

Mapeamento de Redes Virtuais Secundárias em Substrato Sem Fio Baseado em Rádio Cognitivo: Formulação Multi-objetivo e Análise

Andson M. Balieiro^{1,2}, Kelvin L. Dias¹

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

²Universidade de Pernambuco (UPE)- Campus Garanhuns

{amb4, kld}@cin.ufpe.br

Abstract. *Wireless Virtualization (WV) is put forward as a solution to manage the heterogeneous wireless communication environment. Although it provides better resource utilization, the underutilization of resources can still occur when the current approaches are adopted. This problem can be overcome by combining WV with the cognitive radio (CR) technology and dynamic access spectrum (DSA) techniques. Thus, Primary Virtual Networks (PVNs) and Secondary Virtual Networks (SVNs) can be overlaid, where the SVNs access the resources opportunistically. This paper presents the cognitive radio virtual networks environment. It formulates the problem of SVN mapping onto substrate network based on CR and analyzes the related metrics.*

Resumo. *A virtualização sem fio (WV) é vista como uma solução para gerenciar o ambiente de comunicação sem fio heterogêneo. Embora ela proporcione melhor utilização de recursos, a subutilização deles ainda pode ocorrer utilizando as abordagens atuais. Isto pode ser superado através da combinação de WV com rádio cognitivo (CR) e técnicas de acesso dinâmico ao espectro (DSA). Assim, redes virtuais primárias (PVNs) e secundárias (SVNs) podem ser sobrepostas, onde as redes SVNs utilizam os recursos oportunamente. Este artigo apresenta o ambiente de redes virtuais de rádio cognitivo, formula o problema de mapeamento de redes virtuais secundárias (SVN) em redes de substrato (SN) baseadas em CR e analisa as métricas envolvidas.*

1. Introdução

As tecnologias de comunicação móvel estão progredindo rapidamente tal que uma densa e heterogênea rede sem fio é vislumbrada. A demanda por serviços sem fio com diferentes requisitos tem crescido ultimamente, e gerenciar este complexo ecossistema é um desafio. A virtualização sem fio (WV) surge como uma solução eficiente, visto que redes sem fio virtuais (VWNs) de diferentes requisitos podem ser criadas, compartilhando a mesma infraestrutura sem fio e fornecendo serviços diferenciados aos usuários. WV envolve o compartilhamento de infraestrutura e espectro, e introduz novos atores ao modelo de negócio: o operador de rede móvel (MNO) e o provedor de serviço (SP) [Liang 2014].

Para satisfazer a grande demanda por comunicação móvel, o espectro eletromagnético deve ser feito disponível [Akyildiz 2006]. Embora a WV proporcione melhor uso dos recursos, as abordagens atuais para a WV ainda podem causar subutilização deles. Nestas abordagens, o recurso é alocado de forma exclusiva a uma VWN durante o tempo de vida dela. Devido à variação de carga de tráfego nas redes, podem existir casos onde as VWNs não estejam utilizando todos os seus recursos alocados. Esta subutilização pode ter efeito adverso na implantação de novas VWNs e conduzir a perda de receita para o provedor de infraestrutura.

Combinar WV com CR e técnicas de DSA [Akyildiz 2006] pode superar este problema, onde novas VWNs podem ser implantadas através do compartilhamento oportunista de recursos e a virtualização baseada em espectro pode ser alcançada [Liang 2014]. Isto permite ter um ambiente composto por VWNs com diferentes prioridades de acesso ao recurso, Redes Virtuais Primárias (PVNs) e Redes Virtuais Secundárias (SVNs), que são implantadas de forma sobreposta e compartilham a mesma rede de substrato, onde a SVN somente tem acesso ao recurso quando a PVN não o está utilizando. Através da cognição e reconfigurabilidade, o CR possibilita a implantação deste ambiente. Entretanto, novos desafios emergem, desde o mapeamento até a operação dessas redes.

Mapeamento de redes sem fio virtuais em rede de substrato é um problema NP - difícil [Belbekkouche 2012] e envolve reservar e alocar recursos físicos aos elementos que compõe as redes virtuais tais como estações base (BSs) virtuais e canais de comunicação virtuais. Este problema torna-se mais desafiador quando se considera um ambiente formado por PVNs e SVNs, onde o mapeamento de SVN deve considerar não apenas a demanda solicitada em termos de número de usuários (chamados de usuários secundários virtuais - VSUs), por exemplo, de modo a prover bons níveis de QoS aos VSUs, mas também o padrão de uso dos recursos pelos usuários das PVNs (usuários primários virtuais - VPUs) a fim de não causar interferência na comunicação das PVNs.

Desta forma, o mapeamento de SVNs impõe restrições e objetivos que estão relacionadas à comunicação das PVNs e SVNs, bem como ao provedor de infraestrutura, que busca garantir utilização eficiente de recursos. Este mapeamento envolve vários objetivos e uma formulação que leva em conta tal aspecto precisa ser realizada. Além disso, é importante analisar as métricas relacionadas aos objetivos a fim de entender quais parâmetros impactam neles, bem como quais objetivos são conflitantes entre si. Para o melhor do nosso conhecimento, este é o primeiro estudo a: formular o problema de mapeamento de SVNs em redes de substrato como um problema multi-objetivo; definir o ambiente de redes virtuais de rádio cognitivo; analisar a influência de importantes parâmetros/métricas sobre outras métricas de modo a prover uma valiosa assistência no projeto de esquemas para resolver o problema proposto.

