Um Modelo de Largura de Banda Flexível para Redes de Rádios Cognitivos Baseadas em Prioridade

Marcos R. M. Falcão[1], Andson M. Balieiro[2], Kelvin L. Dias[1]

[1]Centro de Informática – Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
50670-901– Recife – PE – Brasil

[2] Universidade de Pernambuco (UPE) – Campus Garanhuns

{mrmf,kld}@cin.ufpe.br, andson.balieiro@upe.br

Abstract. *Classic two-priority Cognitive Radio Networks (CRNs) models composed of Primary and Secondary Users (PUs and SUs) are not capable of analyzing SUs with different Quality of Service (QoS) requirements. Recently, few authors have designed three-layered models, but for specific bandwidth (BW) arrangements among the user layers. This paper proposes a continuous time Markov chain model that encompasses all possible BW requirements, which was assessed in terms of blocking and forced termination probabilities. The results show that prioritization highly influences on the overall performance, but the system's BW disposal may also significantly impact on the resource allocation process.*

Resumo. *Modelos de Redes de Rádios Cognitivos (RRCs) compostos por duas prioridades: usuários primários (UPs) e secundários (USs), não possibilitam a análise de USs com diferentes requisitos de Qualidade de Serviço (QoS). Recentemente, modelos com três classes de prioridades têm sido propostos, mas limitados na relação de largura de banda (BW) entre as classes. Este artigo propõe um modelo baseado em Cadeia de Markov de Tempo Contínuo (CMTC) e flexível na BW para RRCs com três níveis de prioridade. As probabilidades de bloqueio e terminação forçada dos USs são avaliadas e os resultados mostram que não somente a priorização influencia no desempenho da RRC, mas também a disposição de BW configurada nas classes.*

1. Introdução

Em Redes de Rádios Cognitivos (RRCs), os usuários secundários (USs) acessam, de forma oportunista, o espectro temporariamente não utilizado pelos usuários primários (UPs) [Liang et al. 2001]. Dado que o ecossistema sem fio compreende aplicações heterogêneas (ex. *streaming* de vídeo, jogos *online*, *web browsing* e *internet banking*) que têm diferentes requisitos de Qualidade de Serviço (QoS), o suporte a múltiplas classes de serviço é uma característica esperada para RRCs. Padrões tais como o IEEE 802.11p para Redes Veiculares Ad Hoc (VANETs) têm sido preparados para atender o montante de largura de banda requerida pelo tráfego de informação/entretenimento, que pode colidir com tipos vitais, como aqueles de aplicações de segurança para motoristas. Assim, para garantir a QoS dos níveis de tráfego mais relevantes, os padrões têm utilizado múltiplas prioridades para gerenciar os diferentes tipos de fluxos na rede. Seguindo esta abordagem,

diversos autores têm adotado classes de prioridade em RRCs, considerando duas [Li et al. 2012; Jiao et al. 2014] ou três prioridades [Chu et al. 2014; Chu et al. 2015].

Entretanto, muitos autores têm proposto modelos inflexíveis quanto à largura de banda requerida pelas classes, i.e., permitem apenas que o UP tenha requisito de largura de banda estritamente maior que o US [Chu et al. 2014; Chu et al. 2015] ou o oposto [Li et al. 2012]. Assim, cenários onde: (1) uma rede inteligente de energia (*smart grid*) é implantada como rede secundária e sinais de TV digital ATSC com 6 MHz de largura de banda compõem a rede primária; e (2) uma rede de streaming multimídia para casas conectadas (ex. usando o padrão IEEE 802.11af) é a rede secundária e sinais de TV analógica NTSC com 100 MHz de largura de banda formam o sistema primário não são possíveis de serem analisados utilizando um único modelo [Li et al. 2012, Jiao et al. 2014; Chu et al. 2014; Chu et al. 2015]. Devido a esta limitação, um sistema mais flexível em termos de largura de banda entre UPs e USs com três camadas de prioridades é proposto neste artigo. Este modelo classifica a rede secundária em duas camadas distintas: US de primeira classe (US_1) e US de segunda classe (US_2), os quais têm maior e menor prioridade de acesso aos recursos da RRC, respectivamente, mas mantém o UP como sendo o usuário de maior prioridade, acima do US_1 e US_2. Diante do modelo, as probabilidades de bloqueio e terminação forçada dos usuários secundários são analisadas, bem como a influência da priorização de tráfego e da configuração de largura de banda das diferentes classes no desempenho da RRC.

Este artigo encontra-se assim organizado: A Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados. A Seção 3 apresenta o modelo proposto e a formulação das probabilidades de bloqueio e terminação forçada dos USs. A validação do modelo e a análise do impacto da priorização e configuração de largura de banda dos usuários no desempenho da RRC são apresentadas na Seção 4. A Seção 5 conclui este artigo.

2. Trabalhos Relacionados

Diferentes modelos têm sido propostos na literatura visando analisar a qualidade de serviço em RRCs. No entanto, eles apresentam limitações quanto à flexibilidade na escolha das larguras de banda, tanto de UPs quanto de USs. Em modelos (RRCs) com duas classes de serviço, a rede primária possui maior prioridade de acesso aos recursos que a rede secundária, os autores normalmente consideram que a largura de banda dos UPs é maior que a dos USs [Jiao et al. 2014; Chu et al. 2014; Chu et al. 2015]. Contudo, há também aqueles que consideram o oposto, isto é, a largura de banda dos USs sendo sempre maior ou igual a dos UPs [Jiao et al. 2010; Jiao et al. 2012; Li et al. 2012].

No modelo desenvolvido por [Zhu et al. 2007] há duas camadas de usuários (UPs e USs) na RRC, que possuem a mesma largura de banda definida por uma unidade de canal, o que torna o modelo muito simplificado. Além disso, tal trabalho apresentou falhas tanto na descrição de suas transições, que foram evidenciadas pelos autores [Ahmed et al., 2009] e [Martinez et al. 2010], quanto na validação, pois não foi adotado um modelo de simulação ou outro mecanismo para isso. Diferentemente de [Zhu et al. 2007], os autores em [Jiao et al. 2010; [Jiao et al. 2012; Li et al. 2012] consideram que os usuários podem ter larguras de banda diferentes de uma unidade de canal, mas sempre obedecendo a regra de que os USs devem ter largura de banda maior que os UPs. Já em [Jiao et al. 2014] os autores também permitem que os usuários possuam larguras de banda variadas,

porém, com a obrigatoriedade de que os UPs tenham largura de banda maior ou igual aos USs.

