

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO

MARCELO CAGGIANI LUIZELLI

**Uma Abordagem baseada em Aspectos
Topológicos para Expansão de Redes
Físicas no contexto de Virtualização de
Redes**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para a obtenção do grau de
Mestre em Ciência da Computação

Prof. Dr. Luciano Paschoal Gasparry
Orientador

Porto Alegre, fevereiro de 2014

CIP – CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO

Luizelli, Marcelo Caggiani

Uma Abordagem baseada em Aspectos Topológicos para Expansão de Redes Físicas no contexto de Virtualização de Redes / Marcelo Caggiani Luizelli. – Porto Alegre: PPGC da UFRGS, 2014.

103 f.: il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Computação, Porto Alegre, BR–RS, 2014. Orientador: Luciano Paschoal Gasparly.

1. Virtualização de redes. 2. Problema de mapeamento de redes virtuais. 3. Internet do futuro. 4. Planejamento de capacidade. I. Gasparly, Luciano Paschoal. II. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Prof. Carlos Alexandre Netto

Vice-Reitor: Prof. Rui Vicente Oppermann

Pró-Reitor de Pós-Graduação: Prof. Vladimir Pinheiro do Nascimento

Diretor do Instituto de Informática: Prof. Prof. Luís da Cunha Lamb

Coordenador do PPGC: Prof. Luigi Carro

Bibliotecário-chefe do Instituto de Informática: Alexander Borges Ribeiro

*“Do not pray for tasks equal to your powers;
pray for powers equal to your tasks.
Then the doing of your work shall be no miracle,
but you shall be the miracle.”*

— PHILLIPS BROOKS

AGRADECIMENTOS

A Deus. Agradeço pela oportunidade de crescimento pessoal e intelectual.

À minha família. Agradeço por todo o suporte e condições necessárias para concluir mais esta etapa da minha vida. Meus pais, Paulo Renato e Maria Ester, meus irmãos, Rafael e Paola, obrigado pelo carinho, compreensão, incentivo e, acima de tudo, pelo exemplo de família e união que representam. Eu sei o quanto é difícil conviver com a distância de vocês. Ao meu amor, Fernanda, agradeço por ser, acima de tudo, a minha eterna companheira de todas as horas. Obrigado por todo o carinho, compreensão, incentivo e paciência durante este período de dois anos. Eu sei que não foi nada fácil. Agradeço também a todos os meus familiares que, de alguma forma, me incentivaram a seguir em frente.

À orientação. Agradeço ao meu orientador professor Luciano por ter me guiado magistralmente com paciência e sabedoria. Obrigado pela confiança depositada no meu trabalho, pelos puxões de orelhas e pelo ótimo exemplo. Agora temos mais 4 anos pela frente! Agradeço também aos professores Marinho Barcellos e Luciana Buriol pelas contribuições realizadas durante a realização deste trabalho. Por último, agradeço ao meu antigo orientador na graduação, professor Vinícius Garcia, o qual incentivou meu interesse pela pesquisa.

À Universidade. Agradeço à Universidade e, em especial, ao PPGC por todo o suporte necessário para realizar esta pesquisa. Ademais, agradeço todo o aporte financeiro concedido para a participação e apresentação dos resultados desta pesquisa em conferências. Por fim, agradeço a CAPES pelo suporte financeiro durante o período do mestrado.

Aos amigos. Agradeço a todos os amigos, sem exceção. Não poderia deixar de mencionar meus sinceros agradecimentos, em especial, aos colegas “tensos” da sala 208 (Leonardo, Lucas, Rodolfo, Rodrigo, Rafael, Daniel, Mateus, Miguel e Tobias). Com certeza durante esses dois anos de mestrado, vocês me mostraram o real sentido da palavra tensão. Também, não menos importante, os amigos que fiz dentro do grupo de redes de computadores (Mateus Cadori, Ricardo, Rodrigo Mansilha, Peruano, Oscar, Weverton e Rafael Esteves). Obrigado à todos pelas ótimas discussões e momentos de descontração, sempre regados a muito café (leia-se também cerveja). Por fim, agradeço à todos os amigos que não estão diretamente relacionados ao mundo da computação. **Meu muito obrigado!**

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	7
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	10
RESUMO	11
ABSTRACT	12
1 INTRODUÇÃO	13
2 FUNDAMENTOS	16
2.1 Virtualização de Redes	16
2.2 O Problema de Mapeamento de Redes Virtuais	18
2.2.1 Definição Geral do Problema	19
2.2.2 Objetivos Considerados	20
2.2.3 Taxonomia do Problema	21
2.3 Sumário	22
3 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE	24
3.1 Mapeamento de Redes Virtuais	24
3.2 Planejamento e Expansão de Redes	29
3.3 Sumário	32
4 CARACTERIZANDO O IMPACTO DE TOPOLOGIAS NO MAPEAMENTO DE REDES VIRTUAIS	33
4.1 Topologias de Redes de Provedores	33
4.2 Modelo Ótimo de Mapeamento de Redes Virtuais	34
4.3 Avaliação do Impacto de Topologias no Mapeamento	37
4.3.1 Carga de Trabalho	37
4.3.2 Resultados	38
4.4 Sumário	46
5 RECONNECTANDO PARTIÇÕES DE INFRAESTRUTURAS FÍSICAS: UMA ESTRATÉGIA DE EXPANSÃO PARA O MAPEAMENTO EFICIENTE DE REDES VIRTUAIS	47
5.1 Matrizes de Demanda em Ambientes Virtualizados	47