Este artigo está assim organizado. A Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados. O ambiente de redes virtuais de rádio cognitivo é descrito na Seção 3. Métricas e o problema multi-objetivo de mapeamento de SVNs em rede de substrato são formuladas na Seção 4. Seção 5 conduz uma análise de influência de parâmetros/métricas sobre outras. Seção 6 conclui este artigo.

2. Trabalhos Relacionados

Vários estudos têm sido propostos para virtualização de redes em ambos os ambientes cabeados [Zhang 2012] e sem fio [Zaki 2010]. Em relação WV, alguns trabalhos adotam: uma tecnologia específica [Zaki 2010][Banchs 2012]; uma abordagem genérica, sem especificar qualquer tecnologia adotada na rede de substrato [Fu 2010]; ou cenários com redes sem fio heterogêneas [Caeiro 2012]. Estes estudos consideram que o recurso alocado a uma rede virtual não pode ser alocado a outra, mesmo se a primeira não o está utilizando. Esta restrição pode causar a subutilização de recursos em períodos de baixa carga de tráfego.

Nesta direção, em [Zhang 2012] o problema de mapeamento de redes virtuais em redes de substrato cabeadas, baseado no compartilhamento oportunista de recursos, é apresentado. Os autores consideram a carga de trabalho das redes virtuais formada por uma subcarga básica, que sempre existe, e uma variável, que ocorre com uma dada probabilidade. Assim, múltiplos tráfegos variáveis de diferentes redes virtuais compartilham algum recurso em comum de modo a alcançar uma melhor utilização de recursos. Entretanto, este compartilhamento pode ocasionar colisão/interferência entre tráfegos variáveis de diferentes redes virtuais.

Em [Yang 2013] os autores transferem a formulação de [Zhang 2012] para o ambiente sem fio. Como em [Zhang 2012], em [Yang 2013] os autores consideram os recursos como sendo homogêneos em termos de largura de banda oferecida. Entretanto, isto não engloba cenários com redes heterogêneas (ex. WiMax, WiFi e LTE), onde diferentes tecnologias possuem unidades de recursos distintos e diferentes taxas de dados [Wang 2013]. Além disso, mesmo com uma única tecnologia de rede, fator tal como o ruído pode impactar na taxa de dados alcançada em um canal de comunicação [Chena 2011]. Diferente de nossa proposta, em [Zhang 2012] e [Yang 2013], as redes virtuais possuem o mesmo nível, direito de acesso ao recurso, com nenhuma distinção entre rede/usuário virtual primária (maior prioridade) e rede/usuário virtual secundária (menor prioridade). Em vista disso, elas não incluem estes dois elementos do ambiente de CR: as redes/usuários secundárias e a primárias. Além disso, em cenários formados por redes com diferentes prioridades de acesso aos recursos, existem outros fatores que afetam a comunicação dos usuários e que devem ser considerados no mapeamento de redes virtuais, tais como as probabilidades de bloqueio de usuários secundários e *handover* de usuários secundários, que são negligenciados em ambos os estudos.

Uma plataforma de virtualização de rede fim-a-fim é proposta em [Nakauchi 2011]. Ela busca criar redes virtuais com recursos cabeados e sem fio e usa CR para gerenciar a WV. Entretanto, os autores abordam somente a conexão transparente das redes de acesso sem fio com a rede cabeada. Eles não formulam o problema de mapeamento de redes virtuais em rede de substrato, nem analisam as importantes métricas/objetivos envolvidas.

Em [Xin 2012] os autores adotam uma abordagem denotada como acesso ao espectro dinâmico como um serviço para alcançar DSA. Esta abordagem dinamicamente oferece serviço de espectro aos usuários. Eles adotam alocação de espectro dinâmica para DSA, que não distingue entre PUs e SUs. Assim, cada usuário tem uma banda de espectro para uso exclusivo durante um período. Este tipo de alocação pode causar subutilização de espectro, quando a carga de tráfego é baixa. Além disso, a artigo

considera somente demandas homogêneas (todas as redes virtuais possuindo a mesma demanda espectro), o que não é sempre verdade em cenários reais.

Diferente de [Xin 2012], nosso trabalho adota a abordagem de acesso oportunista ao espectro (OSA) para DSA, onde a diferença entre usuários primários e secundários é estabelecida. Em OSA, os SUs buscam e acessam dinamicamente as bandas de espectro de forma oportunista através do sensoriamento de espectro ou banco de dados de espectro [Min 2011]. Neste aspecto, no mapeamento de SVNs, consideramos a existência de VPNs, que tem recursos alocados as SVNs e maior prioridade de acesso a eles. Além disso, demandas heterogêneas são levadas em conta na nossa formulação.

Nota-se na literatura que o mapeamento de redes fio virtuais tem sido bastante estudado, bem como as formas de acesso oportunistas em redes não virtualizadas. Porém, quando se considera esses dois elementos no mapeamento de redes virtuais, não há trabalho com formulação similar a apresentada neste artigo.

3. O Ambiente de Redes Virtuais de Rádio Cognitivo

O ambiente de redes virtuais de radio cognitivo é formado por três tipos de redes sem fio: rede de substrato/infraestrutura, redes primárias virtuais (PVNs) e redes secundárias virtuais (SVNs). Elas estão representadas na Fig.1, com cada tipo em uma camada específica. A camada física engloba as redes de substrato, que consiste de canais/bandas de espectro, estações-base, servidores e outros equipamentos que compõe a infraestrutura do ambiente sem fio. As redes de substrato são usadas na instanciação de ambas as redes virtuais (PVNs e SVNs). Em arquiteturas como a proposta em [Nakauchi 2011], o provedor de infraestrutura é responsável por gerenciar os recursos físicos.

