

Mecanismo de Handoff de Espectro para Rádios Cognitivos *

Pedro Smith Coutinho¹, Marcel W. R. da Silva¹ e José Ferreira de Rezende¹

¹Grupo de Teleinformática e Automação (GTA) – COPPE
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

{coutinho, marcel, rezende}@gta.ufrj.br

Resumo. *O handoff de espectro é um mecanismo chave para o funcionamento dos rádios cognitivos, que deve ser acionado quando o canal de operação atual precisa ser liberado devido à chegada de um usuário primário. Este mecanismo é responsável por buscar um novo canal de operação para o usuário secundário de forma eficiente, e a ordem na qual os canais são avaliados durante a busca tem grande impacto no seu desempenho. Este trabalho propõe um novo esquema de handoff de espectro que considera a existência de possíveis erros na detecção dos usuários primários. O desempenho da proposta é avaliado, através de simulações, em comparação a outros mecanismos propostos na literatura, tanto em relação à utilização do espectro com sucesso quanto à interferência causada nos usuários primários, com resultados satisfatórios.*

Abstract. *Spectrum handoff is a key mechanism for proper and efficient operation of cognitive radios. A handoff occurs when the current operating channel must be freed by secondary users due to the arrival of a primary user. This mechanism is responsible for searching for a new idle licensed channel for secondary use, and the order in which the channels are sensed has a great impact on performance. This paper proposes a new spectrum handoff scheme that considers the existence of errors in primary user detection to achieve a better channel ordering in terms of spectrum utilization efficiency and primary user interference. Its performance is evaluated in comparison to other mechanisms proposed in the literature through simulations.*

1. Introdução

O uso oportunista do espectro por parte dos rádios cognitivos (RCs) requer que esses dispositivos escolham a cada instante a faixa de espectro mais apropriada a ser utilizada. Em princípio, quanto mais numerosas e acuradas forem as oportunidades detectadas pelos RCs, melhor será o processo de escolha, denominado *decisão de espectro* [Akyildiz et al. 2006]. No entanto, em RCs equipados com apenas um dispositivo de rádio, a detecção de oportunidades através do sensoreamento gera um consequente desperdício no uso das oportunidades descobertas anteriormente. Portanto, existe um forte acoplamento entre o esquema de sensoreamento e a decisão de espectro. Por isso, diversos trabalhos propõem processos de decisão associados a um esquema de sensoreamento que em conjunto buscam otimizar o uso das oportunidades [Kim and Shin 2008, Lee and Akyildiz 2008, Wang and Anderson 2008, Lee and Akyildiz 2011, Duan and Li 2011].

*Este trabalho recebeu recursos do CNPq, CAPES, FAPERJ, FINEP e RNP.

O processo de decisão de espectro é chamado de *handoff* quando a decisão tomada pelo RC refere-se a uma mudança de faixa de espectro. Os mecanismos de *handoff* de espectro podem ser classificados como reativos ou pró-ativos. Nos mecanismos reativos, o usuário secundário (US) procura por outro canal apenas quando detecta a presença de um usuário primário (UP) no seu canal de operação atual. Nesse instante, o US realiza o sensoramento de outros canais de forma a realizar a mudança de canal. Assim, nesse tipo de mecanismo, o US deve periodicamente interromper sua transmissão para sensorar o seu próprio canal para verificar se o UP retornou ao canal. Caso contrário, ele continua a transmissão no mesmo canal.

Por outro lado, os mecanismos pró-ativos podem ser usados com objetivos distintos. No caso onde os usuários secundários necessitam da maior quantidade de banda passante possível, o sensoramento periódico dos demais canais é necessário para se detectar novas oportunidades, permitindo ao RC obter maiores taxas de transmissão pela agregação de múltiplos canais ociosos [Kim and Shin 2008]. Uma outra finalidade do sensoramento periódico dos demais canais por parte dos USs seria para permitir que eles mudem de canal antes mesmo que o canal de operação tenha sido ocupado por um UP. A causa desse *handoff* antecipado pode estar relacionada a diversos fatores, tais como a descoberta de uma oportunidade em um canal de melhor qualidade ou com uma maior probabilidade de ficar ocioso por um tempo mais longo. Uma terceira finalidade do sensoramento periódico dos demais canais seria para realizar um ordenamento prévio desses canais segundo algum critério de qualidade para um futuro *handoff*. Isso permitiria ao US otimizar o seu desempenho, segundo alguma métrica, de acordo com o critério usado nesse ordenamento dos canais.

O trabalho em [Kim and Shin 2008] propõe como critério de ordenamento a probabilidade do canal estar em repouso. Em [Duan and Li 2011], os autores estendem essa proposta, levando em conta o tempo esperado de transmissão no canal. No entanto, esses trabalhos não consideram a probabilidade de erro de detecção do sinal do UP. Neste trabalho, um novo critério é proposto, levando em conta essa probabilidade, e comparado aos demais critérios citados. Os resultados mostram que o critério proposto obtém um desempenho similar ao melhor critério em termos de eficiência no uso das oportunidades, ao mesmo tempo em que causa uma menor interferência nos UPs, principalmente em cenários onde a detecção dos UPs é imperfeita.