5.2	Expansão de Redes de InP para o Mapeamento de Redes Virtuais	49
5.2.1	Visão Geral do Problema	49
5.2.2	Definições e Modelagem	50
5.2.3	Estratégia de Expansão Proposta	52
5.3	Avaliação do Impacto da Expansão no Mapeamento de Redes Virtuais .	54
5.3.1	Carga de Trabalho e Modelo de Mapeamento	55
5.3.2	Resultados	56
5.4	Sumário	58
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	59
	REFERÊNCIAS	61
	APÊNDICE A – ARTIGO PUBLICADO - SBRC 2013	64
	APÊNDICE B – ARTIGO PUBLICADO - CNSM 2013	79
	APÊNDICE C – ARTIGO PUBLICADO - SBRC 2014	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CFC	<i>Componente Fortemente Conexo</i>
ILP	<i>Integer Linear Programming</i>
InP	<i>Infrastructure Provider</i>
IP	<i>Integer Programming</i>
ISP	<i>Internet Service Provider</i>
MILP	<i>Mixed Integer Linear Programming</i>
NSFNET	<i>National Science Foundation Network</i>
SP	<i>Service Provider</i>
VLAN	<i>Virtual Local Area Networks</i>
VLiM	<i>Virtual Link Mapping</i>
VN	<i>Virtual Network</i>
VNE	<i>Virtual Network Embedding</i>
VNoM	<i>Virtual Node Mapping</i>
VPN	<i>Virtual Private Networks</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1:	Exemplo de uma alocação de redes virtuais em uma infraestrutura física.	17
Figura 2.2:	Modelo de alocação de recursos em redes virtualizadas. Figura adaptada de Fisher et al. (FISCHER et al., 2013)	18
Figura 3.1:	Mapeamento de redes virtuais com suporte a múltiplos caminhos. Figura adaptada de Yu et al. (YU et al., 2008).	25
Figura 3.2:	Estratégia de pré-seleção de roteadores físicos por meio de uma representação aumentada da infraestrutura física. Figura adaptada de Chowdhury et al. (CHOWDHURY; RAHMAN; BOUTABA, 2009)	26
Figura 3.3:	Mapeamento de redes virtuais considerando a transferência de imagens binárias para os roteadores físicos. Figura adaptada de Alkmim et al. (ALKMIM; BATISTA; FONSECA, 2011a)	26
Figura 3.4:	Exemplo da classificação de roteadores candidatos para alocação de roteadores virtuais. Figura adaptada de Cheng et al. (CHENG et al., 2011).	27
Figura 3.5:	Aplicação do modelo de alocação de redes virtuais considerando aspectos relacionados à confidencialidade.	28
Figura 4.1:	Exemplos de classes de topologias de provedores de rede.	34
Figura 4.2:	Porcentagem média de requisições rejeitadas nos experimentos realizados.	39
Figura 4.3:	Sobrecarga média de largura de banda necessária para acomodar as requisições aceitas.	40
Figura 4.4:	Utilização média de CPU dos roteadores físicos.	41
Figura 4.5:	Utilização média de memória dos roteadores físicos.	41
Figura 4.6:	Utilização média de largura de banda dos enlaces físicos.	42
Figura 4.7:	Consumo médio dos recursos de roteadores físicos com diferentes graus de conectividade nos cenários que empregam a topologia <i>hub & spoke</i>	42
Figura 4.8:	Percentual médio das causas de rejeição observadas em todos os experimentos.	43
Figura 4.9:	Tempo médio necessário para encontrar a alocação ótima.	45
Figura 5.1:	Matriz de demanda de infraestruturas tradicionais vs. Matriz de demanda de infraestruturas com suporte à virtualização de redes.	48
Figura 5.2:	Aplicação da estratégia proposta na infraestrutura física.	49

Figura 5.3:	Média adicional de redes virtuais aceitas após a aplicação do procedimento de expansão.	56
Figura 5.4:	Utilização global de largura de banda dos enlaces físicos após a expansão.	57
Figura 5.5:	Representação gráfica do consumo médio de recursos da infraestrutura antes (a) e depois (b) de uma expansão de 20% dos recursos com cobertura de 20%. Tons mais escuros representam maior utilização de recursos físicos.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1:	Exemplo de métricas consideradas pelas funções objetivos. Tabela adaptada de Fisher et al. (FISCHER et al., 2013)	21
Tabela 3.1:	Sistematização das características analisadas nos trabalhos de mapeamento de redes virtuais estudados.	29