Em termos de restrições a largura de banda, [Jiao et al. 2014] se assemelha aos trabalhos [Chu et al. 2014; Chu et al. 2015]. No entanto, estes últimos diferem dos demais, pois propõem um modelo com três níveis de usuários ao invés de dois, i.e., a rede secundária é dividida em dois tipos de USs que podem possuir requisitos de banda diferentes, caracterizando um sistema secundário heterogêneo. Similarmente, este artigo também propõe um modelo em três camadas. Entretanto, o nosso modelo é mais flexível em termos de escolha da largura de banda que os demais, pois permite tanto que os UPs tenham maior largura de banda que os USs, quanto o contrário, o que aumenta a possibilidade de cenários que podem ser analisados. Desta forma, o modelo proposto endereça todas as configurações de largura de banda em RRCs com três níveis de prioridade, ao contrário dos demais trabalhos relacionados, e sua validação se dá através de um modelo de simulação. Além disso, nota-se que tanto [Zhu et al. 2007], quanto [Chu et al. 2014] e [CHU et al. 2015] possuem erros em algumas transições, conforme descrito na Seção "Apêndice" deste artigo.

3. Modelo Proposto

O modelo proposto adota cadeias de Markov de tempo continuo (CMTC) para representar as interações entre os UPs e USs na RRC. Nesse modelo, três tipos de usuários (UP, US_1 e US_2) compartilham N canais com as chegadas de usuários sendo modeladas como processos de Poisson, com taxas λ_{UP}, λ_{US_1} e λ_{US_2} e os tempos de serviço dos usuários são exponencialmente distribuídos com taxas μ_{UP}, μ_{US_1} e μ_{US_2}, para os UPs, US_1s e US_2s, respectivamente [Chu et al. 2014]. O modelo permite que a taxa de serviço varie de acordo com a largura de banda requerida, ou seja, quando M canais são agregados, então a taxa de serviço alcançada é $M * \mu$, o que diminui a duração de serviço do usuário.

A RRC proposta utiliza uma abordagem *overlay* centralizada que necessita de um canal de controle comum para mapear o status dos recursos ao longo da operação. Similarmente à maioria dos estudos na área, este trabalho não leva em consideração a sobrecarga imposta pelo atraso de detecção do espectro e o atraso de colisão do sistema, uma vez que são instantes curtos comparados à duração da transmissão. Em outras palavras, o módulo de controle central é responsável por escalar a fila de serviços de modo a não gerar atrasos devido a colisão, retirada ou acesso aos recursos da rede.

O mecanismo de prioridade do modelo proposto tem a seguinte forma: Quando um novo US_1 chega na RRC, um conjunto de canais não ocupados por UPs ou US_1s é aleatoriamente alocado a um novo usuário. Caso o conjunto selecionado esteja ocupado por US_2s, tais usuários vagam o conjunto de canais e buscam outros canais disponíveis na RRC para retomarem as suas comunicações. Caso não existam canais disponíveis, os US_2s terão a comunicação terminada abruptamente. Este gerenciamento de recursos pode ser realizado por uma estação base cognitiva. De forma similar, o UP segue o mesmo procedimento em relação aos US_1 e US_2. Uma vez que o UP é admitido, ele deixa a rede somente quando seu serviço é completado, o que difere dos USs, que podem ser forçados a deixarem a RRC antes da finalização das suas transmissões.

Neste modelo, uma RRC possui N canais e pode estar em vários estados, que é representado por uma tupla (i, j, k), onde i, j e k são os números de UPs, US_1s e US_2s

presentes na RRC, respectivamente. O espaço de estados viável (Ω) é gerado segundo a Eq. 1, onde B_{UP}, B_{US_1} e B_{US_2} são os requisitos de largura de banda do UP, US_1 e US_2, respectivamente.

$$\Omega = \begin{cases} (\mathrm{i,j,k}) \mid 0 \le \mathrm{i} \le \left\lfloor N/B_{UP} \right\rfloor, 0 \le j \le \left\lfloor N/B_{US_1} \right\rfloor, 0 \le k \le \left\lfloor N/B_{US_2} \right\rfloor, \\ \text{com } (i * B_{UP} + j * B_{US_1} + k * B_{US_2}) \le N \end{cases} \quad (1)$$

As expressões nas Subseções 3.1 e 3.2 descrevem todas as possíveis transições de estado para o sistema, as quais são classificadas como chegadas (solicitações) de usuários ou finalização de serviço. As transições $\gamma_{(i,j,k)}^{(i',j',k')}$ ocorrem de um estado viável (i, j, k) para outro (i', j', k') e são divididas em casos de terminações normais e forçadas, onde a primeira indica a chegada de usuários que não implica em interrupção de outros usuários, enquanto que a última necessariamente causará uma interrupção de usuário.

3.1. Transições do Estado (i, j, k) para Outros Estados

Considerando que a quantidade de recursos disponíveis (*idle*) na RCC quando o sistema está no estado (i, j, k) é dada por $\mathrm{idle} = \mathrm{N} - (\mathrm{i} * \mathrm{B}_{\mathrm{UP}}) - (\mathrm{j} * \mathrm{B}_{\mathrm{US}_1}) - (\mathrm{k} * \mathrm{B}_{\mathrm{US}_2})$, tem-se as seguintes transições no modelo.

a) Chegada (solicitação) de UP na RRC

Na chegada de um UP, três situações de admissão podem ocorrer dependendo da ocupação da RRC, as quais são descritas a seguir:

- Admissão do UP sem terminação forçada de USs: caso a quantidade de recursos disponíveis seja maior ou igual à largura de banda solicitada pelo UP, ou seja, $\mathrm{B}_{\mathrm{UP}} \le idle$, então B_{UP} canais serão alocados ao UP e nenhum outro usuário terá o serviço finalizado forçadamente, situação denotada pela transição da Eq. 2.