Este trabalho está organizado da seguinte forma. A Seção 2 discute alguns trabalhos recentes relacionados ao *handoff* de espectro. Na Seção 3, os modelos de comportamento dos usuários secundários e o modelo de atividades dos canais licenciados serão descritos. A Seção 4 apresenta o mecanismo de *handoff* de espectro proposto neste trabalho. A Seção 5 apresenta o ambiente de simulação usado na avaliação de desempenho dos mecanismos, os cenários de testes e os resultados das simulações realizadas. E, por fim, a Seção 6 apresenta as conclusões e trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

O trabalho em [Kim and Shin 2008] propõe a otimização do período de sensoramento de forma a maximizar a descoberta de oportunidades por USs equipados com apenas uma interface de rádio. Tal otimização consiste em encontrar, para cada canal, um período de sensoramento que minimize as fatias de tempo gastos em oportunidades não

aproveitadas. Tais desperdícios de oportunidades se devem tanto às interrupções de uso das mesmas quanto à não descoberta dessas oportunidades, ambas provocadas pelo sensoreamento periódico e pró-ativo de todos os canais. Além disso, os autores definem um algoritmo de escolha da ordem de sensoreamento que minimiza a latência na procura de um novo canal em caso de *handoff*. Nesse algoritmo, quando o UP é detectado, o canal com a maior probabilidade de estar desocupado é escolhido como o primeiro candidato. O trabalho em [Duan and Li 2011] estende esse algoritmo pela combinação da probabilidade do canal estar desocupado, o tamanho médio esperado do tempo desocupado e o tempo esperado de transmissão.

Em [Lee and Akyldiz 2011], os autores propõem dois esquemas de decisão de espectro. O primeiro seleciona faixas do espectro que minimizam a variação de capacidade para o uso em aplicações de tempo-real. Para aplicações de melhor esforço (*best effort*), o segundo esquema procura maximizar a capacidade total da rede. Além dos esquemas de decisão de espectro, o artigo propõe um gerenciamento dinâmico dos recursos para coordenar os métodos de decisão de acordo com as flutuações de banda passante causadas pela entrada de novos UPs e/ou USs.

O trabalho em [Wang and Anderson 2008] compara o desempenho de três esquemas de *handoff* através de um modelo analítico. No primeiro esquema, o US não realiza *handoff* quando um UP retorna ao canal, mas apenas interrompe sua transmissão até que o UP deixe o canal novamente. Os dois outros esquemas são, respectivamente, do tipo pró-ativo e reativo. No pró-ativo, o US determina uma lista ordenada de canais candidatos antes da chegada do UP. Nesse instante, ele utiliza o primeiro canal da lista para o *handoff*. A determinação da lista de canais baseia-se apenas em modelos de predição de estado dos canais, o que não toma tempo de sensoreamento, mas incorre em erros de predição. No esquema reativo, o US procura por um canal livre apenas após a chegada do UP. É importante notar que esse trabalho não explicita uma determinada ordem de sensoreamento para os seus *handoffs*, mas apenas utiliza a probabilidade de erro de predição da atividade primária em seu modelo analítico.

Em [Lertsinsrubtavee et al. 2010], o *handoff* de espectro é discutido em redes de rádios cognitivos que utilizam múltiplos canais simultaneamente, sob a ótica de comunicações sensíveis a atrasos, como por exemplo voz sobre IP (VoIP). São propostos a predição do comportamento dos usuários primários e o uso de canais de *backup* com os objetivos de minimizar o atraso causado pelos *handoffs* e mitigar os problemas causados por erros de predição, que são inevitáveis. Entretanto, esse trabalho ainda está em andamento, e não há nenhuma análise de desempenho das propostas, apenas a apresentação e a discussão dessa ideia.

Em [Wang and Wang 2008], é discutido o uso das técnicas de sensoreamento pró-ativo e reativo para o *handoff* de espectro. Esse trabalho utiliza a Teoria de Filas para chegar a um modelo M/G/1 de Prioridade com Prosseguimento Preemptivo (*Preemptive Resume Priority*) da rede de usuários primários e secundários e comparar as duas técnicas. A finalidade desse trabalho é descobrir sob quais condições o uso de cada técnica de sensoreamento é mais adequada. No entanto, esse trabalho não considera que os parâmetros da atividade dos usuários primários devem ser estimados e que isso geralmente implica em sensoreamentos realizados periodicamente, tornando inevitável esse custo que, no trabalho, é considerado uma das desvantagens do sensoreamento pró-ativo.

A continuidade do trabalho mencionado no parágrafo anterior, [Wang and Wang 2009], apresenta um mecanismo de escolha de canais baseado em sensoriamento pró-ativo usando o mesmo modelo M/G/1 de Teoria de Filas. Nesse trabalho, o objetivo de reduzir o tempo de serviço total e os resultados apresentados são obtidos a partir da comparação do mecanismo apresentado com a seleção aleatória dos canais para *handoff*.

O trabalho em [Zhang 2009] analisa o *handoff* de espectro em dois cenários: um chamado oportunista, em que não há entidade central que coordena os usuários secundários, e o chamado negociado, em que há um servidor central que gerencia o espectro e coordena os USs. Utilizando Teoria de Filas, os dois mecanismos são comparados e a conclusão é que o *handoff* oportunista é superior em termos de probabilidade de sucesso, que é definida como a probabilidade de se encontrar um canal livre de usuários primários, embora implique em um número maior de operações de *handoff* do que o mecanismo negociado.

3. Modelagem do Sistema

O modelo de sistema adotado neste trabalho assume a existência de uma faixa licenciada composta por N canais de largura de banda W . Devido à atividade dos UPs, cada canal licenciado apresenta um padrão de utilização que pode ser representado por uma cadeia de Markov de tempo contínuo com dois estados, como na Figura 1. Neste modelo, os estados ON e OFF representam, respectivamente, os períodos de atividade (canal ocupado) e inatividade (canal livre) do UP que utiliza aquele canal. Por ser uma cadeia de Markov, o tempo de permanência nos estados ON, (t_{ON}) e OFF (t_{OFF}) é dado por variáveis aleatórias com distribuições exponenciais de taxas α e β , respectivamente.