RESUMO

A virtualização de redes é um mecanismo que permite a coexistência de múltiplas redes virtuais sobre um mesmo substrato físico. Um dos desafios de pesquisa abordados na literatura é o mapeamento eficiente de recursos virtuais em infraestruturas físicas. Embora o referido desafio tenha recebido considerável atenção, as abordagens que constituem o estado-da-arte apresentam alta taxa de rejeição, i.e., a proporção de solicitações de redes virtuais negadas em relação ao total de solicitações efetuadas ao substrato é elevada. Nesta dissertação, caracteriza-se, inicialmente, a relação entre a qualidade dos mapeamentos de redes virtuais e as estruturas topológicas dos substratos subjacentes. Avalia-se as soluções exatas de um modelo de mapeamento *online* sob diferentes classes de topologias de rede. A partir do entendimento dos fatores topológicos que influenciam diretamente o processo de mapeamento de redes virtuais, propõe-se uma estratégia para planejar a expansão de redes de provedores de infraestrutura de forma a reduzir consistentemente a taxa de rejeição de requisições de redes virtuais e melhor aproveitar os recursos ociosos da mesma. Os resultados obtidos evidenciam que grande parte das rejeições de redes virtuais ocorre em situações em que há grande disponibilidade de recursos, mas alguns poucos já saturados acabam inviabilizando, em função de características de conectividade do substrato, o atendimento de novas requisições. Ademais, os resultados obtidos utilizando a estratégia proposta evidenciam que o fortalecimento de partes-chave da infraestrutura levam a uma ocupação muito mais satisfatória. Uma expansão de 10% a 20% dos recursos da infraestrutura contribui para um aumento sustentado de até 30% no número de redes virtuais aceitas e de até 45% no aproveitamento dos recursos em comparação com a rede original.

Palavras-chave: Virtualização de redes, problema de mapeamento de redes virtuais, internet do futuro, planejamento de capacidade.

An Approach based on Topological Factors for the Expansion of Physical Infrastructure in the Context of Network Virtualization

ABSTRACT

Network virtualization is a mechanism that allows the coexistence of multiple virtual networks on top of a single physical substrate. One of the research challenges addressed recently in the literature is the efficient mapping of virtual resources on physical infrastructures. Although this challenge has received considerable attention, state-of-the-art approaches present, in general, a high rejection rate, *i.e.*, the ratio between the number of denied virtual network requests and the total amount of requests is considerably high. In this thesis, we characterize the relationship between the quality of virtual network mappings and the topological structures of the underlying substrates. Exact solutions of an online embedding model are evaluated under different classes of network topologies. From the understanding of the topological factors that directly influence the virtual network embedding process, we propose an expansion strategy of physical infrastructure in order to suggest adjustments that lead to higher virtual network acceptance and, in consequence, to improved physical resource utilization. The obtained results demonstrate that most of rejections occur in situations in which a significant amount of resource is available, but a few saturated devices and links, depending on connectivity features of the physical substrate, hinder the acceptance of new requests. Moreover, the obtained results using the proposed strategy evidence that an expansion of 10% to 20% of the infrastructure resources leads to a sustained increase of up to 30% in the number of accepted virtual networks and of up to 45% in resource usage compared to the original network.

Keywords: Network virtualization, virtual network embedding problem, future internet, planning network capacity.

1 INTRODUÇÃO

A virtualização de redes é um mecanismo que permite a coexistência de múltiplas redes virtuais (VNs – *Virtual Networks*) compartilhando recursos de um mesmo substrato físico. Essas VNs podem apresentar arquiteturas, protocolos e topologias independentes das do substrato de rede na qual serão instanciadas. Provedores de Infraestruturas (InPs – *Infrastructure Providers*), lançando mão das facilidades de alocação e desalocação de redes virtuais e do isolamento de recursos que as tecnologias de virtualização provêm, passam, assim, a poder oferecer suporte à criação, sob demanda, de redes personalizadas, atendendo a diferentes requisitos impostos pelos contratantes.

Um dos maiores desafios de pesquisa em virtualização de redes é a alocação eficiente de recursos de infraestruturas físicas para requisições de redes virtuais (VNE – *Virtual Network Embedding*). Essa alocação de recursos físicos deve ser ciente das capacidades dos equipamentos de rede, bem como das demandas requeridas pelas redes virtuais (por exemplo, largura de banda dos enlaces virtuais e capacidade de processamento dos roteadores virtuais). Apesar de haver um número considerável de trabalhos que exploram o problema *online* de mapeamento de redes virtuais (YU et al., 2008; CHOWDHURY; RAHMAN; BOUTABA, 2009; ALKMIM; BATISTA; FONSECA, 2011b; CHENG et al., 2012; BAYS et al., 2012; ALKMIM; BATISTA; FONSECA, 2013), constata-se que as taxas de rejeição para o conjunto de requisições entrantes são, normalmente, altas, podendo atingir até 53%. Supõe-se que um subconjunto dessas rejeições seja causado por insuficiências temporárias de recursos, ou seja, períodos em que os recursos disponíveis na infraestrutura como um todo não são capazes de suprir a demanda. Especula-se, contudo, que grande parte das rejeições ocorra em situações em que há grande disponibilidade de recursos, mas alguns poucos já saturados acabam inviabilizando, em função de características de conectividade do substrato, o atendimento de novas requisições.