$$\gamma_{(i,j,k)}^{(i+1,j,k)} = \lambda_{UP} \quad (2)$$

- Admissão do UP e terminação forçada de US_2: caso o número de recursos disponíveis seja menor do que a largura banda do requerida pelo UP, mas a soma dos recursos disponíveis com os recursos ocupados pelos US_2s seja maior do que o solicitado pelo UP, isto é, $idle \le B_{UP} \le (idle + k * B_{US_2})$, então B_{UP} canais serão atribuídos ao UP e $\mathrm{Z} = \left\lceil (\mathrm{B}_{\mathrm{UP}} - \mathrm{idle}) / \mathrm{B}_{\mathrm{US}_2} \right\rceil$ US_2s terão seus serviços descontinuados. A Eq.3 apresenta a transição correspondente a esta situação.

$$\gamma_{(i,j,k)}^{(i+1,j,k-z)} = \lambda_{UP} \quad (3)$$

- Admissão do UP e terminação forçada de US_1 e US_2: quando a soma dos canais disponíveis com aqueles ocupados pelos US_2s não é suficiente para acomodar o novo UP, mas tal montante adicionado aos recursos utilizados pelos US_1s é, ou seja, $(idle + k * B_{US_2}) < \mathrm{B}_{\mathrm{UP}} \le (idle + j * B_{US_1} + k * B_{US_2})$, B_{UP} canais são alocados

ao UP e $y=[((i*B_{UP}+j*B_{US_1})-N+B_{UP})/B_{US_1}]$ US_1s e k US_2 terão as comunicações terminadas abruptamente, conforme ilustra a transição na Eq.4.

$$\gamma_{(i,j,k)}^{(i+1,j-y,0)}=\lambda_{UP} \tag{4}$$

b) Chegada (solicitação) de US_1 na RRC

A chegada de um US_1 na RRC pode desencadear duas situações possíveis de admissão.

- Admissão do US_1 sem terminação forçada de US_2: caso o número de canais disponíveis seja maior ou igual a largura de banda requisitada pelo US1, isto é, $B_{US_1}\leq idle$, então B_{US_1} canais serão alocados ao US_1 sem que nenhum US_2 seja forçado a terminar a comunicação (ver Eq. 5).

$$\gamma_{(i,j,k)}^{(i,j+1,\mathrm{k})}=\lambda_{US_1} \tag{5}$$

- Admissão do US_1 com terminação forçada de US_2: quando a largura de banda demandada pelo US_1 não pode ser satisfeita apenas com os canais disponíveis, mas pode ser atendida considerando também os recursos utilizados pelos US_2s, ou seja, $idle<B_{US_1}\leq(idle+k*B_{US_2})$, B_{US_1} canais são designados ao novo US_1 e as comunicações de $z=[(B_{US_1}-idle)/B_{US_2}]$ US_2s são terminadas.

c) Chegada (solicitação) de US_2 na RRC

Havendo recursos disponíveis para atender à demanda do US_2 que está chegando na RRC, ou seja, $B_{US_2}\leq idle$, tal usuário é admitido e B_{US_2} canais são alocados a ele. Esta situação é representada pela transição descrita na Eq. 6.

$$\gamma_{(i,j,k)}^{(i,j,\mathrm{k}+1)}=\lambda_{US_2} \tag{6}$$

d) Completude do Serviço do UP e dos USs

Quando os usuários têm os seus serviços completados, os recursos tornam-se disponíveis para uso pelos outros usuários da RRC. As transições que denotam a completude do serviço do UP, US1 e US2 são descritas nas Eqs. 7, 8 e 9, respectivamente.

$$\gamma_{(i,j,k)}^{(i-1,j,\mathrm{k})}=i*\mu_{UP} \tag{7}$$

$$\gamma_{(i,j,k)}^{(i,j-1,\mathrm{k})}=j*\mu_{US_1} \tag{8}$$

$$\gamma_{(i,j,k)}^{(i,j,\mathrm{k}-1)}=k*\mu_{US_2} \tag{9}$$

3.2. Transições de outros Estados para o Estado (i, j, k)

Considerando a função $\mathrm{free(i,j,k)=N-(i*B_{UP})-(j*B_{US_1})-(k*B_{US_2})}$, que denota o número de recursos disponíveis quando a RRC está no estado (i,j,k), as transições do modelo proposto são como segue.

a) Chegada (solicitação) de UP na RRC

A chegada do UP na RRC pode desencadear três situações de admissão, as quais são descritas a seguir:

- Admissão do UP sem terminação forçada de USs: se o número de canais disponíveis é maior ou igual à largura de banda solicitada pelo UP, ou seja, $B_{UP} \leq free(i-1, j, k)$, então B_{UP} canais serão alocados ao UP e nenhum outro usuário será finalizado forçadamente, o que é denotado pela transição da Eq. 10.

$$\gamma_{(i-1,j,k)}^{(i,j,k)} = \lambda_{UP} \tag{10}$$

- Admissão do UP e terminação forçada de US_2: se a quantidade de recursos disponíveis é menor do que a largura banda requerida pelo UP, ou seja, $B_{UP} > free(i-1, j, k+z')$, $k > 0$, então z' US_2s serão descartados da RRC, onde $z' = \lceil B_{UP} / B_{US_2} \rceil$ US_2s serão removidos da RRC, caso o espaço liberado seja o suficiente para o UP recém-chegado. A transição que descreve esta situação é dada na Eq. 11.

$$\gamma_{(i-1,j,k+z')}^{(i,j,k)} = \lambda_{UP} \tag{11}$$

- Admissão do UP e terminação forçada de US_1 e/ou US_2: quando a quantidade de recursos livre é menor do que a largura de banda solicitada pelo UP, ou seja, $B_{UP} > free(i-1, j, k+z')$ e $k = 0$, quatro situações podem ocorrer, com transição definida na Eq. 12.

  i. $B_{US_1} \leq B_{UP} < B_{US_2}$: se $k + z' > 0$, então somente um US_2 será descartado da RRC, ou seja, $z' = 1$. Caso $k + z' = 0$, então não existem US_2s a serem descartados, assim $y' = \lceil B_{UP} / B_{US_1} \rceil$ US_1s terão as comunicações finalizadas forçadamente.