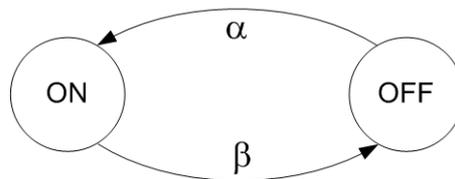


Figura 1. Cadeia de Markov representando a utilização dos canais licenciados

Este modelo de utilização dos canais licenciados é adotado em diversos outros trabalhos existentes na literatura [Kim and Shin 2008, Lee and Akyildiz 2008, da Silva and de Rezende 2009, da Silva and de Rezende 2010, da Silva and de Rezende 2011]. Além disso, segundo os resultados experimentais apresentados em [Wellens et al. 2009], este modelo é representativo em diversos cenários.

A rede secundária considerada no modelo é uma rede do tipo infra-estruturada, semelhante a uma “célula”, onde uma estação base (EB) coordena o acesso de usuários clientes às oportunidades de acesso ao espectro licenciado. Os dispositivos clientes possuem apenas funcionalidades mínimas de comunicação devido às restrições impostas pelo *hardware*, como por exemplo, baixo poder de processamento e limitação de consumo energia. Portanto, a EB implementa todas as funcionalidades cognitivas, desde a detecção dos UPs até a descoberta de oportunidades de acesso à faixa licenciada. Neste tipo de

cenário, como as tarefas e decisões são centralizadas pelo EB da rede secundária, os conceitos de US e rede secundária podem ser usados como sinônimos.

A Figura 2 apresenta o funcionamento de um US ao longo do tempo. Este modelo assume que a rede secundária utiliza apenas um canal por vez para as suas comunicações. Para evitar causar interferência nos UPs que estão ativos, o US deve periodicamente realizar o sensoreamento do seu canal de operação, que são os pequenos períodos representados em cinza na figura. Durante estes períodos de sensoreamento, a EB da rede secundária garante que todas as estações clientes permaneçam em silêncio para que o sensoreamento do canal não seja influenciado por transmissões da própria rede secundária. Por isso, a escolha cuidadosa do intervalo entre sensoreamentos do canal de operação torna-se uma parte importante do funcionamento da rede secundária, que representará um compromisso entre eficiência na utilização do canal e a rápida detecção do UP.

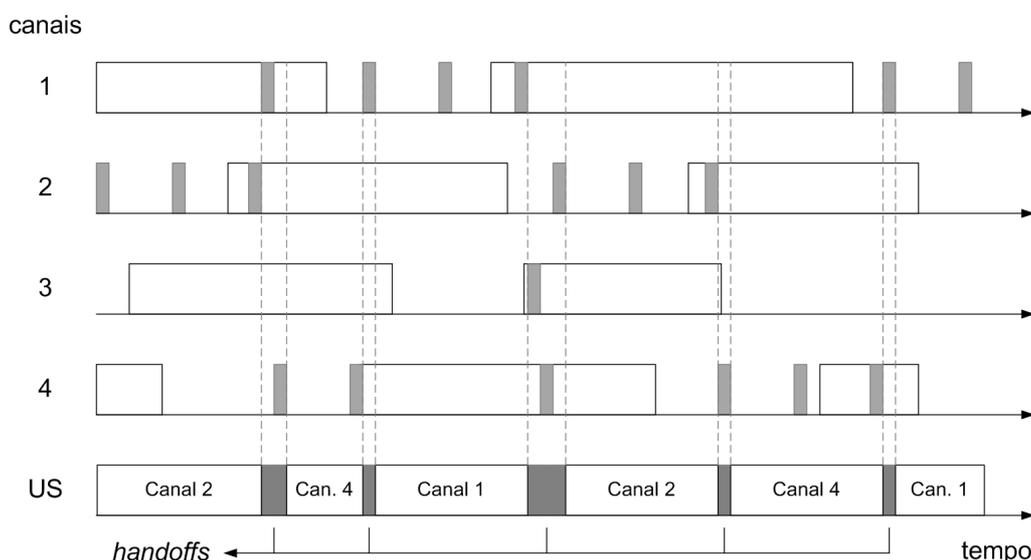


Figura 2. Funcionamento do US ao longo do tempo

No momento em que o sensoreamento detecta que um UP entrou em atividade no canal de operação, o US deve iniciar um procedimento de *handoff* de espectro (períodos em cinza escuro na linha do tempo do US na Figura 2). Nesta fase, o US realiza o sensoreamento sequencial dos canais da faixa licenciada a fim de encontrar um canal livre para o uso. O tempo necessário para descobrir um canal livre está relacionado com a estratégia utilizada para ordenar os canais que serão sensoreados. Uma boa ordem de sensoreamento dos canais permite a rápida determinação de um canal livre e/ou garante que o canal encontrado estará livre por um longo período de tempo. Assim, a sobrecarga (*overhead*) causada pela duração e pelo número de *handoffs* pode ser reduzida.

Além do sensoreamento periódico do canal de operação da rede secundária, o modelo utilizado neste trabalho assume que o US também realiza periodicamente o sensoreamento pró-ativo dos outros canais da faixa licenciada. Neste caso, como mencionado na Seção 1, a finalidade do sensoreamento dos outros canais é colher informações que permitam determinar critérios mais elaborados para o ordenamento dos canais a serem sensoreados durante as fases de *handoff*.