Apesar dos esforços empreendidos para resolver o problema do mapeamento de redes virtuais, desconhecem-se trabalhos que investiguem a influência de topologias de rede no processo de mapeamento. Além disso, trabalhos existentes na área empregam topologias que nem sempre refletem as de redes comerciais (HADDADI et al., 2008). Acredita-se ser fundamental compreender a relação entre o uso de diferentes topologias e o processo de mapeamento, de forma a identificar como determinadas características topológicas influenciam nesse processo. Por exemplo, topologias organizadas de diferentes formas podem propiciar uma melhor utilização dos recursos físicos, podendo, assim, reduzir a taxa de rejeição de requisições. Ademais, o lucro obtido pelos provedores pode ser potencialmente ampliado ao mesmo tempo que se reduz os custos para os solicitantes de redes virtuais.

Antecipando que as propriedades topológicas presentes em infraestruturas físicas exer-

cem um papel fundamental no processo de mapeamento de redes virtuais, propõe-se uma estratégia para planejar a expansão de redes de provedores de infraestrutura com base em propriedades topológicas recorrentes às situações em que as requisições de redes virtuais são, normalmente, negadas. Além disso, desconhecem-se trabalhos anteriores que investiguem como a rede física de um provedor de infraestrutura pode ser expandida para acomodar uma maior quantidade de redes virtuais. Ao mesmo tempo, abordagens clássicas para o planejamento da expansão de infraestruturas físicas (MUKHERJEE et al., 1996; RAMASWAMI; SIVARAJAN, 1996; KRISHNASWAMY; SIVARAJAN, 2001) não são adequadas para ambientes de virtualização de redes. No caso dessas abordagens tradicionais (e consolidadas), conhece-se *a priori* quais pares de dispositivos requerem uma maior quantidade de recursos, e a expansão é realizada com base em uma matriz de demanda (que indica onde se encontram os gargalos da rede). No entanto, a matriz de demanda observada como resultado da criação de *slices* em redes de InPs¹ tende a apresentar uma distribuição comparativamente mais homogênea de recursos entre pares de dispositivos físicos. Tal advém do fato de que elementos de redes virtuais, em geral, podem ser hospedados em (praticamente) qualquer dispositivo físico com recursos suficientes disponíveis. Visto que a localidade de dispositivos físicos possui pouca influência no processo de mapeamento de redes virtuais, não é possível identificar gargalos de forma tão clara. Essas características tornam um desafio a identificação de regiões do substrato que precisam ser replanejadas para aumentar a probabilidade de acomodar com sucesso novas requisições de redes virtuais.

Nesta dissertação, caracteriza-se o impacto de diferentes classes de topologias tipicamente empregadas em infraestruturas comerciais na qualidade do mapeamento de redes virtuais. Mais especificamente, formaliza-se um modelo ótimo de mapeamento e emprega-se o mesmo na alocação *online* de redes virtuais sobre substratos com topologias estrela, *ladder* e *hub & spoke*. Os resultados obtidos são avaliados considerando diferentes métricas, como taxa de rejeição e consumo de recursos dos dispositivos da rede física. Além disso, a partir do entendimento dos fatores topológicos que influenciam diretamente o processo de mapeamento de redes virtuais, propõe-se uma estratégia embasada na reconexão de componentes fortemente conexos (partições) para sugerir ajustes na infraestrutura que levem a um aumento nas taxas de aceitação. Tal estratégia tem como objetivo promover a reconexão de partições recorrentes, favorecendo a acomodação de um maior número de redes virtuais a longo prazo. Para provar o conceito e a viabilidade técnica da estratégia proposta, conduziu-se um conjunto extensivo de experimentos a fim de observar aspectos como ganhos em taxa de aceitação e no aproveitamento dos recursos físicos.

De forma resumida, destacam-se como principais contribuições desta dissertação: (i) a formalização de um modelo de alocação *online* considerando restrições de localidade; (ii) a sistematização das características de redes tipicamente adotadas por provedores; (iii) a avaliação e a discussão do impacto de diferentes topologias no processo de mapeamento de redes virtuais; (iv) a definição pioneira do problema de expansão de infraestruturas físicas no contexto da virtualização de redes; e (v) a avaliação detalhada da estratégia proposta, demonstrando como o fortalecimento de partes-chave de uma infraestrutura pode levar a sua ocupação de forma muito mais satisfatória.

¹Nesta dissertação as expressões *substrato físico*, *rede física*, *infraestrutura física* e *rede de InP* são usadas como sinônimos.

