 |
| Canal5 | 1.962 | 0.942 |
| Canal6 | 0.238 | 3.224 |
| Canal17 | 1.035 | 2.113 |
| Canal8 | 3.486 | 2.663 |
| Canal9 | 2.623 | 1.805 |

TABELA III.
SUMÁRIO DAS ABORDAGENS

| Abordagem | Descrição |
|-----------|---|
| Fixo1 | Abordagem com período de sensoriamento fixo em todos os canais (1.0s) |
| Fixo2 | Abordagem com período de sensoriamento fixo em todos os canais (0.5s) |
| Kim | Abordagem descrita em [4] |
| AG10 | Abordagem que realiza o sensoriamento com <i>overhead</i> de sensoriamento limitado a 10% |
| AG20 | Abordagem que realiza o sensoriamento com <i>overhead</i> de sensoriamento limitado a 20% |
| AG40 | Abordagem que realiza o sensoriamento com <i>overhead</i> de sensoriamento limitado a 40% |

A Figura 6 mostra o resultado médio do número de oportunidades alcançado pelas abordagens nos três casos de simulação: com três, seis e nove canais. Em cada instância de simulação foram realizadas 6 repetições, com sementes distintas na geração dos canais, mas mantendo as mesmas médias apresentadas na Tabela II. Nota-se que as três abordagens desenvolvidas AG10, AG20, AG40 mostraram-se superiores as que utilizam período de sensoriamento fixo e estratégia adaptativa de Kim [5].

Com a abordagem AG10 obteve-se uma melhoria de desempenho, em média, de 21,54% e 28,07%, em relação ao método Kim, adotando 3 e 9 canais, respectivamente, com um *overhead* de sensoriamento similar. Utilizando o AG20, a melhoria no número de descobertas de oportunidades em relação aos outros métodos cresceu com o aumento do número de canais, obtendo desempenho superior de até 64,68% e 79,88% em relação ao método de Kim e Fixo1, respectivamente, na instância que utiliza 9 canais na simulação. O AG40 mostrou superioridade mais expressiva em todos os casos de simulação adotados, obtendo melhorias de aproximadamente 82,5% e 94,98% em relação aos métodos de Kim e Fixo2, por exemplo, na simulação com 9 canais.

A superioridade das versões da nossa abordagem deve-se a característica adaptativa na definição do período de sensoriamento, que se ajusta de acordo com o padrão de uso de cada canal, o que não ocorre no método que utiliza período de sensoriamento fixo. O melhor desempenho de

nossa proposta justifica-se, também, pelo fato da otimização do conjunto de períodos de sensoriamento ser realizada com base nas amostras de sensoriamento dos canais e não no seu comportamento médio, como feito em Kim [5]. Além disso, a nossa abordagem leva em conta um fator importante na definição do período de sensoriamento: a interferência provocada no UP decorrente da sua não detecção, o que é negligenciada nas outras abordagens.

Ademais, através da Figura 6, observa-se que a estratégia desenvolvida neste trabalho pode se adaptar às várias exigências de *overhead* de sensoriamento definidas. O fato de ser possível regular o limite de *overhead* de sensoriamento está diretamente ligado à possibilidade de detectar a presença do UP no canal licenciado e descobrir oportunidades de comunicação para o US. Isto porque, quanto maior o valor do *overhead* de sensoriamento maior será a quantidade de vezes que o US realizará o sensoriamento dos canais. Com isso, em situações onde um mínimo de interferência é indispensável, a proposta desenvolvida neste trabalho pode adaptar-se a uma maior ou menor porcentagem de *overhead* de sensoriamento, a fim de obter maior monitoramento do canal e, conseqüentemente, menor interferência ao UP.

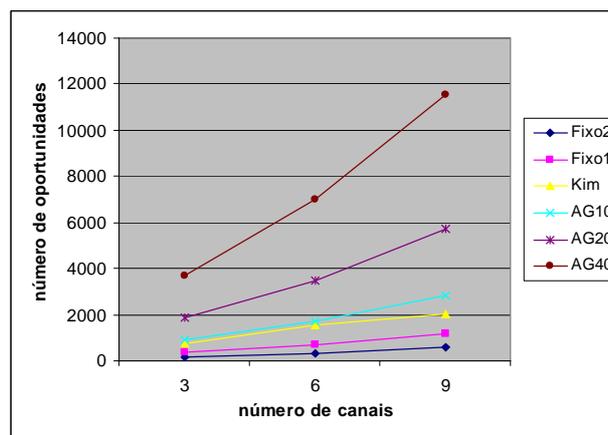


Figura 6. Número médio de oportunidades encontradas

A Figura 7 exhibe a evolução média do *fitness* do melhor indivíduo com o passar das gerações para a abordagem AG20, utilizando a instância de simulação de 3 canais. Ela demonstra a tendência do melhor indivíduo de uma geração em evoluir seu *fitness* e, conseqüentemente, encontrar períodos de sensoriamento que proporcionem mais oportunidades descobertas ao US e garantia de não ultrapassar a taxa de *overhead* de sensoriamento estipulada. As outras abordagens, AG10 e AG40, apresentaram comportamento semelhante à AG20.

A Figura 8 ilustra a evolução do período de sensoriamento do canal 1 com o passar das gerações para as três versões da nossa abordagem. Nota-se que a nossa proposta apresenta rápida convergência e que cada versão altera o período de sensoriamento em busca de um valor ótimo de acordo com o padrão de uso do canal licenciado e com o *overhead* de sensoriamento previamente

definido. Os demais canais têm um comportamento semelhante na evolução do período de sensoriamento.

A Figura 9 mostra a evolução do número de oportunidades que foram encontradas no melhor indivíduo de cada geração do canal 1. Este resultado foi encontrado para uma execução com três canais. Observa-se que o número de oportunidades aumenta com o decorrer das gerações, indicando a evolução do indivíduo.