4. Proposta

O mecanismo de *handoff* de espectro proposto neste trabalho pode ser dividido em três partes: i) cálculo do ciclo de sensoreamento ótimo; ii) sensoreamento pró-ativo; iii) determinação da sequência de sensoreamento. Cada uma dessas partes será detalhada nas subseções seguintes.

4.1. Cálculo do Ciclo de Sensoreamento Ótimo

O ciclo de sensoreamento corresponde ao intervalo de tempo no qual o US deve sensorear o seu próprio canal de operação para detectar um possível retorno do UP. De acordo com o trabalho em [Lee and Akyildiz 2008], existe um ciclo de sensoreamento ótimo para o qual o tempo de transmissão é maximizado e a interferência causada no UP é limitada. O ciclo corresponde ao tempo de sensoreamento (t_s) adicionado ao tempo de transmissão (t_t), ou seja, $t_c = t_s + t_t$. O valor ótimo do ciclo depende de fatores como o modelo de atividade do canal, a probabilidade de falso alarme na detecção, entre outros.

No mecanismo proposto, o ciclo de sensoreamento ótimo para o canal i é calculado de acordo com as equações de 1 a 3, como em [Lee and Akyildiz 2008]. As equações 1 e 2 fornecem os tempos de sensoreamento e transmissão no canal i , respectivamente. Para esse cálculo é necessário o uso de um estimador da atividade dos canais, implementado como definido em [Kim and Shin 2008]. O estimador assume a mesma consideração descrita na Seção 3, de que todos os canais seguem um padrão de atividade do tipo ON-OFF com tempos de permanência em cada estado seguindo distribuições exponenciais.

$$t_{s,i} = \frac{1}{W \cdot \gamma^2} \left[Q^{-1}(P_{FA}) + (1 + \gamma)Q^{-1} \left(\frac{P_{OFF}P_{FA}}{P_{ON}} \right) \right]^2 \quad (1)$$

onde W é a largura de banda da faixa de espectro do canal, $\gamma = \sigma_x^2/\sigma_w^2$ representa a relação sinal-ruído (SNR) entre o sinal primário e o ruído presente no canal, Q^{-1} é a inversa da função gaussiana Q , P_{FA} é a probabilidade de ocorrência de alarmes falsos, P_{OFF} é a probabilidade do canal estar livre e P_{ON} é a probabilidade do canal estar ocupado.

$$t_{t,i} = -\frac{1}{\mu} \cdot \log \left(1 - \frac{P_I}{P_{OFF}} \right) \quad (2)$$

onde $\mu = \max(\alpha, \beta)$, $\alpha = \frac{1}{t_{ON}}$, $\beta = \frac{1}{t_{OFF}}$ e P_I é a taxa máxima de interferência causada ao primário.

A equação 3 apresenta a fórmula do tempo do ciclo no canal i em função dos tempos de sensoreamento $t_{s,i}$ e de transmissão $t_{t,i}$.

$$t_{c,i} = t_{s,i} + t_{t,i} \quad (3)$$

4.2. Sensoreamento Pró-Ativo

Além de sensorear periodicamente o canal de operação, o mecanismo proposto baseia-se no sensoreamento periódico dos $N - 1$ canais restantes. Esse sensoreamento permite ao

US estimar o modelo de atividade dos canais, a partir do qual será possível calcular o ciclo de sensoriamento ótimo. Além disso, ele permite ao US amostrar o estado dos canais para fins de determinação da sequência de sensoriamento de *handoff* descrita a seguir. O sensoriamento pró-ativo faz com que o US tenha que interromper sua transmissão para realizar essa tarefa. Isso se deve ao fato do US contar apenas com uma interface. Assim, o sensoriamento pró-ativo gera uma perda no aproveitamento das oportunidades de espectro, mas pode trazer benefícios no instante de realização do *handoff*, como será mostrado nas avaliações.

Quanto maior a frequência do sensoriamento pró-ativo, maior será o *overhead* causado, mas mais acuradas serão as informações para realização do *handoff*. Quando o período do sensoriamento pró-ativo ultrapassa um determinado valor, as estimativas fornecidas pelo estimador do canal se tornam imprecisas, o que afeta o desempenho do mecanismo de *handoff*.

4.3. Sequência de Sensoriamento de Handoff

A sequência de sensoriamento de *handoff* corresponde à ordem na qual os canais devem ser sensorizados pelo US até que um novo canal livre seja encontrado. Para a obtenção dessa sequência é necessário que o US conheça o modelo de atividade dos canais, assim como o estado de cada um deles na última vez em que eles foram sensorizados. Toda a originalidade da proposta concentra-se nessa parte do mecanismo.

A sequência de sensoriamento determinada pelo mecanismo proposto leva em conta a probabilidade do canal estar livre dada a última medição (P_{IDLE}) e os tempos de transmissão e de interferência esperados naquele canal. Essa probabilidade P_{IDLE} , calculada pela equação 4, leva em conta as probabilidades de transição $P_{00}(\Delta t)$ ¹ e $P_{10}(\Delta t)$ ¹ para relacionar o estado do canal i observado em uma medição realizada com a sua probabilidade de estar livre num momento Δt após essa medição [Kim and Shin 2008].

$$P_{IDLE,i}(\Delta t) = \begin{cases} P_{00,i}(\Delta t) = (1 - P_{ON,i}) + P_{ON,i} \cdot e^{-(\alpha_i + \beta_i)\Delta t} & , \text{ se } d_i = 0 \\ P_{10,i}(\Delta t) = (1 - P_{ON,i}) + (1 - P_{ON,i}) \cdot e^{-(\alpha_i + \beta_i)\Delta t} & , \text{ se } d_i = 1 \end{cases} \quad (4)$$

onde d_i é o estado do canal i na última amostra coletada, Δt é o tempo passado entre a obtenção dessa amostra e o momento do *handoff*.