  ii. $B_{UP} < B_{US_1}$ e $B_{UP} < B_{US_2}$: se $k + z' > 0$, então somente um US_2 será descartado, ou seja, $z' = 1$ e $y' = 0$. Caso $k + z' = 0$, então apenas um US_1 será descartado, ou seja, $z' = 0$ e $y' = 1$.

  iii. $B_{UP} \geq B_{US_1}$ e $B_{UP} \geq B_{US_2}$: neste caso, y' pode variar de 0 a B_{UP} / B_{US_1}, enquanto z' varia de 0 a B_{UP} / B_{US_2}, dado que $y' * B_{US_1} * z' B_{US_2} = (B_{UP} - free(i-1, j+y', k+z'))$.

  iv. $B_{US_2} \leq B_{UP} < B_{US_1}$: se $B_{UP} \leq (free(i-1, j+y', k+z') + (k+z') * B_{US_2})$, então z' varia de 0 a B_{UP} / B_{US_2} dado que $z' * B_{US_2} = (B_{UP} - free(i-1, j+y', k+z')$ e $y' = 0$. Caso $z' * B_{US_2} > (free(i-1, j+y', k+z') + (k+z') * B_{US_2})$, não somente todos os US_2s serão descartados, mas também um US_1 ($z' = k$ e $y' = 1$) para liberar recursos para o UP que está requisitando.

$$\gamma_{(i-1,j+y',k+z')}^{(i,j,k)} = \lambda_{UP} \tag{12}$$

b) Chegada (solicitação) de US_1 na RRC

A chegada de US_1 na RCC pode desencadear duas situações de admissão, dependendo de como os canais estão ocupados:

- Admissão do US_1 sem terminação forçada de US_2: quando o montante de recursos disponíveis é maior ou igual à largura de banda requisitada pelo US_1, B_{US_1} canais são alocados ao novo US_1 e nenhum US_2 terá a comunicação finalizada abruptamente. A Eq. 13 apresenta a transição relativa a esta situação.

$$\gamma_{(i,\mathrm{j}-1,k)}^{(i,j,k)} = \lambda_{US_1} \tag{13}$$

- Admissão do US_1 com terminação forçada de US_2: caso não haja recursos disponíveis para admitir um novo US_1 na RRC, mas através do descarte de US_2s se obtém canais suficientes para isso, ou seja, $free(i, j+y', \mathrm{k}+\mathrm{z}') + (\mathrm{k}+\mathrm{z}')*B_{US_2} \geq B_{US_1} > free(i, j-1, k+z')$, então mais de uma situação pode leva o sistema ao estado (i, j, k), com transição definida na Eq. 14.

  i. Se $\mathrm{B}_{\mathrm{US}_1} \leq B_{US_2}$ e $(k+z') > 0$, então $z' = 1$.

  ii. Se $\mathrm{B}_{\mathrm{US}_1} > B_{US_2}$, então z' pode assumir até $\lceil B_{US_1} / B_{US_2} \rceil$.

$$\gamma_{(i,\mathrm{j}-1,k+z')}^{(i,j,k)} = \lambda_{US_1} \tag{14}$$

c) Chegada (solicitação) de US_2 na RRC

Caso haja canais disponíveis suficientes para atender a demanda do novo US_2, ou seja, $B_{US_2} \leq free(i, j, k-1)$, então B_{US_2} canais serão alocados a ele, e a transição do sistema é dada pela Eq.15.

$$\gamma_{(i,\mathrm{j},k-1)}^{(i,j,k)} = \lambda_{US_2} \tag{14}$$

d) Finalização do Serviço do UP e dos USs

As transições do modelo que denotam a finalização (normal) da comunicação do UP, US_1 e US_2 e conduzem o sistema ao estado (i, j, k) são dadas nas Eqs. 15,16 e 17, respectivamente.

$$\gamma_{(i+1,\mathrm{j},k)}^{(i,j,k)} = (i+1)*\mu_{UP} \tag{15}$$

$$\gamma_{(i,\mathrm{j}+1,k)}^{(i,j,k)} = (j+1)*\mu_{US_1} \tag{16}$$

$$\gamma_{(i,\mathrm{j},k+1)}^{(i,j,k)} = (k+1)*\mu_{US_2} \tag{17}$$

Um exemplo de diagrama de transição de estados para uma RRC com dois canais (N=2) e requisitos de largura de banda $B_{UP} = 1$, $B_{US_1} = 1$ e $B_{US_2} = 1$ é ilustrado na Fig. 1, onde os fluxos horizontais para a direita (esquerda) representam a chegada (partida) de

US_1s, os fluxos verticais para cima (baixo) denotam a chegada (partida) de UPs e os fluxos diagonais para dentro (fora) do plano indicam a chegada (partida) de US_2s.

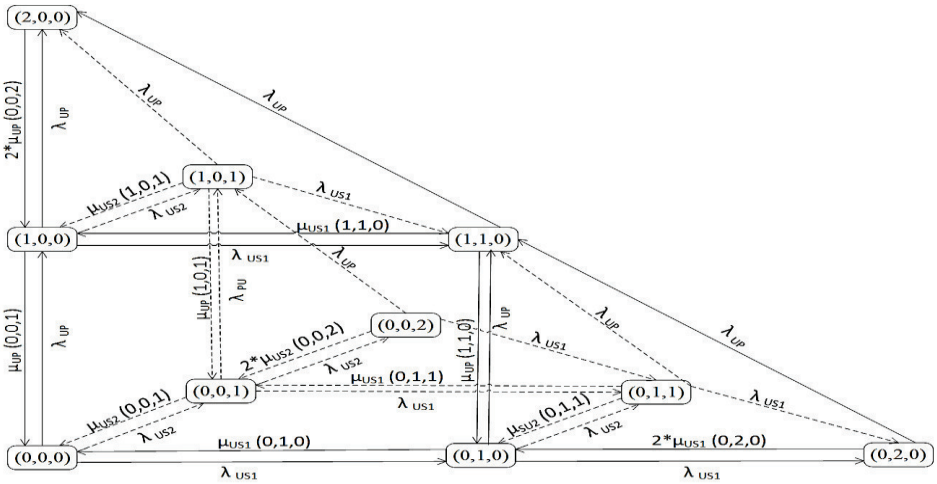

Figura 1. Diagrama de transição de estados com $N = 2$ **e** $B_{UP} = B_{US_1} = B_{US_2} = 1$