As PVNs têm maior prioridade de acesso aos recursos do que as SVNs. O mapeamento de PVN é realizado sem considerar a existência de SVNs, de forma usual [Fu 2010]. Assim, os recursos são alocados para cada PVNs exclusivamente. Como a carga de tráfego das PVNs varia ao longo do tempo, podem existir casos onde as PVNs não estão utilizando todos os seus recursos. Diante desses períodos, as SVNs podem ser implantadas para utilizar os recursos subutilizados oportunistamente.

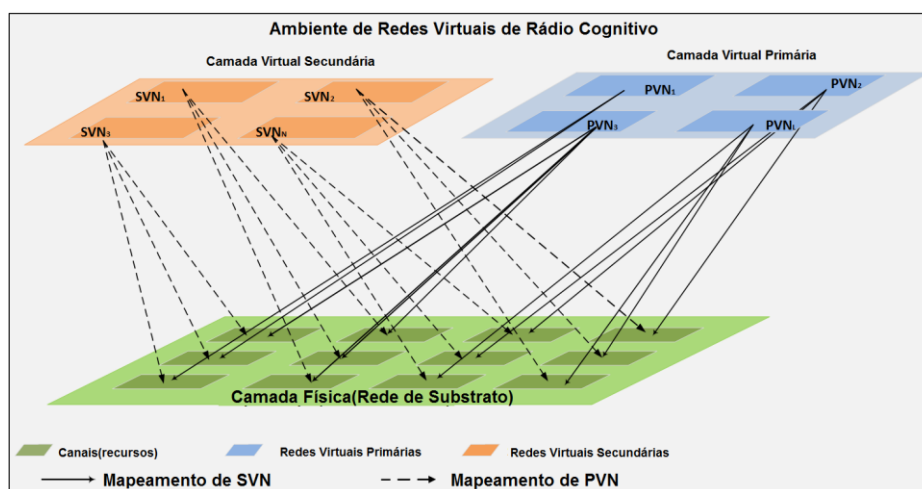


Figura 1 Ambiente de redes virtuais de rádio cognitivo

A adoção das SVNs pode proporcionar melhor utilização de recursos (ex. espectro) e aumentar a receita do provedor de infraestrutura, uma vez que mais redes virtuais podem ser admitidas. Entretanto, para prover acesso oportunista, os usuários das SVNs devem identificar a atividade dos VPUs e somente acessar os recursos na ausência deles. Neste aspecto, o CR é uma tecnologia essencial para a implantação das SVNs, devido as suas capacidades de cognição e reconfiguração [Akyildiz 2006]. Em um ambiente formado por PVNs e SVNs, o mapeamento das redes virtuais torna-se mais complexo, uma vez que o mapeamento de SVNs deve considerar tanto a demanda requisitada pela SVN quanto a atividade dos usuários das PVNs.

4. Modelagem do Mapeamento de SVNs em Redes de Substrato Sem Fio

Em um ambiente de redes virtuais de rádio cognitivo, o provedor de serviço solicita e gerencia L PVNs [Liang 2014]. Dado que a rede de substrato é composta por M canais e que os recursos são divididos entre as PVNs segundo a porcentagem q_j , com

$j=1,2,3,\dots,L$, $0 \leq q_j \leq 1$, $\sum_{j=1}^L q_j = 1$ e Q_j sendo o conjunto de canais alocados a PVN

j , com $|Q_j| = \lfloor M \cdot q_j \rfloor$ ou $\lceil M \cdot q_j \rceil$ canais, onde, $\lceil x \rceil$ e $\lfloor x \rfloor$ são as funções piso e teto, respectivamente. Dado que a chegada de VPUs no canal i (C_i) da rede virtual j , com

$C_i \in Q_j$, segue um processo de Poisson com taxa de chegada $\lambda_{i,j}^{PU}$, e o tempo de permanência do usuário é dado por uma distribuição exponencial com média $\frac{1}{\mu_{i,j}^{PU}}$, a

utilização do canal i é dada pela Eq. 1 [Bolch 2006]. Um ambiente com acesso oportunista (pelos VSUs) aos canais é obtido pela adoção do critério de estabilidade $\rho_{i,j}^{PU} < 1$.

$$\rho_{i,j}^{PU} = \left(\frac{\lambda_{i,j}^{PU}}{\mu_{i,j}^{PU}} \right) \quad (1)$$

Nesta abordagem, similarmente a [Akter 2008], nós abstraímos a existência de vários VPUS no mesmo canal. Assim, cada canal é ocupado por um VPU por vez. Esta consideração é válida em sistemas cujo mecanismo de acesso é baseado em divisão de frequência/tempo, por exemplo. Assim, a probabilidade do canal estar ocupado pelo VPU (em estado ON) é dada pela sua utilização (Eq.1). A probabilidade do canal não estar ocupado pelo VPU (estado OFF) é dada pela Eq. 2.

$$POFF_{i,j} = (1 - \rho_{i,j}^{PU}) \quad (2)$$

O número médio de canais em estado OFF na rede virtual j é dado pela Eq.3.

$$E[NCh_j^{OFF}] = \sum_{n=1}^{|Q_j|} n \cdot P[NCh_j^{OFF} = n] \quad (3)$$

Onde $P[NCh_j^{OFF} = n]$ é a probabilidade de n canais estarem OFF na rede virtual j . Sendo $A_{d,n,j}$ a partição d com n elementos do conjunto Q_j , com $d=1,2,3,\dots,s$,

onde s é o número de partições com n elementos do conjunto Q_j , dado por $s = \binom{|Q_j|}{n}$,

o valor de $P[NCh_j^{OFF} = n]$ pode ser dado pela Eq.4. De forma similar, a probabilidade de que existam n VPU na rede virtual j é dada pela Eq. 5.