O tempo de transmissão esperado (t_E), como definido em [Lee and Akyldiz 2011] e também usado em [Duan and Li 2011], é o intervalo de tempo, dentro de um período de inatividade do canal i , entre o início da utilização de um canal pelo US até a necessidade de um *handoff*. Este último pode ocorrer pela chegada de um UP ou por um alarme falso na detecção do mesmo. Desta forma, o t_E pode ser calculado pela equação 5.

¹A notação $P_{mn}(\Delta t)$ representa a probabilidade de um canal ser observado no estado n após Δt segundos em que o mesmo canal foi observado no estado m .

$$\begin{aligned}
t_{E,i} &= t_{c,i} \cdot \sum_{k=1}^{n-1} k \cdot (1 - P_{FA})^k \cdot P_{FA} + \frac{1}{\beta_i} (1 - P_{FA})^n \\
&= t_{c,i} \cdot \left[\frac{(1 - P_{FA})(1 - (1 - P_{FA})^{n-1})}{P_{FA}} \right. \\
&\quad \left. - (n - 1) \cdot (1 - P_{FA})^n \right] + \frac{1}{\beta_i} (1 - P_{FA})^n
\end{aligned} \tag{5}$$

onde $n = \lceil 1/\beta_i/t_{c,i} \rceil$ é o número médio de sensoreamentos que serão feitos durante um período de inatividade do canal e $\frac{1}{\beta_i}$ é a duração do período de inatividade do canal i ($t_{OFF,i}$).

O tempo de interferência esperado (t_I), definido nesse trabalho, considera a probabilidade de erro de detecção no surgimento de um UP (P_{MD}). Assim, esse termo corresponde ao intervalo de tempo, dentro de um período de atividade do canal i , entre a chegada do UP e a sua correta detecção, como mostrado na equação 6.

$$\begin{aligned}
t_{I,i} &= t_{c,i} \cdot \sum_{k=1}^{m-1} k \cdot P_{MD}^k \cdot (1 - P_{MD}) + \frac{1}{\alpha_i} P_{MD}^m \\
&= t_{c,i} \cdot \left[\frac{P_{MD}(1 - P_{MD}^{m-1})}{(1 - P_{MD})} \right. \\
&\quad \left. - (m - 1) \cdot P_{MD}^m \right] + \frac{1}{\alpha_i} P_{MD}^m
\end{aligned} \tag{6}$$

onde $m = \lceil 1/\alpha_i/t_{c,i} \rceil$ é o número médio de sensoreamentos que serão feitos durante um período de atividade do canal e $\frac{1}{\alpha_i}$ é a duração do período de atividade do canal i ($t_{ON,i}$).

5. Ambiente de Simulação e Resultados Numéricos

Para as avaliações de desempenho apresentadas neste trabalho foi desenvolvido um simulador de eventos discretos próprio. Nele, a nossa proposta, além de três outros esquemas de *handoff* existentes na literatura puderam ser implementados e avaliados. A parte comum do simulador, usada em todos os mecanismos, implementa o modelo de atividade dos canais, o cálculo do ciclo de sensoreamento ótimo, e o sensoreamento periódico de todos os canais. A parte específica a cada um dos mecanismos implementa o cálculo periódico da sequência de sensoreamento a ser usada pelo US em caso de necessidade de *handoff*.

O que define os diferentes mecanismos comparados nessa avaliação é o critério utilizado no ordenamento dos canais. A Tabela 1 mostra todos os mecanismos de *handoff* implementados, com as respectivas siglas usadas nas legendas das curvas de desempenho, seguida do critério utilizado no ordenamento dos canais e a referência das propostas já publicadas.

Na proposta denominada *duan*, os autores derivam a função $T_d(t, i)$ que fornece o valor esperado da parcela do tempo t que o canal i ficará livre [Duan and Li 2011]. Essa

Tabela 1. Esquemas de *handoff* implementados no simulador

Sigla	Critério	Referência
kim	P_{IDLE}	[Kim and Shin 2008]
duan	$P_{IDLE} \cdot t_E \cdot T_d(t_E)$	[Duan and Li 2011]
lee	t_E	[Lee and Akyldiz 2011]
proposta	$\frac{P_{IDLE} \cdot t_E}{t_I}$	-

função é utilizada como um dos termos no critério de ordenamento dos canais, utilizando-se o tempo esperado de transmissão (t_E) naquele canal como parâmetro da função.

Cada rodada de simulação foi executada por 100000 segundos, sendo que para cada parametrização foram executadas 50 rodadas de simulação. O número de canais usado foi igual a 15 e apenas um US (ou rede secundária) utilizou esses canais. Os parâmetros de simulação utilizados estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de simulação

Parâmetro	Descrição	Valores
W	largura de banda do canal	10 KHz
γ	SNR do sinal primário	-5dB
t_{pscan}	intervalo de sensoriamento pró-ativo	25, 50, 100, 150 s
P_I	taxa máx. de interferência no primário	0.05
P_{FA}	prob. de alarmes falsos	0.01
P_{MD}	prob. de erro de detecção de um UP	0.01, 0.1, 0.2 e 0.3
t_{sw}	latência de chaveamento de canal	0.015, 0.15, 0.5, 1.0 e 1.5 s
t_{OFF}	tempo médio de canal ocupado	distr. unif. [5-100] s.
t_{ON}	tempo médio de canal livre	distr. unif. [5-100] s.