Para obter as probabilidades de estado estacionário do modelo, o sistema linear formado pelas equações de balanceamento (Eq. 18) e condição de normalização (Eq.19) deve ser resolvido, onde $\pi(i,j,k)$ denota a probabilidade de estado estacionário para o estado (i,j,k) e $I(i,j,k)$ é a função de indicação de estado viável (Eq. 20).

$$\sum_{i'=0}^{\left\lfloor \frac{N}{B_{UP}} \right\rfloor} \sum_{j'=0}^{\left\lfloor \frac{N}{B_{US_1}} \right\rfloor} \sum_{k'=0}^{\left\lfloor \frac{N}{B_{US_2}} \right\rfloor} \pi(i,j,k) * \gamma_{(i,j,k)}^{(i',j',k')} * I(i,j,k) * I(i',j',k') = \sum_{i'=0}^{\left\lfloor \frac{N}{B_{UP}} \right\rfloor} \sum_{j'=0}^{\left\lfloor \frac{N}{B_{US_1}} \right\rfloor} \sum_{k'=0}^{\left\lfloor \frac{N}{B_{US_2}} \right\rfloor} \pi(i',j',k') * \gamma_{(i',j',k')}^{(i,j,k)} * I(i,j,k) * I(i',j',k'), \; onde \; (i,j,k) \neq (i',j',k') \tag{18}$$

$$\sum_{i=0}^{\left\lfloor \frac{N}{B_{UP}} \right\rfloor} \sum_{j=0}^{\left\lfloor \frac{N}{B_{US_1}} \right\rfloor} \sum_{k=0}^{\left\lfloor \frac{N}{B_{US_2}} \right\rfloor} \pi(i,j,k) * I(i,j,k) = 1 \tag{19}$$

$$I(i,j,k) = \begin{cases} 1, \; se \; (i,j,k) \in \Omega \\ 0, \; caso \; contrário \end{cases} \tag{20}$$

A solução do sistema linear formado pelas Eqs. 19 e 20 é o vetor de estado estacionário. Ele é usado para formular as probabilidades de bloqueio e terminação forçada do US, que são métricas importantes na avaliação de desempenho da comunicação secundária na RRC.

3.3. Probabilidade de Bloqueio de US

O US é bloqueado quando ele tenta acessar a RRC, mas não existem recursos suficientes. Assim, a probabilidade de bloqueio é a porcentagem de USs que não são aceitos pela RRC, sendo um indicador útil de QoS. As probabilidades de bloqueio do US_1 e US_2,

denotadas por PB_{US_1} (ver Eq. 21) e PB_{US_2} (ver Eq. 22), respectivamente, são dadas pela soma das probabilidades de estado estacionário dos estados que caracterizam a rede totalmente ocupada para cada tipo de usuário.

$$PB_{US_1} = \sum_{i=0}^{\left\lfloor \frac{N}{B_{UP}} \right\rfloor} \sum_{j=\left\lceil \frac{N-(i*B_{UP})}{B_{US_1}} \right\rceil}^{\left\lfloor \frac{N}{B_{US_1}} \right\rfloor} \sum_{k=0}^{\left\lfloor \frac{N}{B_{US_2}} \right\rfloor} \pi(i,j,k)*I(i,j,k) \tag{21}$$

$$PB_{US_1} = \sum_{i=0}^{\left\lfloor \frac{N}{B_{UP}} \right\rfloor} \sum_{j=\left\lceil \frac{N-(i*B_{UP})}{B_{US_1}} \right\rceil}^{\left\lfloor \frac{N}{B_{US_1}} \right\rfloor} \sum_{k=\left\lceil \frac{N-(i*B_{UP})-(j*B_{US_1})}{B_{US_2}} \right\rceil}^{\left\lfloor \frac{N}{B_{US_2}} \right\rfloor} \pi(i,j,k)*I(i,j,k) \tag{22}$$

3.4. Probabilidade de Terminação Forçada de US

Uma vez que os USs são admitidos na RRC, a comunicação deles pode ser terminada abruptamente pela chegada de usuários de maior prioridade, causando a degradação da comunicação secundária. O US_1 sofre terminação forçada quando não existem recursos para atender o UP que está chegando mesmo considerando os canais adotados pelos US_2s, ou seja, $[idle+(k*B_{US_2})] < B_{UP}$. Dado que o estado do sistema é (i,j,k) e usando $idle$ para denotar o número de recursos disponíveis na RRC quando ela está no estado (i,j,k), o número de US_1s terminados forçadamente pela chegada de um UP é $y = \left\lceil ((i*B_{UP})+(j*B_{US_1})-N+B_{UP})/B_{US_1} \right\rceil$. Realizando o produto entre y e a taxa de UPs que ocasionam terminação forçada de US_1s, tem-se a taxa de US1s terminados forçadamente na RRC, a qual é apresentada no numerador da Eq. 23. Dividindo a taxa de US1s descartados pela taxa de US1s admitidos na RRC, tem-se a probabilidade de terminação forçada do US_1, a qual dada pela Eq. 23.

$$PTF_{US_1} = \frac{\lambda_{UP}}{(1-PB_{US_1})*\lambda_{US_1}} \sum_{i=0}^{\left\lfloor \frac{N}{B_{UP}} \right\rfloor} \sum_{j=0}^{\left\lfloor \frac{N}{B_{US_1}} \right\rfloor} \sum_{k=0}^{\left\lfloor \frac{N}{B_{US_2}} \right\rfloor} \pi(i,j,k)*y(i,j,k)*I(i,j,k)*y(i+1,j-y,k) \tag{23}$$