O restante desta dissertação está organizado da seguinte forma. O Capítulo 2 apresenta os conceitos chave utilizados ao longo dos capítulos desta dissertação. No Capítulo 3, apresenta-se, de maneira sistematizada, uma discussão dos principais trabalhos relacionados ao problema de mapeamento de redes virtuais e ao planejamento e expansão de redes. No Capítulo 4, propõe-se um modelo de mapeamento de redes virtuais e o caracteriza considerando topologias tipicamente observadas em provedores de rede. Face aos resultados apresentados, propõe-se, no Capítulo 5, uma estratégia para planejar a expansão das capacidades das infraestruturas físicas de forma a reduzir consistentemente a taxa de rejeição de requisições de VNs e melhor aproveitar os recursos ociosos da mesma. Por fim, o Capítulo 6 conclui esta dissertação com considerações finais e indicações de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTOS

Neste capítulo são apresentados os conceitos chave, no escopo desta dissertação, relacionados à virtualização de redes e ao problema de mapeamento de redes virtuais. Ressalta-se que o texto apresentado neste capítulo é resultado de uma compilação de dois *surveys* específicos da área (CHOWDHURY; BOUTABA, 2010; FISCHER et al., 2013). Dessa forma, indica-se a consulta das referências para uma fundamentação mais completa e exaustiva acerca do tema, caso necessário.

2.1 Virtualização de Redes

A crescente utilização e popularização da Internet é incontestável. Durante as últimas décadas, o uso da Internet está cada vez mais diversificado. Em função do crescimento da utilização da Internet nos mais variados meios, algumas limitações surgem para atender novos requisitos como segurança, mobilidade e qualidade de serviço. Tais limitações se devem à ossificação da Internet. Tal termo foi cunhado na literatura (PETERSON et al., 2003; TURNER; TAYLOR, 2005) para descrever a dificuldade de inovação no núcleo da rede. A ossificação decorre, principalmente, da natureza multi-provedor da Internet, o que torna um desafio a adoção de novas tecnologias por parte dos provedores (a adoção de uma nova tecnologia seria factível, por exemplo, por meio de um consenso entre os provedores). Como resultado, as alterações na arquitetura da Internet são restritas a atualizações incrementais, o que inviabiliza, em certa medida, a adoção de tecnologias para suprir as novas demandas.

Para superar as limitações relacionadas à implantação de novas tecnologias (ou, até mesmo, a experimentação em larga escala), a virtualização de redes foi proposta como uma alternativa para alavancar o desenvolvimento arquitetural das redes. Um ambiente de rede com suporte à virtualização é aquele que, além de permitir a coexistência de múltiplas redes virtuais sobre um mesmo substrato físico, promove flexibilidade, escalabilidade, isolamento e um maior gerenciamento às infraestruturas físicas. A flexibilidade e o gerenciamento estão relacionados a facilidade com que provedores de infraestrutura podem instanciar e gerenciar VNs e recursos físicos. Além disso, VNs de tamanhos variados (e com diferentes requisitos) podem ser solicitadas e instanciadas de maneira isolada. Nesse contexto, cada rede virtual é composta por um conjunto de roteadores e enlaces virtuais, os quais representam um subconjunto dos recursos da infraestrutura física.

O modelo de virtualização de redes propõe o desacoplamento das funcionalidades e atribuições dos atuais provedores de serviço de Internet (ISP – *Internet Service Providers*) em duas novas entidades: provedores de infraestruturas (InP – *Infrastructure Provider*) e

provedores de serviço (SP – *Service Provider*). Os InPs gerenciam e provêm os recursos físicos, enquanto que os SPs são encarregados por requisitar redes virtuais, implantar a infraestrutura necessária (por exemplo, definir os protocolos de rede) e disponibilizar serviços fim-a-fim aos usuários. A virtualização permite que InPs instanciem de maneira dinâmica múltiplas redes virtuais, potencialmente heterogêneas (por exemplo, com diferentes arquiteturas), coexistindo com isolamento em um mesmo substrato físico. Já os SPs podem prover serviços personalizados para os usuários finais utilizando recursos subjacentes de um ou mais substratos físicos (os quais podem ser oriundos de um ou mais InPs). A literatura propõe modelos conceituais (CHOWDHURY; BOUTABA, 2009, 2010) que expressam o relacionamento entre as entidades envolvidas (*stakeholders*). Além das entidades mencionadas (InP e SP), outras entidades podem se relacionar no modelo como, por exemplo, operadores e provedores de redes virtuais. Ressalta-se que nesta dissertação, considera-se que tais entidades estão acopladas às funcionalidades dos InPs ou dos SPs, uma vez que desempenham papéis intermediários entre os principais *stakeholders*.

Por meio da separação das redes virtuais da rede física é possível definir, de maneira personalizada (por exemplo, com diferentes protocolos de rede), redes virtuais de acordo com cada organização (solicitação). Os procedimentos para o gerenciamento de redes virtuais são mais flexíveis, uma vez que cada VN é controlada de maneira isolada e apresenta seu próprio sistema de políticas de gerenciamento. O isolamento oferecido pelos ambientes com suporte à virtualização facilita a implementação de políticas de QoS por parte dos clientes, além de mitigar o impacto de ameaças à segurança dos serviços. Os benefícios providos pela virtualização de redes podem ser perfeitamente aplicados aos atuais provedores de serviço (redes comerciais) e, desta forma, aumentar a flexibilidade no gerenciamento de redes e serviços. Dessa forma, destaca-se que a ênfase da virtualização de redes nesta dissertação está relacionada com tais redes comerciais.