As métricas de desempenho avaliadas são a utilização do espectro com sucesso e a fração de uso do espectro com interferência. Tais métricas correspondem às frações de tempo em que o US faz uso do espectro sem causar interferência e causando interferência nos UPs, respectivamente. Para o cálculo dessas métricas, computa-se o somatório dos tempos de transmissão com sucesso e com interferência, separadamente, ambos divididos pelo tempo total da simulação. Os resultados apresentados correspondem à média das 50 rodadas de simulação com barras de erro correspondentes a intervalos de confiança de 95%.

As Figuras 3 e 4 apresentam os resultados de utilização com sucesso e fração de interferência nos UPs pela variação do intervalo de tempo entre varreduras do sensoriamento pró-ativo. Na Figura 3 a probabilidade de erros de detecção P_{MD} foi configurada em 0.1, e na Figura 4 em 0.2. Em ambos os cenários, a latência de chaveamento de canal t_{sw} foi igual a 0.15 s.

Estes resultados mostram que, em ambos os cenários e todos os valores de intervalo entre varreduras, o desempenho da métrica utilização com sucesso é muito semelhante para todos os esquemas, exceto lee. Isto ocorre porque os valores utilizados para intervalo de varredura permitiram a obtenção de informações suficientes para o cálculo

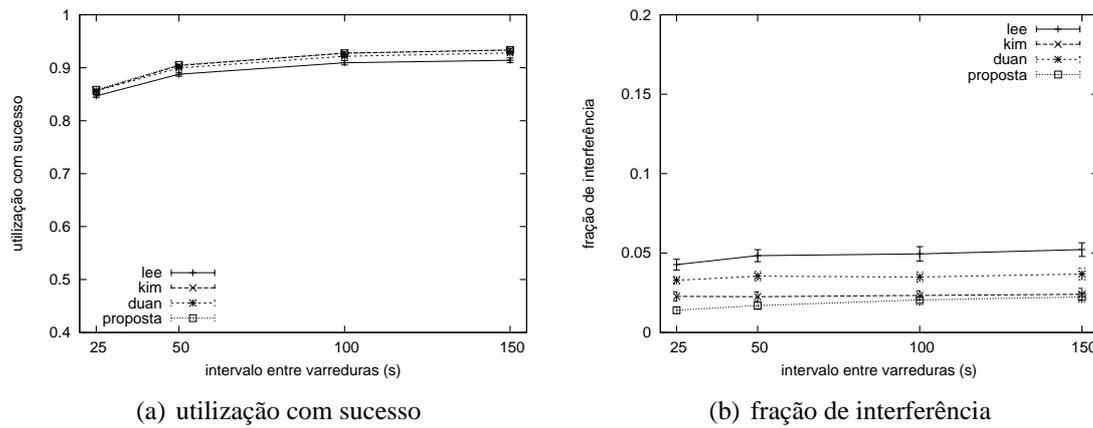


Figura 3. Variação do intervalo entre varreduras do sensoriamento pró-ativo (t_{pscan}) para P_{MD} 0.1 e latência de chaveamento (t_{sw}) de 0.15 s.

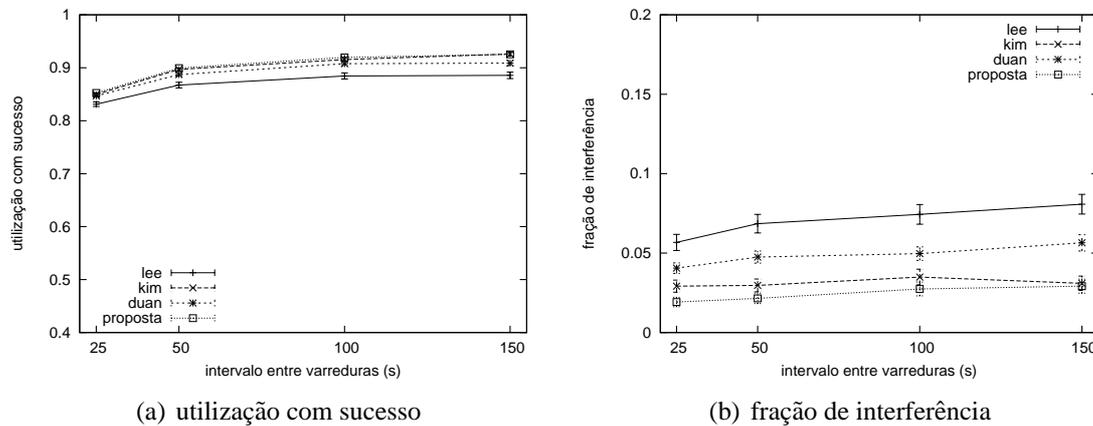


Figura 4. Variação do intervalo entre varreduras do sensoriamento pró-ativo (t_{pscan}) para P_{MD} 0.2 e latência de chaveamento (t_{sw}) de 0.15 s.

dos critérios de ordenamento dos canais que consideram medições dos estados dos canais, de forma que estes obtivessem vantagens em relação a esse esquema.

Outra observação importante a respeito destes resultados é que o esquema de *handoff* proposto neste trabalho apresenta o melhor desempenho em termos da fração de interferência em relação aos demais esquemas avaliados. Este melhor desempenho se justifica pelo fato deste esquema ser o único a considerar o tempo de interferência esperado (t_I) no critério de ordenamento dos canais para o *handoff*. Isto comprova a importância deste parâmetro em cenários onde a probabilidade de erros de detecção (P_{MD}) é significativa.