O US de mais baixa prioridade (US_2) está sujeito a eventos de terminação forçada nos dois casos seguintes. Na chegada de UP, quando não existem recursos disponíveis para atender o novo UP, ou seja, $B_{UP} > idle$, e, da mesma forma, na chegada de um US_1 com $B_{US_1} > idle$. O número de US_2s descartados por cada usuário de maior prioridade é $z_1 = \left\lceil (B_{UP}-idle)/B_{US_2} \right\rceil$ no primeiro caso e $z_2 = \left\lceil (B_{US_1}-idle)/B_{US_2} \right\rceil$ no último. Assim, as taxas de US_2s descartados no primeiro (C1) e no segundo (C2) caso são dadas pelas Eq. 24 e 25, respectivamente. Deste modo, a probabilidade de terminação forçada de US_2s é obtida através da razão entre a taxa total de US_2s descartados e a taxa de US_2s admitidos na RRC, dada na Eq. 26.

$$C_1 = \sum_{i=0}^{\left\lfloor \frac{N}{B_{UP}} \right\rfloor} \sum_{j=0}^{\left\lfloor \frac{N}{B_{US_1}} \right\rfloor} \sum_{k=0}^{\left\lfloor \frac{N}{B_{US_2}} \right\rfloor} \lambda_{UP}*\pi(i,j,k)*z_1*I(i,j,k)*y(i+1,j,k-z) \tag{24}$$

$$C_2 = \sum_{i=0}^{\left\lfloor \frac{N}{B_{UP}} \right\rfloor} \sum_{j=0}^{\left\lfloor \frac{N}{B_{US_1}} \right\rfloor} \sum_{k=0}^{\left\lfloor \frac{N}{B_{US_2}} \right\rfloor} \lambda_{US_1} * \pi(i,j,k) * z_2 * I(i,j,k) * y(i,j+1,k-z) \tag{25}$$

$$PTF_{US_2} = \frac{C_1 + C_2}{(1 - PB_{US_2}) * \lambda_{US_2}} \tag{26}$$

4. Validação do Modelo e Análise de Resultados

Para finalidade de validação, os resultados obtidos através do modelo analítico (linhas sólidas) foram comparados ao modelo de simulação (marcadores) baseado em eventos discretos, desenvolvido em MATLAB. Cada evento ocorre em um instante de tempo único, podendo causar uma mudança de estado do sistema. Ao contrário das simulações baseadas em tempo contínuo, não ocorre mudança no estado entre os eventos, logo, pode-se assumir que assim que processada uma requisição, o sistema passe a consumir o próximo evento, que é definido a partir da ordem de chegada, i.e., a disciplina de filas adotada é FIFO (*First In, First Out*). Como a criação dos eventos é realizada de forma independente, o passo final é unir as três filas de eventos geradas (uma para cada tipo de usuário). Diferentemente do modelo analítico, neste tipo de simulação as métricas não são derivadas, são médias de diferentes execuções.

Foi considerado um cenário composto de 4 canais de comunicação ($N = 4$), taxas de chegada de US_1 e US_2 dadas por $\lambda_{US_1} = 1$ e $\lambda_{US_2} = 1$ usuários por unidades de tempo e taxas de serviço de UP, US_1e US_2 iguais a $\mu_{UP} = 1$, $\mu_{US_1} = 1$ e $\mu_{US_2} = 1$ usuários por unidade de tempo, respectivamente. Embora se tenha adotado 4 canais, qualquer quantidade de canais pode ser considerada no modelo proposto, com o requisito que N deve ser maior ou igual ao maior requisito de largura de banda dos usuários. Os resultados do modelo de simulação foram obtidos através de 100 instâncias de execução com tempo de simulação igual a 10000 unidades de tempo. Os resultados médios são apresentados considerando um nível de confiança de 95%.

Para avaliar o desempenho da RRC sob diferentes níveis de ocupação primária (carga de UP), a taxa de chegada do UP foi variada. Trabalhos anteriores têm limitação nas configurações de largura de banda de cada tipo de usuário, ao passo que no modelo proposto não há esta limitação. Deste modo, seis cenários, que representam as possíveis configurações (relações de desigualdade) de largura de banda entre os usuários foram considerados, o que permite avaliar o impacto da configuração de largura de banda na comunicação dos USs. A Fig. 2 ilustra as seis configurações, onde, neste trabalho, os valores para as larguras de banda dos usuários foram definidos como 1, 2 e 4 canais. O desempenho da comunicação secundária foi avaliado em termos das probabilidades de bloqueio e terminação forçada dos USs.

A Fig. 3 apresenta os resultados da probabilidade de bloqueio para o US_1. Nota-se que a largura de banda requerida impacta significamemte no nível de admissão do US_1 na RRC. Por exemplo, requisitar uma largura de banda maior para transmissão pode ser difícil de ser atendida pela RRC, dependendo do tamanho da banda requisitada e do nível de ocupação primária, o que afeta a admissão de US_1s na RRC. Por esta razão, as configurações 3 e 4 (com marcadores “x” e “o”, respectivamente), que atribuíram as maiores larguras de banda aos US1s, apresentaram as maiores probabilidades de bloqueio

de US_1s. O mesmo se aplica aos resultados de probabilidade de bloqueio de US_2s ilustrados na Fig. 4, onde as configurações 5 e 6 (com marcadores "+" e "□"), em que o US_2 requer maior largura de banda para realizar a sua comunicação, apresentam as maiores probabilidades de bloqueio do US_2.