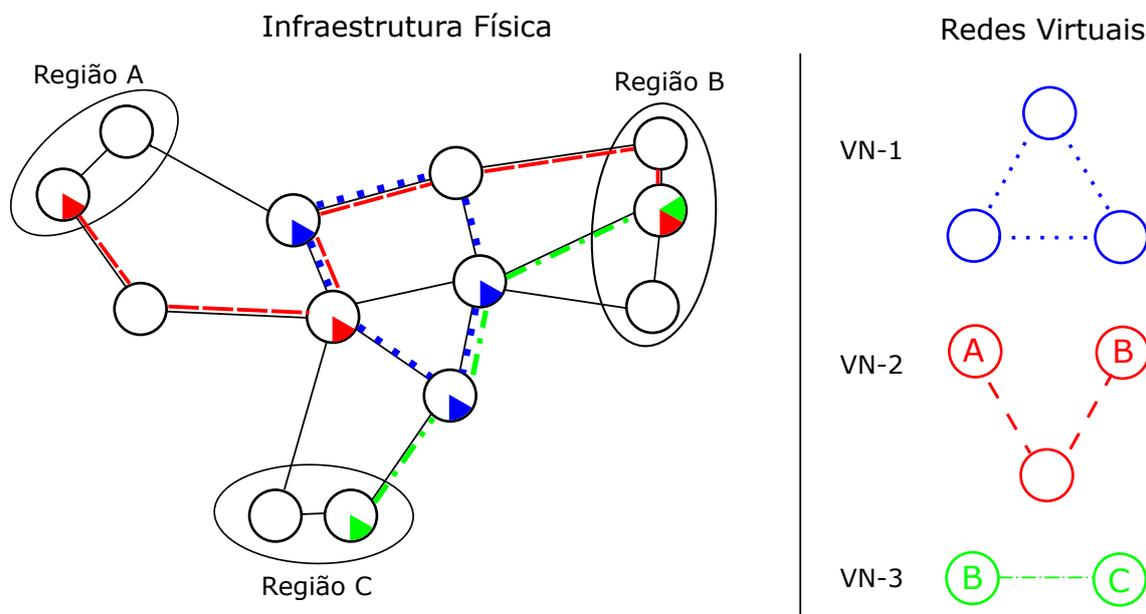


Figura 2.1: Exemplo de uma alocação de redes virtuais em uma infraestrutura física.

A Figura 2.1 apresenta os elementos básicos de um ambiente de rede virtualizado. No nível da rede das infraestruturas físicas (InP), a rede é composta por um conjunto de

roteadores e enlaces físicos com suporte à virtualização. Topologias de redes virtuais (por exemplo, VN-1), por sua vez, são mapeadas em um subconjunto de roteadores físicos de um ou mais substratos. Essas topologias são compostas por roteadores e enlaces virtuais, os quais requisitam uma fatia de recursos dos dispositivos da infraestrutura. Roteadores e enlaces virtuais são mapeados nos dispositivos físicos de maneira a garantir que as topologias virtuais sejam logicamente preservadas.

Embora técnicas similares de separação e isolamento de fluxos já tenham sido estudadas em outros contextos como, por exemplo, VLAN (*Virtual Local Area Networks*) e VPN (*Virtual Private Networks*), a virtualização de redes levanta uma série de novos desafios a serem tratados. A comunidade científica vem pesquisando problemas relacionados, por exemplo, à instanciação, operação e gerenciamento de redes virtuais. Apesar dos esforços empreendidos, algumas questões ainda permanecem em aberto ou pouco estudadas. O problema de mapeamento de redes virtuais é um dos temas que carece de um melhor entendimento e está diretamente relacionado com a alocação de recursos da infraestrutura física para as redes virtuais requisitadas.

2.2 O Problema de Mapeamento de Redes Virtuais

Como ressaltado na seção anterior, um dos problemas que vem recebendo atenção da comunidade científica no contexto da virtualização de redes é o problema de mapeamento de redes virtuais (VNE). Tal problema é considerado um problema chave para os InPs, uma vez que por meio de mapeamentos eficientes e dinâmicos dos recursos virtuais requisitados pelas VNs, pode-se ter um melhor aproveitamento da utilização dos recursos disponíveis na infraestrutura subjacente.