Nas Figuras 5 e 6 são apresentados os resultados dos esquemas avaliados em função da latência de chaveamento de canal. Em todos os resultados pode-se perceber que o aumento da latência de chaveamento de canal causa a redução da utilização com sucesso e da fração de interferência. Este impacto é causado pelo aumento do *overhead* das trocas de canal, que se torna muito significativo em comparação com o tempo remanescente para que o US permaneça transmitindo, tanto com sucesso quanto com in-

terferência. Vale ressaltar que, além das trocas de canal realizadas na fase de *handoff*, as varreduras periódicas dos $N - 1$ canais restantes também incorrem em trocas de canal, as quais contribuem para o aumento do *overhead*.

Ainda nos resultados das Figuras 5 e 6 pode-se perceber que, por considerar o tempo de interferência esperado (t_I) no ordenamento, o esquema de *handoff* proposto é aquele que apresenta a menor fração de interferência para todos os valores de latência. Além disso, a proposta desse trabalho ainda assim consegue atingir um desempenho superior ou razoavelmente próximo aos demais esquemas em termos de utilização com sucesso.

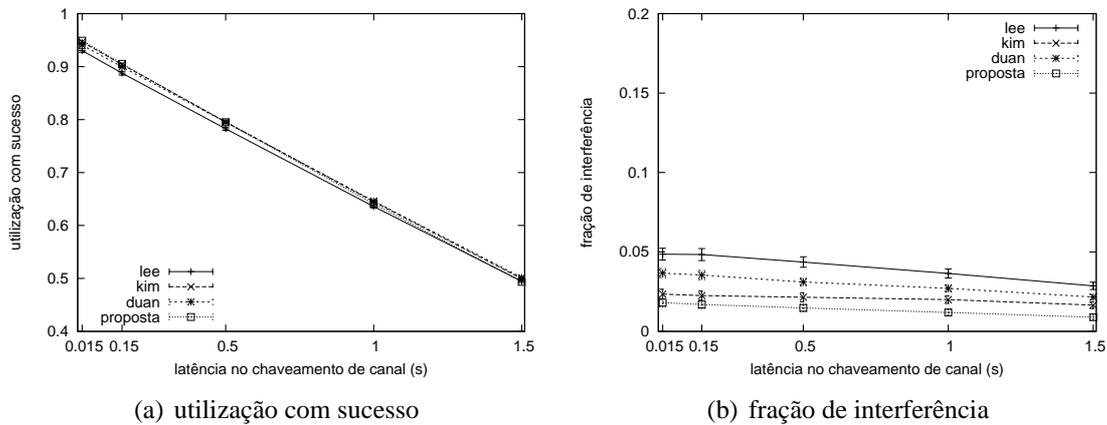


Figura 5. Variação da latência de chaveamento de canal (t_{sw}) para $P_{MD} 0.1$ e intervalo entre varreduras (t_{pscan}) de 50 s.

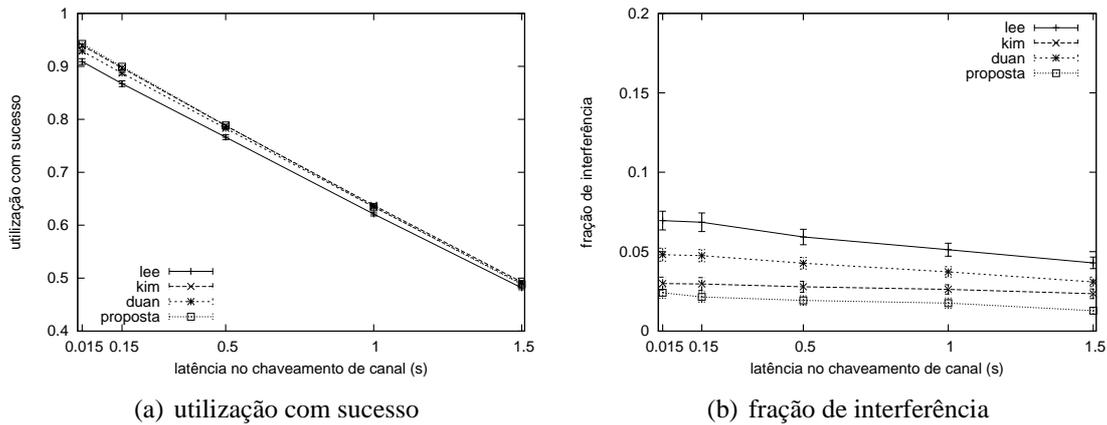


Figura 6. Variação da latência de chaveamento de canal (t_{sw}) para $P_{MD} 0.2$ e intervalo entre varreduras (t_{pscan}) de 50 s.

A Figura 7 mostra a influência da probabilidade de erro na detecção do UP (P_{MD}) na utilização do espectro. Como esperado, quanto maior esse parâmetro maior é a interferência sofrida pelos UPs (Figura 7(b)). No entanto, como a proposta deste trabalho leva em conta esse fator no critério de ordenamento da lista de sensoramento, ela fornece uma menor fração de interferência quando comparada às demais propostas. Com relação