$$P[NCh_j^{OFF} = n] = \sum_{d=1}^s \left[\prod_{i \in A_{d,n,j}} POFF_{i,j} \cdot \prod_{h \in \{Q_j - A_{d,n,j}\}} [1 - POFF_{h,j}] \right] \quad (4)$$

$$P[NPU_j = n] = \sum_{d=1}^s \left[\prod_{i \in A_{d,n,j}} \rho_{i,j}^{PU} \cdot \prod_{h \in \{Q_j - A_{d,n,j}\}} [POFF_{h,j}] \right] \quad (5)$$

O ambiente de comunicação sem fio é influenciado por fatores, tais como ruídos provenientes de outras fontes. Estes fatores afetam a força do sinal percebido no receptor. Assim, para denotar as condições do canal primário, considera-se que a relação sinal ruído no canal i da rede virtual j , $SNR(db)_{i,j}$, é dada por uma distribuição

exponencial com média $\frac{1}{\lambda_{i,j}^{SNR(db)}}$ dB [Choudhury 2007]. Assim, a capacidade máxima

(em bps) do canal i alocado a rede virtual j , denotada como $R_{i,j}$, dada pela Lei de Shannon [Shannon 2011], é expressa na Eq.6, onde $Bw_{i,j}$ é a largura de banda do canal (em Hertz).

$$R_{i,j} = Bw_{i,j} \cdot \log_2(1 + SNR_{i,j}) \quad (6)$$

O valor da $SNR_{i,j}$ usando escala decimal obtida daquela em decibéis (dB) é dada por $SNR_{i,j} = 10^{\frac{SNR(db)_{i,j}}{10}}$, e a capacidade media alcançada no canal i da rede virtual j ($\overline{R_{i,j}}$) é dada pela Eq. 7.

$$\overline{R_{i,j}} = E[R_{i,j}] = E[Bw_{i,j} \cdot \log_2(1 + (SNR_{i,j}))] \quad (7)$$

A Eq.7 representa a capacidade média do canal quando ele está sempre disponível para uso pelo usuário. Quando o usuário é o VSU, isto não ocorre devido ao uso oportunista. Assim, dada a Eq.8 e a probabilidade do canal estar em estado OFF (Eq.2), a taxa efetiva média alcançada pelo VSU é dada pela Eq. 8.

$$\overline{Re_{i,j}} = POFF_{i,j} \cdot \overline{R_{i,j}} \quad (8)$$

No mapeamento de redes virtuais, não há um relacionamento um-para-um entre PVNs e SVNs e vice-versa. Assim, canais alocados a diferentes PVNs podem ser usados pela mesma SVN, como mostrado na Fig. 1, onde a SVN #3 utiliza os canais alocados as PVN #1 e PVN #3, por exemplo, o que fornece maior possibilidade de mapeamento para as SVNs. Isto é diferente de [Lai 2011] e [Wang 2009], que adotam uma abordagem que restringe ao relacionamento unívoco entre PVNs e SVNs. Deste modo, adota-se o nível de granularidade de canal é adotado para informação da atividade primária.

Consideram-se existem N SVN_{*l*} a serem mapeadas. Para cada SVN *l* (SVN_{*l*}), a largura de banda requisitada pelos VSUs é dada por uma distribuição exponencial com média $1/w_l$ bps. A chegada de VSUs na SVN_{*l*} segue um processo de Poisson com taxa de λ_l^{SU} usuários por segundos. O tempo de serviço do VSU é exponencialmente distribuído com média $1/\mu_l^{SU}$ segundos [Zhao 2011]. Assim, o número médio de VSUs na SVN_{*l*}, e o total de recursos requisitados são dados pelas Eq. 9 e Eq.10.

$$\overline{NSU}_l = \lambda_l^{SU} \cdot \frac{1}{\mu_l^{SU}} \quad (9)$$

$$\overline{Bw}_{req,l} = \lambda_l^{SU} \cdot \frac{1}{\mu_l^{SU}} \cdot \frac{1}{w_l} = \overline{NSU}_l \cdot \frac{1}{w_l} \quad (10)$$

4.1. Formulação para a Probabilidade de Colisão

No mapeamento de SVN_{*l*}, como os canais adotados são compartilhados com as PVNs, é necessário garantir que o nível de interferência causada na PVNs não ultrapasse um limite definido. Este limite pode ser baseado em acordo/especificação em nível de serviço (SLA/SLS) das PVNs ou no nível de interferência que pode ser tolerado pelo sinal do VPU, por exemplo. Assim, na seleção dos canais alocados a cada SVN, a interferência/colisão entre VPU e VSU deve ser calculada para garantir que não ultrapasse o limiar definido.

Dado que o mapeamento da SVN_{*l*} adotou o conjunto de canais $SC_l = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$, onde $|SC_l| = n_l$, $SC_l \subset \bigcup_{j=1}^L Q_j$, e $SC_l \cap SC_u = \emptyset$, para todo $l \neq u$, com $l, u = 1, 2, 3, \dots, N$ sendo identificadores de SVN_{*l*}. No mapeamento de redes virtuais (secundária ou primária), quando cada usuário necessita de somente um canal para realizar a sua comunicação, uma colisão entre VPU e VSU na SVN_{*l*} pode ocorrer quando o número de VPUs e VSUs que tentam acessar os canais simultaneamente é maior que o número de canais alocados a SVN_{*l*}, com pelo menos um VPU e um VSU entre os usuários. Assim, a probabilidade de colisão é dada pela Eq.11.