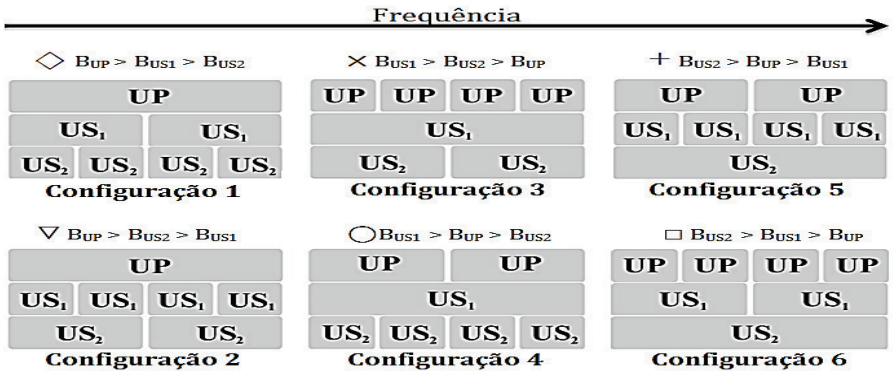

Figura 2. Configurações de largura de banda endereçadas pelo modelo

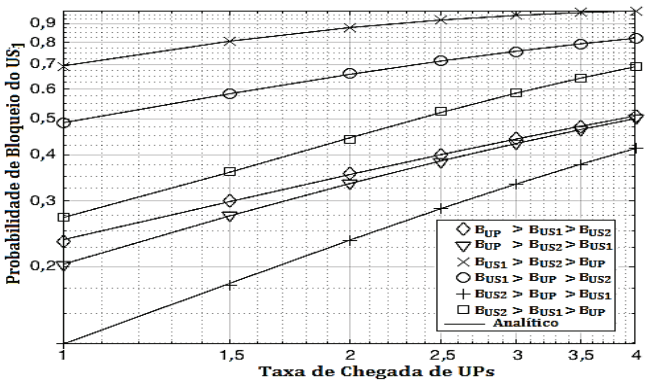

Figura 3. Resultados da Probabilidade de Bloqueio do US_1

Por outro lado, elevado requisito de largura de banda diminui a duração de serviço do usuário. Assim, quando o UP adota mais canais na sua comunicação, ele libera os recursos mais rapidamente, proporcionando a redução no bloqueio de US_1 e US_2. Isto justifica a diferença de desempenho entre as configurações 3 (maior probabilidade de bloqueio) e 4 na Fig. 3, e as configurações 5 e 6 (maior probabilidade de bloqueio) na Fig. 4, quando o requisito de largura de banda do UP varia.

Os melhores pares de resultados de probabilidade de bloqueio na rede secundária foram obtidos pelas configurações 2 e 5 (ver Fig. 3) e 1 e 4 (ver Fig. 4). Isto ocorreu, pois quanto menor é a largura de banda requisitada pelo US, mais facilmente ele pode ser aceito na RRC, mesmo em condições de alta carga na RRC. Neste aspecto, nota-se que, embora a priorização exerça um papel significativo na RRC, a configuração de largura de banda adotada na rede impacta no seu desempenho. Por exemplo, na configuração 4 com um cenário de alta carga primária ($\lambda_{UP} = 4$), a probabilidade de bloqueio do US_2 (ver Fig. 4) é menor (42,5%) do que a correspondente probabilidade de bloqueio do US_1 apresentada na Fig. 3 (50%) para um cenário esparso ($\lambda_{UP} = 1$), embora o US_1 tenha maior prioridade de acesso do que o US_2.

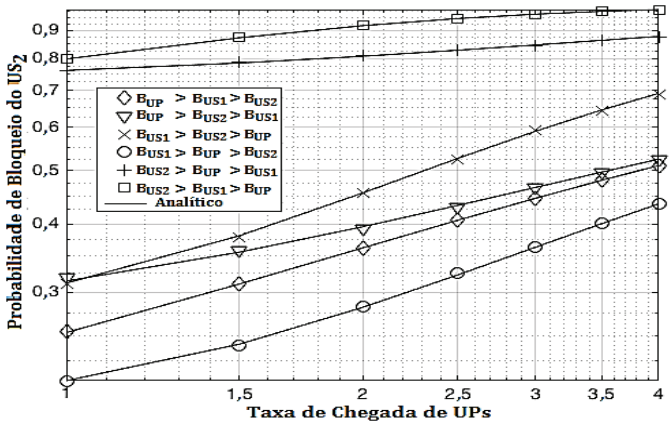

Figura 4. Resultados da Probabilidade de Bloqueio do US_2

Os resultados em termos de probabilidade de terminação forçada de US_1 e US_2 são apresentados na Figs. 5 e 6, respectivamente. Nota-se que quando os USs adotam largura de banda menor, tais como os definidos na configuração 2 (marcador "∇") para o US_1 (ver Fig. 5) e configuração 1 (marcador "◊") para o US_2 (ver Fig. 6), a chance de suas comunicações serem terminadas forçadamente aumenta, pois com menor largura de banda, maior é tempo de serviço e a chance de chegada de usuários de maior prioridade na RRC. De forma similar, a adoção de configurações com maior largura de banda na comunicação secundária também não é efetiva em termos de probabilidade de terminação forçada, pois, embora uma duração de serviço menor seja alcançada, a possibilidade da chegada de um usuário de maior prioridade requerer os canais adotados pela comunicação secundária pode aumentar, forçando o US a liberar os canais em uso e buscar outros recursos disponíveis para retomar a sua comunicação. Entretanto, pode ser muito difícil encontrar grandes montantes de recursos disponíveis.

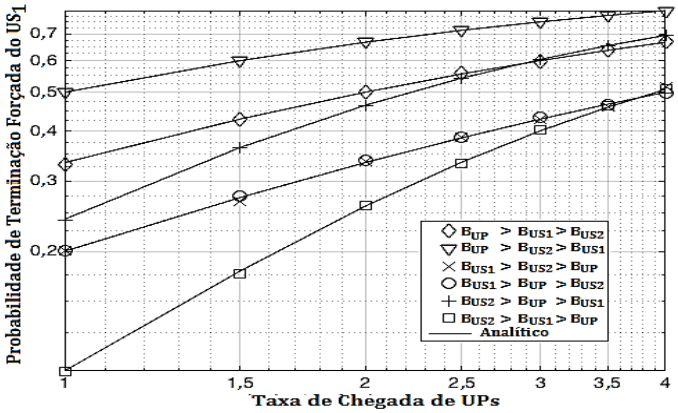

Figura 5. Resultados da Probabilidade de Terminação Forçada do US_1

Configurações com largura de banda intermediária, tais como as configurações 6 (marcador "□") na Fig. 5 para o US_1 e 3 (marcador "x") na Fig. 6 para o US_2, alcançaram o melhor compromisso entre o montante de recursos ocupados e o tempo de serviço total, o que mitigou a probabilidade de terminação forçada do US_1 e US_2, respectivamente.