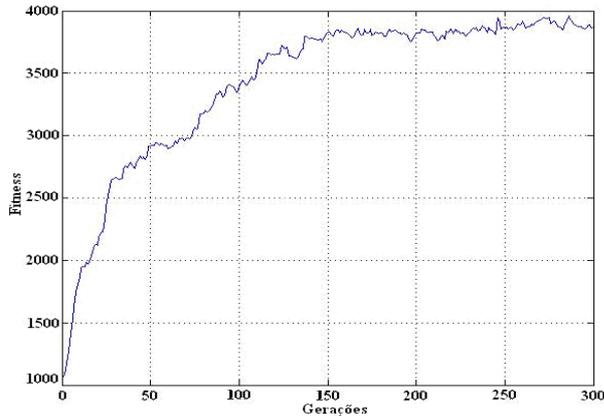


Figura 7: Evolução média do fitness do melhor indivíduo

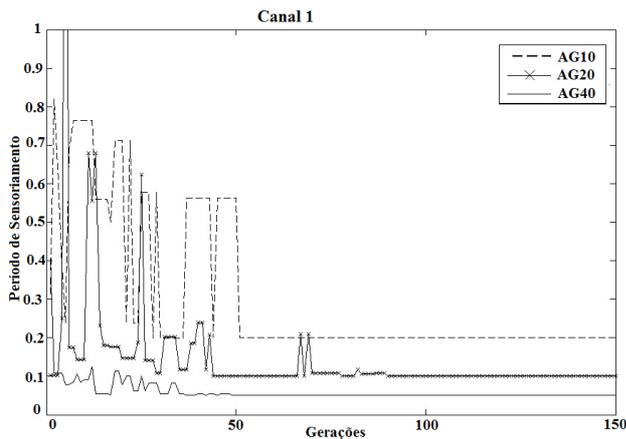


Figura 8: Evolução do período de sensoriamento.

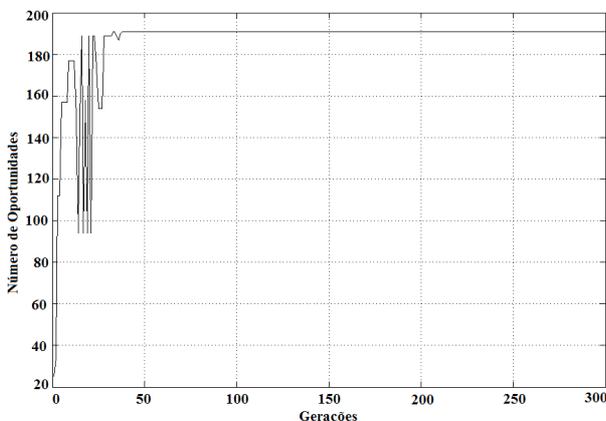


Figura 9: Evolução do número de oportunidades encontradas pelos melhores indivíduos do canal 1.

VIII. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou e avaliou uma proposta de otimização do período de sensoriamento em redes baseadas em RC utilizando Algoritmo Genético com estratégia de múltiplos objetivos. A proposta visa otimizar o número de oportunidades descobertas no espectro para transmissão do usuários secundário, bem como, minimizar o *overhead* de sensoriamento, pois tal processo influencia na máxima utilização espectral da transmissão secundária.

A abordagem proposta apresentou resultados satisfatórios, demonstrando sua superioridade em relação aos outros métodos utilizados no estudo. Ela atendeu o compromisso entre o alto número de oportunidades descobertas e o baixo *overhead* de sensoriamento, sendo este adaptável de acordo com as condições do usuário.

Aplicações baseadas em AGs podem adaptar-se a vários tipos de problema, porém o tempo de processamento é alto com relação às outras estratégias. A justificativa para utilização da proposta apresentada neste trabalho é a de que a aplicação pode calcular um período de sensoriamento ótimo coletando as amostras dos canais, e realizando o processamento *offline* e periódico de novas amostras a serem adotadas em momentos subsequentes de sua operação.

Para trabalhos futuros, pretende-se realizar um estudo sobre a melhor taxa de *overhead* para diferentes condições de canais, já que a proposta possibilita a adaptação do período de sensoriamento com um *overhead* de sensoriamento estipulado.

REFERÊNCIAS

- [1] *Spectrum Policy Task Force Report*, ET Docket No. 02-135, Nov. 2002
- [2] I. F. Akyildiz, W. Lee, M. C. Vuran, and S. Mohanty, "A Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks," *IEEE Communication Magazine*, vol. 46, no. 4, pp. 40–48, 2008.
- [3] T. Yucek. H. Arslan, "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications", *IEEE Communication Surveys & Tutoriais*, vol. 11, no 1, pp 116-130, 2009.
- [4] K. W. Choi, "Adaptive sensing technique to maximize spectrum utilization in cognitive radio," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 2, pp. 992–998, 2010.
- [5] H. Kim and K. G. Shin, "Efficient Discovery of Spectrum Opportunities with MAC-Layer Sensing in Cognitive Radio Networks," *IEEE Transactions on mobile computing*, vol. 7, no. 5, pp. 533–545, 2008.
- [6] J. Song, H. Cai and Z. Feng, "A Novel Cooperative Spectrum Sensing Scheme Based on Channel-usage in Cognitive Radio Networks," *Networking and Mobile Computing, WinCom '09. 5th International Conference on Wireless Communication*, pp. 1–4, 2009.
- [7] R. Linden, *Algoritmos Genéticos*. Brasport, Rio de Janeiro, 2006.
- [8] Yang L., Cao L., Zheng H. "Proactive channel access in dynamic spectrum networks". *Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM)*, 2007.