$$P_{C_l}(SC_l) = \sum_{i=1}^{n_l} (P[NPU_l = i ; NSU_l > n_l - i]) \quad (11)$$

Onde $P[NPU_l = i ; NSU_l > n_l - i]$ é a probabilidade que no conjunto de canais SC_l , o número de VPUs acessando ou tentando acessar os canais é i o número de VSUs é maior do que $n_l - i$. Como a chegada e tentativa de acesso dos usuários ocorre independente de cada outro, $P[NPU_l = i ; NSU_l > n_l - i]$ pode ser obtida do produto entre $P[NPU_l = i]$ e $P[NSU_l > n_l - i]$, que são dadas pelas Eq.5 e Eq.12.

$$P[NSU_l > n_l - i] = 1 - \left(\sum_{k=0}^{n_l - 1} P[NSU_l = k] \right) \quad (12)$$

Onde

$$P[NSU_l = k] = \frac{\left(\lambda_l^{SU} \cdot \frac{1}{\mu_l^{SU}}\right)^k e^{-\left(\lambda_l^{SU} \cdot \frac{1}{\mu_l^{SU}}\right)}}{k!} \quad (13)$$

Entretanto, nesta formulação, a condição de que cada usuário necessita somente de um canal para atender sua demanda não se aplica ao VSU, apenas ao VPU. Como a largura de banda requisitada pelo VSU pode ser maior do que a capacidade média de um canal, quando o VSU tenta acessar mais do que um canal na SVN, ele pode colidir com mais do que um VPU. Dessa forma, a probabilidade de colisão é dada pela Eq.14.

$$Pc_l(SC_l) = \sum_{i=1}^n \left(P \left[NPU_l = i ; NSU_l > \left\lfloor \frac{n_l - i}{ChSU_l} \right\rfloor \right] \right) \quad (14)$$

Onde $ChSU_l$ é o número médio de canais requisitado para atender a demanda de cada VSU na SVN_l , que é dado pela Eq.15, $\lfloor \cdot \rfloor$ é a função piso e $\overline{Rch_l}$ é a capacidade média efetiva dos canais da SVN_l dada pela Eq.16. A probabilidade de colisão média com N SVN's mapeadas é dada pela Eq. 17.

$$ChSU_l = \max \left(1, \frac{1/w_l}{\overline{Rch_l}} \right) \quad (15)$$

$$\overline{Rch_l} = \frac{\sum_{i=1}^{n_l} Re_{i,l}}{n_l} \quad (16)$$

$$\overline{Pc} = \frac{\sum_{l=1}^N Pc_l}{N} \quad (17)$$

4.2. Formulação para a Probabilidade de Bloqueio

Assim como restringir a colisão no VPU, o mapeamento de SVN's deve prover bons níveis de QoS para o VSU. Ele deve admitir o máximo possível de VSUs dimensionados para cada SVN. Assim, a probabilidade de bloqueio de VSU deve ser determinada no processo de mapeamento. O bloqueio de VSU ocorre na SVN_l quando o número total de VPUs com o número médio de canais requisitados pelos VSUs é maior do que o número de canais alocados a SVN_l e sua probabilidade é dada pela Eq. 18.

$$Pb_l^{SU}(SC_l) = \sum_{i=0}^n \left(P[NPU_l = i ; NSU_l > \left\lfloor \frac{n_l - i}{ChSU_l} \right\rfloor] \right) \quad (18)$$

Com N SVN's mapeadas, a probabilidade bloqueio média é dada na Eq.19.

$$\overline{Pb}^{SU} = \frac{\sum_{l=1}^N Pb_l^{SU}}{N} \quad (19)$$

4.3. Formulação para a Utilização Conjunta

Prover melhor utilização de recurso é também um objetivo do mapeamento de SVN. Para definir a utilização de recursos alcançada no mapeamento, as atividades das PVNs e SVNs devem ser consideradas. Assim, dado o conjunto de n_l canais adotado no mapeamento da SVN_l , a utilização conjunta (primária e secundária) dos canais é dada pela Eq.20. Onde \overline{NPU}_l é o número médio de VPUs nos canais, dado pela Eq. 21.

$$util_l = \frac{\overline{NPU}_l + (1 - Pb_l^{SU}) \cdot \overline{NSU}_l \cdot ChSU_l}{n_l} \quad (20)$$

$$\overline{NPU}_l = n_l - E[NCh_l^{OFF}] \quad (21)$$

O produto $(1 - Pb_l^{SU}) \cdot \overline{NSU}_l$ denota o número médio de VSUs admitidos na SVN_l , onde \overline{NSU}_l é dado pela Eq. 9, e Pb_l^{SU} pela Eq. 18. Com N SVNs mapeadas, a utilização conjunta é dada pela Eq.22.

$$\overline{util} = \frac{\sum_{l=1}^N util_l}{N} \quad (22)$$

4.4. Formulação para a Probabilidade de Handover de SVN

A probabilidade de bloqueio de VSU indica o nível de rejeição de novos VSUs na SVN. Uma vez que eles são admitidos, alguns eventos desecandeados pela atividade primária podem afetar as suas comunicações. Entre estes eventos, o *handover* de SVN é destacado. Ele acontece quando o VSU vaga canal que ocupa devido ao retorno do VPU e seleciona um canal em outra SVN para retomar a sua comunicação, visto que não existe canal disponível na sua rede atual. O handover de SVN causa degradação na comunicação secundária [Lai 2011].