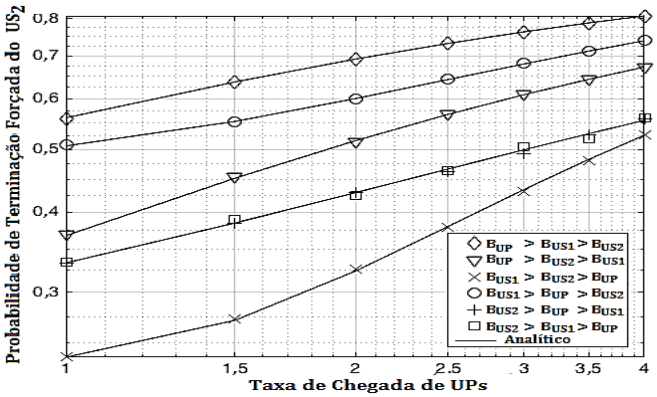

Figura 6. Resultados da Probabilidade de Terminação Forçada do US_2

5. Conclusão

Este trabalho propôs e validou um modelo baseado em CMTC e flexível em termos de largura de banda para analisar RRCs com ambiente secundário heterogêneo e sua posterior validação. Conduzimos uma análise formal do desempenho da comunicação secundária, discorrendo sobre diversos cenários (configurações de largura de banda entre classes de usuários) e níveis de carga do UP. Tal exame gerou a apresentação ponderada de uma série de ideias úteis acerca de como diferentes aplicações (com requisitos específicos de largura de banda) podem ser estruturadas na RRC buscando prover bons níveis de QoS à comunicação secundária (em termos das probabilidades de bloqueio e terminação forçada dos USs). Os resultados ilustraram como a configuração de largura de banda e o mecanismo de priorização impactam na comunicação secundária em uma CRN com três camadas sob diferentes cargas de UPs.

O modelo proposto é o mais flexível da literatura atual, uma vez que os trabalhos anteriores não endereçam todas as possibilidades de configurações de largura de banda para os usuários em um único modelo com três camadas de usuários. Consideramos este modelo como um passo importante em direção a um modelo generalista, capaz de suportar um número genérico de classes de prioridades e técnicas de adaptação de recursos, tais como reserva de canais e agregação de portadoras. Consubstanciados nesses resultados, podemos afirmar que seria possível reproduzir o comportamento de padrões como o IEEE 802.11p – que possui quatro categorias de tráfego, separadas por prioridade além de requerer diferentes larguras de banda para cada uma delas (e.g. *Beacons* de sinalização e *streaming* de vídeo).

Referências

Ahmed, W., Gao, J., Suraweera, H. and Faulkner, M. (2009) “Comments on "Analysis of cognitive radio spectrum access with optimal channel reservation”, IEEE Transactions on Wireless Communications, v. 8, n. 9, p. 4488-4491, 2009.

Chu, T., Phan, H. and Zepernick, H. (2014) "Dynamic Spectrum Access for Cognitive Radio Networks With Prioritized Traffics", IEEE Communications Letters, vol. 18, no. 7, pp. 1218-1221, 2014.

Chu, T., Phan, H. and Zepernick, H. (2015) "Channel Reservation for Dynamic Spectrum Access for Cognitive Radio Networks With Prioritized Traffic" in IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW), 2015.

Fitch, M., Nekovee, M., Kawade, S., Briggs, K. and Mackenzie, R. (2011), "Wireless Service Provision in TV White Space with Cognitive Radio Technology: A Telecom Operator's Perspective and Experience", IEEE Communication Magazine, vol. 49, pp. 64-73, 2011.

Jiao, L., Pla, V. and Li, F. (2010) "Analysis on channel bonding/aggregation for multi-channel cognitive radio networks", European Wireless Conference (EW), 2010.

Jiao, L., Li, F. and Pla, V. (2012) "Modeling and Performance Analysis of Channel Assembling in Multichannel Cognitive Radio Networks with Spectrum Adaptation", IEEE Trans. Veh. Technol., v. 61, n. 6, p. 2686-2697, 2012.

Jiao, L., Balapuwaduge, I. A. M., Li, F. Y., Pla, V. (2014) "On the Performance of Channel Assembling and Fragmentation in Cognitive Radio Networks," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol.13, no.10, pp.5661-5675, 2014.

Li, L., Zhang, S., Wang, K. and Zhou, W. (2012) "Combined Channel Aggregation and Fragmentation Strategy in Cognitive Radio Networks," arxiv preprint: http://arxiv.org/pdf/1203.4913v2.pdf, 2012.

Liang, Y-C., Chen, K-C., Li, G.Y.; Mahonen, P. (2011) "Cognitive radio networking and communications: an overview", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.60, no.7, pp.3386-3407, 2011.

Martinez-bauset, J., Pla, V. and Pacheco-paramo, D. (2009) "Comments on "analysis of cognitive radio spectrum access with optimal channel reservation". IEEE Communications Letters, vol. 13, n. 10, 2009.

Wang, J., Gosh, M. and Challapali, K. (2011) "Emerging Cognitive Radio Applications: A Survey", IEEE Communications Magazine, vol 49, pp. 74-81, 2011.

Zhu, X., Shen, L.; Yum, T. (2007) "Analysis of Cognitive Radio Spectrum Access with Optimal Channel Reservation", IEEE Communications Letters, v. 11, n. 4, p. 304-306, 2007.

Apêndice: Erro na Descrição de Transição em [CHU et al. 2014] e [Chu et al. 2015]

Estes artigos apresentam o mesmo erro na transição que adota o número de usuários secundários de maior prioridade (US_1) a serem removidos da rede devido a uma chegada de UP. O erro encontra-se na fórmula para calcular o número de US_1s a serem removidos (j'), dada por $0 \leq j' \leq \lceil (\mathrm{N}*(\mathrm{M}-\mathrm{i}) - \mathrm{j}*\mathrm{N}_1) / \mathrm{N}_1 \rceil$, onde $M*N$ é o número total de canais, N_1 é o número de canais que os SU_1s ocupam e $\lceil . \rceil$ é a função teto. Caso utilizemos o exemplo $M = 2$, $N = 1$, $\mathrm{N}_1 = 1$ (válido segundo os autores), a transição do estado $(1,1,0)$ para o estado $(2,0,0)$ não irá ocorrer, pois diferentemente do esperado onde o cálculo de j' deveria resultar em '1', pela função descrita teremos $0 \leq j' \leq \lceil (1*(2-2) - 0*1) / 1 \rceil$ que resulta em 0, tornando a transição inválida para este exemplo.