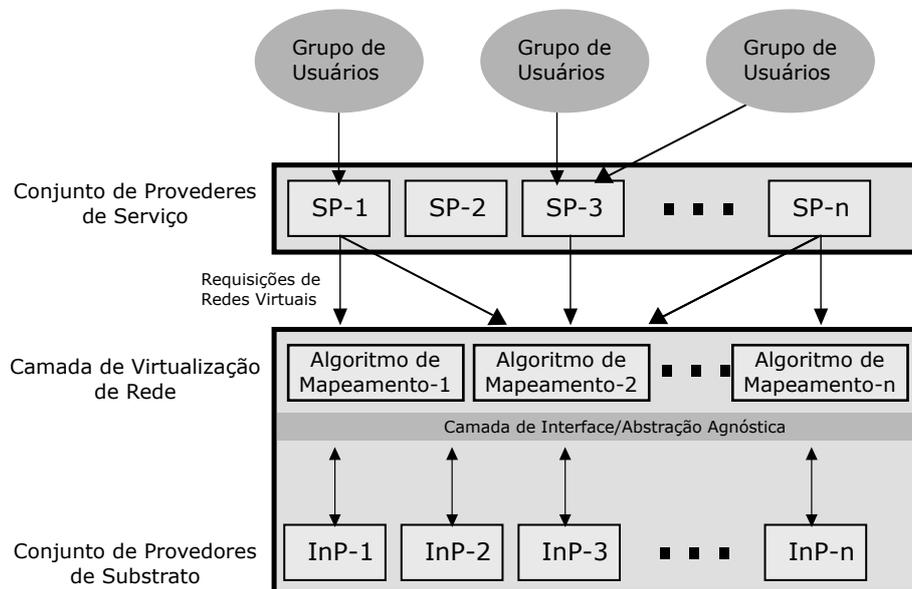


Figura 2.2: Modelo de alocação de recursos em redes virtualizadas. Figura adaptada de Fisher et al. (FISCHER et al., 2013)

Os mapeamentos eficientes de recursos virtuais são realizados por meio de diferentes modelos de alocação, os quais diferem pela presença de diferentes requisitos (impostos pelos solicitantes) e métricas para avaliar a qualidade das soluções. A Figura 2.2 ilustra

como os InPs podem, potencialmente, fazer uso de diferentes modelos de mapeamento para a alocação eficiente de requisições de VNs na infraestrutura física. De acordo com os requisitos dos usuários, os InPs alternam entre os modelos de mapeamento para satisfazer os requisitos e, ao mesmo tempo, aumentar a lucratividade. Além disso, a Figura ilustra uma possível rede de um substrato físico, a qual pode ser composta por elementos físicos provenientes de vários InPs. Dessa forma, os SPs tem autonomia e flexibilidade para requisitar recursos físicos de acordo com a suas demandas. Ao longo das próximas subseções, o problema de mapeamento de redes virtuais é apresentado em maiores detalhes.

2.2.1 Definição Geral do Problema

O problema de mapeamento de redes virtuais lida com a alocação de roteadores e enlaces virtuais. Segundo Fisher et al. (FISCHER et al., 2013), o VNE pode ser dividido em dois subproblemas: mapeamento de nós virtuais (VNoM – *Virtual Node Mapping*), o qual consiste na alocação de roteadores virtuais em roteadores físicos; e o mapeamento de enlaces virtuais (VLiM – *Virtual Link Mapping*), o qual consiste em alocar os enlaces virtuais em um ou mais enlaces físicos objetivando conectar os roteadores virtuais de acordo com a topologia requisitada.

Ainda segundo Fisher et al. (FISCHER et al., 2013), a abstração de hardware provida pelas soluções de virtualização permite que um recurso físico hospede várias instâncias virtuais (roteadores e enlaces virtuais) de maneira simultânea. A partir dessa abstração, os roteadores físicos de uma infraestrutura física são aptos a hospedar um roteador virtual desde que os requisitos solicitados sejam atendidos. O mapeamento de roteadores virtuais para roteadores físicos pode ser definido como uma relação de $n : 1$, isto é, um roteador físico pode hospedar n roteadores virtuais. De maneira semelhante, cada enlace físico pode hospedar n enlaces virtuais. Os enlaces virtuais podem ser mapeados em m enlaces físicos, isto é, um enlace virtual pode ser mapeado em um caminho de enlaces físicos interconectando pares de roteadores virtuais. Dessa forma, o mapeamento de enlaces virtuais para enlaces físicos pode ser definido como uma relação de $n : m$.

A Figura 2.1 ilustra o mapeamento de três requisições de redes virtuais (VN-1, VN-2 e VN-3). No lado direito, ilustra-se as VNs requisitadas, enquanto que no lado esquerdo, um possível mapeamento de roteadores e enlaces virtuais para cada VN solicitada. As relações de mapeamento ($n : 1$ para roteadores e $n : m$ para enlaces) ficam evidentes em cada mapeamento.

Em geral, além de garantir as relações de mapeamento previamente descritas, existem algumas restrições a serem consideradas durante os mapeamentos das VNs. As principais restrições são relacionadas à capacidade dos recursos disponíveis nas infraestruturas. Dessa forma, evita-se que roteadores ou enlaces virtuais sejam hospedados em dispositivos físicos que não possam atender a demanda requerida. Por exemplo, para roteadores físicos, garante-se que a capacidade de CPU e/ou memória alocadas a roteadores virtuais não exceda a capacidade do dispositivo; para enlaces físicos, garante-se que a largura de banda alocada a enlaces virtuais não exceda a sua capacidade. Além das restrições referentes às capacidades, uma última restrição relacionada ao VNE consiste em garantir que todos os roteadores e enlaces virtuais sejam mapeados para que a VN seja mapeada com sucesso no substrato, evitando dessa forma mapeamentos parciais.