A probabilidade de handover do VSU oriundo da SVN_l pode ser obtida pela razão entre o número de tentativas de *handover* com sucesso (aqueles que encontraram recursos disponíveis em outra SVN) e o número de VSU admitidos na SVN_l . O número de VSUs admitidos na SVN_l (NAd_l^{SU}) é dado pela Eq. 23. O número de tentativas de *handover* de SVN (NHA_l) é dada pela Eq.24.

$$NAd_l^{SU} = (1 - Pb_l^{SU}) \lambda_l^{SU} \cdot \frac{1}{\mu_l^{SU}} \quad (23)$$

$$NHA_l(SC_l) = PcAd_l \cdot NAd_l^{SU} = PcAd_l \cdot (1 - Pb_l^{SU}) \lambda_l^{SU} \cdot \frac{1}{\mu_l^{SU}} \quad (24)$$

Onde $PcAd_l$ é a probabilidade de colisão entre os VSUs admitidos na SVN_l e os VPUs, que pode ser obtida de forma similar a Eq. 14, onde $P[NSU_l = k]$, dada na Eq.13, é alterada para a Eq. 25.

$$P[NSU_l = k] = \frac{\left((1 - Pb_l^{SU}) \cdot \lambda_l^{SU} \cdot \frac{1}{\mu_l^{SU}} \right)^k e^{-\left((1 - Pb_l^{SU}) \cdot \lambda_l^{SU} \cdot \frac{1}{\mu_l^{SU}} \right)}}{k!} \quad (25)$$

A probabilidade de tentativa de *handover* dos VSUs da SVN_l é dada pela Eq.26.

$$P_{HA,l}(SC_l) = \frac{NHA_l}{NAd_l^{SU}} = PcAd_l \quad (26)$$

O número de número de *handovers* com sucesso depende da quantidade de recursos disponíveis nas outras redes. Dado que existam (em média) R recursos disponíveis, o número de *handovers* de SVN com sucesso é dado pela Eq. 27.

$$NH_l = \frac{\text{Min}(NHA_l \cdot ChSU_l^*, R)}{ChSU_l^*} \quad (27)$$

Onde $ChSU_l^*$ é o número médio de canais necessários para continuar a comunicação de cada VSU que tenta realizar o *handover* da SVN_l , obtido de forma similar a Eq. 15, considerando a capacidade média efetiva dos canais alocados as outras SVNs (exceto a SVN_l) como denominador. O valor de R é dado pela Eq. 28.

$$R = \max\left(0, \sum_{j=1, j \neq l}^N \left[n_j - \left(\overline{NPU}_j + (1 - Pb_j^{SU}) \cdot \overline{NSU}_j \cdot ChSU_j \right) \right] \right) \quad (28)$$

Considerando os VSUs admitidos na SVN_l , a probabilidade de *handover* de SVN é dada pela Eq. 29. Com N SVNs, a probabilidade média de *handover* de SVN é dada pela Eq. 30.

$$P_{handover,l} = \frac{NH_l}{NAd_l^{SU}} \quad (29)$$

$$\overline{P}_{handover} = \frac{\sum_{l=1}^N P_{handover,l}}{N} \quad (30)$$

4.5. O Problema Multi-Objetivo de Mapeamento de SVNs

Como apresentado nas seções anteriores, vários objetivos estão envolvidos no mapeamento de SVNs. Quando a influência de cada um deles é considerada, o seguinte problema de otimização pode ser formulado (ver Eq. 31). Dado um conjunto de N SVNs e o padrão de uso primário dos canais, realizar o mapeamento das SVNs em substrato físico de modo a minimizar o *handover* entre SVNs e o bloqueio de VSUs e maximizar a utilização conjunta. Três restrições devem ser satisfeitas: a probabilidade de colisão deve estar abaixo de um dado limiar, o montante de recursos alocados a cada SVN não pode ser menor do que o requisitado e um recurso comum não pode ser alocado à diferentes SVNs. Em notação, tem-se:

$$\begin{aligned}
& \text{Minimize } \overline{P_{handover}}, \overline{Pb^{SU}} \text{ and Maximize } \overline{util} \\
& \text{Sujeito a :} \\
& \left\{ \begin{array}{l} P_{c_l} < thr_{collision}, \quad l = 1, 2, 3, \dots, N \\ Ralloc_l \geq \overline{Bw_{req,l}}, \quad l = 1, 2, 3, \dots, N \\ SC_l \cap SC_u = \emptyset, \quad l \neq u, \quad l, u = 1, 2, 3, \dots, N \end{array} \right. \quad (31)
\end{aligned}$$

5. Análise do Mapeamento de Redes Virtuais Secundárias

As restrições e objetivos no problema de mapeamento de SVN descritos na seção anterior, como a demanda requisitada pela SVN, o limite de colisão, redução do bloqueio de VSU e *handover* de SVN e maximização da utilização conjunta de recursos estão relacionados à comunicação primária, secundária ou ao provedor de infraestrutura. Alcançar todos estes objetivos simultaneamente é um processo desafiador, porque alguns são conflitantes entre si e o mapeamento com foco em um pode deteriorar os outros. Nesta seção a análise de métricas relacionadas aos objetivos é conduzida através da variação de importantes parâmetros.

A utilização primária dos canais é um importante parâmetro que deve ser considerado no mapeamento de SVN, uma vez que ele afeta diretamente métricas como as probabilidades de colisão, bloqueio de VSU e utilização conjunta.

A Fig. 2 considera o número de canais alocados a SVN, a taxa de chegada e tempo médio de serviço do VSU fixos e mostra o comportamento das probabilidades de colisão, bloqueio de VSU e utilização conjunta quando a utilização primária dos canais alocados a SVN varia. Baixas probabilidades de bloqueio de VSU e colisão podem ser alcançadas selecionando canais com baixa utilização primária para mapear a SVN. Entretanto, selecionar canais com baixa utilização primária pode reduzir a utilização conjunta de recursos, mesmo que uma alta taxa de admissão de VSUs seja alcançada, que é inferida pela baixa probabilidade de bloqueio de VSU e alta utilização secundária de recursos. Por outro lado, quando canais com alta utilização primária são selecionados, melhor utilização conjunta é alcançada (ver Fig. 2). Mas, isto pode causar um aumento no bloqueio de VSUs e na colisão, que afeta as PVNs e SVNs.