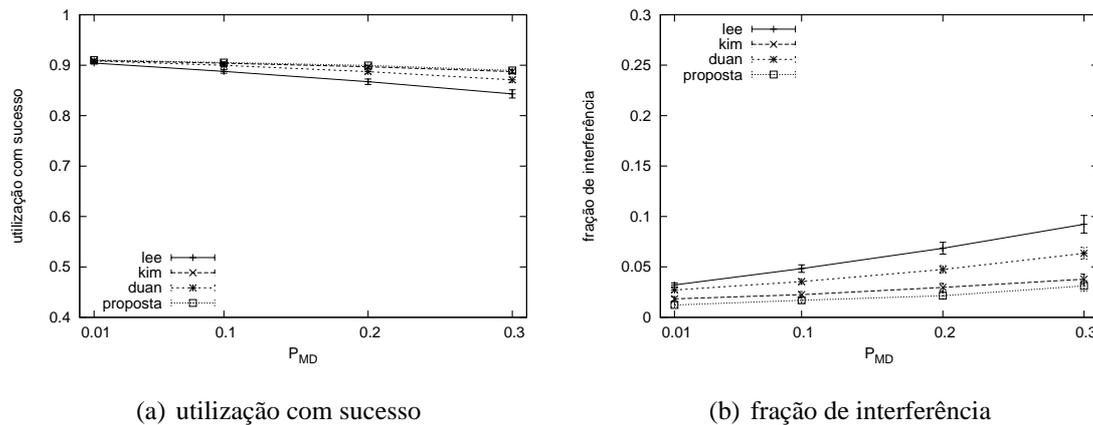


Figura 7. Variação de P_{MD} para latência de chaveamento (t_{sw}) de 0.15 s e intervalo entre varreduras (t_{pscan}) de 50 s.

à métrica de utilização com sucesso, o aumento do P_{MD} tem um impacto maior no mecanismo lee, pois esse mecanismo dá preferência a canais com maiores tempos esperados de transmissão, que por consequência sofrem interferência por mais tempo. Nos outros mecanismos, o impacto do aumento de P_{MD} é reduzido. Este impacto é praticamente o mesmo entre todos os outros mecanismos.

6. Conclusões e Trabalhos Futuros

O *handoff* de espectro é um mecanismo importante para o desempenho dos rádios cognitivos. Ele não só determina quando o usuário secundário deve mudar de canal, mas para qual canal essa mudança deve ser feita. Em mecanismos que realizam o sensoriamento pró-ativo dos canais, é possível manter uma lista dos canais em ordem de preferência de *handoff* de tal forma que ao detectar a presença de um usuário primário, o usuário secundário poderá seguir essa lista para determinar mais eficientemente qual canal será utilizado a partir de então.

Este trabalho propõe um novo critério de ordenamento de canais que tem como originalidade o fato de levar em conta a interferência esperada nos usuários primários. Essa proposta foi avaliada e comparada com outras propostas da literatura, e os resultados demonstram a capacidade desse mecanismo em garantir a utilização do espectro, mantendo o grau de interferência nos usuários primários limitado, mesmo em cenários com alta probabilidade de erros de detecção (P_{MD}).

Como trabalhos futuros, novos critérios de ordenamento poderiam ser propostos. Além disso, esquemas de predição de atividade dos canais poderiam ser usados para auxiliar o esquema de *handoff*.

Referências

Akyildiz, I. F., Lee, W.-Y., Vuran, M. C., and Mohanty, S. (2006). Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey. *Computer Networks: The Int. J. of Comp. and Telecom. Networking*, 50:2127–2159.

- da Silva, M. W. R. and de Rezende, J. F. (2009). Roteamento em Redes em Malha Híbridas de Rádios Cognitivos e IEEE 802.11. In *SBRC '09: XXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*.
- da Silva, M. W. R. and de Rezende, J. F. (2010). Routing in Hybrid Mesh Networks of Cognitive and IEEE 802.11 Radios. In *GLOBECOM '10: IEEE Global Communications Conference 2010*.
- da Silva, M. W. R. and de Rezende, J. F. (2011). Redes de Rádios Cognitivos com Disponibilidade Dinâmica de Oportunidades. In *SBRC '11: XXIX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*.
- Duan, J. and Li, Y. (2011). An optimal spectrum handoff scheme for cognitive radio mobile ad hoc networks. *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 11(3):11–16.
- Kim, H. and Shin, K. (2008). Efficient discovery of spectrum opportunities with mac-layer sensing in cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 7(5):533–545.
- Lee, W.-Y. and Akyildiz, I. (2008). Optimal spectrum sensing framework for cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7(10):3845–3857.
- Lee, W.-Y. and Akyildiz, I. (2011). A spectrum decision framework for cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 10(2):161–174.
- Lertsinsrubtavee, A., Malouch, N., and Fdida, S. (2010). Spectrum handoff strategies for multiple channels cognitive radio network. In *Proceedings of the ACM CoNEXT Student Workshop, CoNEXT '10 Student Workshop*, pages 20:1–20:2, New York, NY, USA. ACM.
- Wang, C.-W. and Wang, L.-C. (2009). Modeling and Analysis for Proactive-Decision Spectrum Handoff in Cognitive Radio Networks. In *Communications, 2009. ICC '09. IEEE International Conference on*, pages 1–6.
- Wang, L.-C. and Anderson, C. (2008). On the performance of spectrum handoff for link maintenance in cognitive radio. In *Wireless Pervasive Computing, 2008. ISWPC 2008. 3rd International Symposium on*, pages 670–674.
- Wang, L.-C. and Wang, C.-W. (2008). Spectrum Handoff for Cognitive Radio Networks: Reactive-Sensing or Proactive-Sensing? In *Performance, Computing and Communications Conference, 2008. IPCCC 2008. IEEE International*, pages 343–348.
- Wellens, M., Riihijarvi, J., and Mahonen, P. (2009). Empirical time and frequency domain models of spectrum use. *Physical Communication*, 2(1-2):10–32.
- Zhang, Y. (2009). Spectrum Handoff in Cognitive Radio Networks: Opportunistic and Negotiated Situations. In *Communications, 2009. ICC '09. IEEE International Conference on*, pages 1–6.