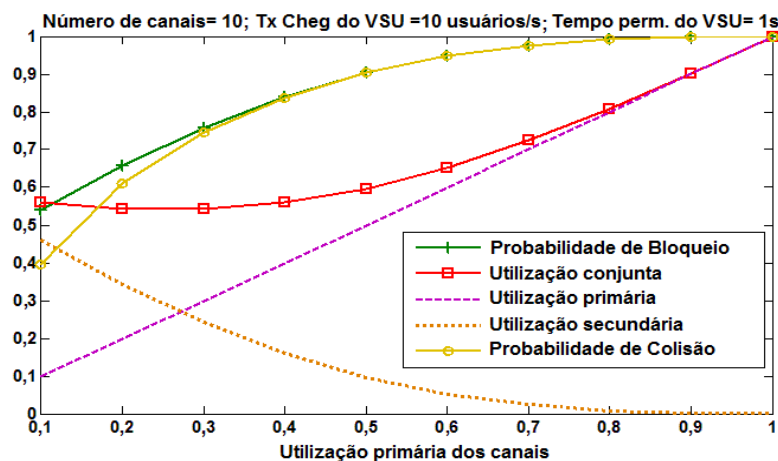


Figura 2. Influência da utilização primária no mapeamento de SVN

Embora exista um aumento na utilização conjunta quando canais com alta utilização primária são selecionados, a utilização provida pelos VSUs decresce até alcançar um valor nulo, o que significa que não há possibilidade de acesso oportunista (ver Fig. 2). Assim, no mapeamento de SVN é importante balancear a seleção de canais para alcançar um bom compromisso entre a colisão, bloqueio e utilização conjunta.

A Fig. 3 ilustra os resultados das probabilidades de colisão, bloqueio de VSU e tentativa de *handover* e utilização conjunta, quando o número de canais adotados no mapeamento da SVN varia e a utilização primária, taxa de chegada, tempo médio de serviço do VSU são fixos. Nota-se que as probabilidades de colisão e bloqueio de VSU decrescem quando o número de canais alocados aumenta. Isto indica que existe menor interferência na comunicação do VPU e poucos VSUs são rejeitados na SVN, que são fatores positivos. Além disso, com mais canais, em geral, existem mais recursos para atender a demanda dos VSUs, o que reduz a chance de acontecer *handover* de SVN. Entretanto, aumentar o número de canais a partir de um dado ponto (14 canais), usualmente conduz a uma redução na utilização conjunta, como ilustrado na Fig. 3, porque, apesar da baixa taxa de bloqueio de VSU na SVN, o montante de recursos alocados a SVN é muito maior do que a demanda a ser atendida. Por outro lado, caso um número reduzido seja adotado, a utilização conjunta aumenta, o que é um fator positivo. Entretanto, a colisão e o bloqueio de VSU também aumentam, o que é um fator negativo.

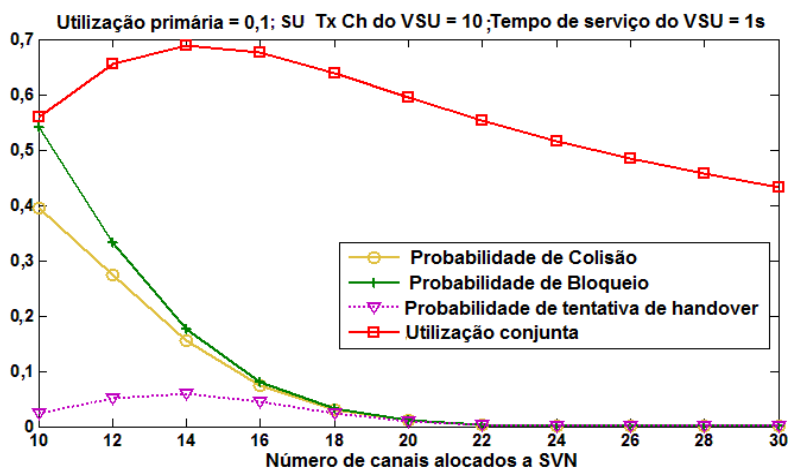


Figura 3. Análise da variação do número de canais alocados a SVN

É importante notar (Fig. 3) o comportamento da tentativa de *handover* de SVN (que compõe a probabilidade de *handover* de SVN) quando o número de canais varia em uma dada faixa (entre 10 e 14). Nesta faixa, quando o número de canais aumenta, a utilização conjunta e a probabilidade de tentativa de *handover* também aumentam. Na utilização conjunta, com mais canais, mais VSUs são admitidos e o numerador da Eq. 20 cresceu mais do que o denominador. A maior admissão de VSUs aumentou a taxa de ocupação da SVN, ocasionando maior possibilidade do VSU comutar de SVN.

Nota-se que probabilidade de bloqueio do VSU tem um impacto na tentativa de *handover* e utilização conjunta. Assim, a Fig.4 ilustra o comportamento destas duas métricas quando diferentes valores para a probabilidade de bloqueio de VSU são definidos. O aumento do bloqueio de VSU provoca redução na utilização conjunta e na

tentativa de *handover*, pois poucos VSUs são admitidos na SVN. Dessa forma, a influência do bloqueio deve ser considerada no processo de mapeamento de SVNs.

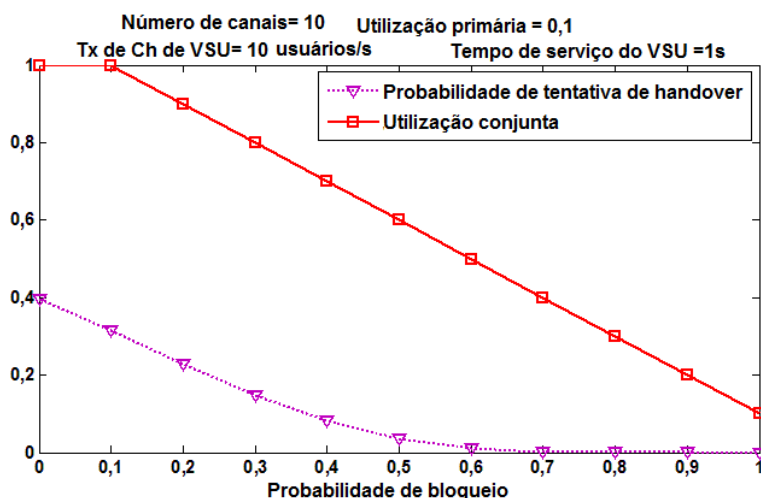


Figura 4. Influência da probabilidade de bloqueio

6. Conclusão e Direções Futuras

Neste artigo destacamos a combinação de rádio cognitivo, técnicas de DAS e virtualização sem fio no mapeamento de redes sem fio virtuais, possibilitando que redes virtuais com diferentes prioridades de acesso ao recurso coexistam. Vimos que mapeamento de SVNs é um problema desafiador com objetivos relacionados ao VPU, VSU e provedor de infraestrutura, onde uma análise de influência de parâmetros/métricas sobre métricas/objetivos foi conduzida. Ela buscou prover subsídios para a elaboração de esquemas para resolver o problema proposto.

Trabalhos futuros incluem o desenvolvimento de esquema para resolver o problema proposto (ex. baseados em inteligência artificial) e a avaliá-lo em termos das métricas aqui formuladas.

Referências

- Akter, L., Natarajan, B., Scoglio, C.(2008) “Modeling and Forecasting Secondary User Activity in Cognitive Radio Networks”, Proceedings of 17th International Conference on Computer Comm. and Networks (ICCCN), pp. 1-6.
- Akyildiz, I. F. et al. (2006) “Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey”, Elsevier Computer Networks (50).
- Banchs, A. et al. (2012) “Providing Throughput and Fairness Guarantees in Virtualized WLANs Through Control Theory”, Springer Mobile Networks and Applications, vol.17, issue 4, pp 435-446.
- Belbakkouche, A., Hasan, M. M., Karmouch, A.(2012) “Resource Discovery and Allocation in Network Virtualization”, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol.14, Issue 4, pp.1114-1128.
- Bolch, G. et al. (2006) “Queueing Networks and Markov Chains”, Second Edition, Wesley.

- Caeiro, L., Cardoso, F. D., Correia, L. M.(2012) “Adaptive allocation of Virtual Radio Resources over heterogeneous wireless networks”, 18th European Wireless Conference (European Wireless).
- Chen, Y.-S. et al. (2011) “A Cross-Layer Protocol of Spectrum Mobility and Handover in Cognitive LTE Networks”, Elsevier Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 19, issue 8, pp.1723–1744.
- Choudhury, S., Gibson, J. D. (2007) “Information Transmission Over Fading Channels”, IEEE Global Telecom. Conf. (GLOBECOM), pp. 3316-3321.
- Fu, F., Kozat, U. C. (2010) “Wireless Network Virtualization as A Sequential Auction Game”, Proceedings of IEEE INFOCOM.
- Lai, J. et al. (2011) “Network Selection in Cooperative Cognitive Radio Networks”, 11th International Symposium on Comm. and Information Technologies.
- Liang, C., Yu, F. R. (2014) “Wireless Network Virtualization: A Survey, Some Research Issues and Challenges”, IEEE Communications Survey and Tutorials.
- Min, A.W. et al. (2011), "Opportunistic spectrum access for mobile cognitive radios", Proceedings of IEEE INFOCOM, pp. 2993-3001.
- Nakauchi, K. et al. (2011) “AMPHIBIA: A Cognitive Virtualization Platform for End-to-End Slicing”, IEEE International Conference on Communications (ICC).
- Shannon, C.E.,(2001) “A Mathematical Theory of Communication”, Association for Computing Machinery, Vol. 5, No. 1, pp. 3-55.
- Wang, C. et al. (2009) “Network Selection in Cognitive Radio Systems”, IEEE Global Telecommunications Conference, (GLOBECOM).
- Wang, X., Krishnamurthy, P., Tipper, D. (2013) “Wireless Network Virtualization”, International Conf. on Computing, Networking and Comm.
- Xin, C., Song, M.(2012) “Dynamic Spectrum Access as a Service”, Proceedings IEEE INFOCOM.
- Yang, M. et al. (2013) “Opportunistic Spectrum Sharing Based Resource Allocation for Wireless Virtualization”, Seventh International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing (IMIS).
- Zaki, Y. et al.(2010) “LTE wireless virtualization and spectrum management”, Third Joint IFIP Wireless and Mobile Networking Conference.
- Zhang, S. et al. (2012) “An Opportunistic Resource Sharing and Topology-Aware mapping framework for virtual networks”, Proceedings of IEEE INFOCOM.
- Zhao, L. et al. (2011) “LTE Virtualization: from Theoretical Gain to Practical Solution”, 23rd International Teletraffic Congress (ITC).