A solução para o problema de mapeamento de redes virtuais consiste em definir rela-

ções de mapeamentos considerando um conjunto de restrições relacionadas às capacidades dos dispositivos. Dentre as possíveis soluções factíveis, busca-se encontrar a solução ótima. A definição de otimalidade do modelo de mapeamento está estritamente relacionada com o objetivo do problema. Por exemplo, uma solução economicamente eficiente é aquela que consome a menor quantidade de recursos da infraestrutura. Dessa forma, o problema de mapeamento de redes virtuais pode ser definido como um problema de otimização em que se busca garantir as restrições e, ao mesmo tempo, maximizar ou minimizar um determinado objetivo.

O VNE é considerado um problema Np-difícil, já que é possível uma redução ao *Multi-Way Separator Problem* (ANDERSEN, 2002). Dessa forma, a resolução do VNE é restrita a cenários em escala reduzida (isto é, considerando redes físicas e virtuais com poucos nós). Assim, a comunidade científica da área tem buscado alternativas para superar as limitações de resolução por meio de modelos mais eficientes e a partir do desenvolvimento de heurísticas que produzam soluções próximas da otimalidade em um tempo hábil.

2.2.2 Objetivos Considerados

O problema de mapeamento de redes virtuais consiste em encontrar uma solução ótima para a alocação de roteadores e enlaces virtuais seguindo um objetivo em particular. Na literatura recente, muitas variações do problema foram propostas para suprir às demandas de possíveis requisitos dos SPs. As variações do problema de mapeamento de redes virtuais enquadram-se em uma das três classes de funções objetivos: consumo de recursos, qualidade de serviço e resiliência. Essas três classes são brevemente descritas a seguir.

Consumo de Recursos. Em um ambiente virtualizado, a lucratividade dos SPs está diretamente relacionada ao consumo de recursos da infraestrutura. As estratégias de mapeamento que adotam funções objetivos relacionadas ao consumo de recursos, em geral, tentam minimizar a utilização geral dos recursos físicos da infraestrutura. Dessa forma, aumenta-se a probabilidade da disponibilidade de recursos para atender às futuras requisições e, assim, aumentar a lucratividade. A Figura 2.1 ilustra um exemplo de como uma estratégia de mapeamento influencia no consumo adicional de recursos da infraestrutura. Por exemplo, a VN em verde requisita 1 (um) enlace virtual e consome na infraestrutura física 3 (três) enlaces físicos (um consumo adicional de recursos 3 vezes maior ao requerido). Já a VN em azul requisita 3 (três) enlaces virtuais e consome 5 (cinco) enlaces físicos (um consumo adicional de recursos 1,6 vezes maior ao requerido). Quando a função objetivo está relacionada ao consumo de largura de banda da infraestrutura física, o ideal para os SPs é a minimização do consumo adicional de recursos.

Qualidade de Serviço. Algumas requisições de redes virtuais possuem requisitos relacionados à qualidade de serviço. Existe uma grande quantidade de situações em que tais requisitos são explícitos nas requisições de VNs. Por exemplo, quando um usuário deseja executar aplicações de tempo real (por exemplo, VoIP) em uma rede virtual, o impacto do atual mapeamento não deve ser perceptível. Nesses cenários, algumas métricas de qualidade de serviço podem ser consideradas como, por exemplo, o comprimento dos caminhos virtuais conectando os roteadores virtuais para prover um baixo *delay* entre os pares de roteadores.

Resiliência. O termo resiliência quando relacionado ao problema de mapeamento de

redes virtuais consiste em garantir recursos físicos de *backup* para roteadores e enlaces das redes virtuais. A resiliência pode ser definida em função de todos os elementos virtuais ou em relação aos de maior importância. Em caso de falhas nos dispositivos físicos da infraestrutura, a recuperação deve ser transparente para o usuário, isto é, não deve ser possível perceber que a infraestrutura está utilizando os recursos de *backup* para garantir o funcionamento do serviço. Os recursos de *backup* podem ser dedicados ou compartilhados. Quando se tem recursos dedicados, o provedor define para cada rede virtual um conjunto de recursos totalmente dedicados e independentes para garantir a resiliência. Dessa forma, os provedores são ineficientes na alocação de recursos de reserva, já que para cada VN alocada na infraestrutura, é necessário prover uma quantidade substancialmente maior que os recursos solicitados. Uma alternativa para isso é prover recursos de *backup* de maneira compartilhada. Em alguns casos, é aceitável compartilhar e reusar os recursos de *backup* para reduzir a superutilização dos recursos. Entretanto, altos níveis de compartilhamento dos recursos de *backup* levam a baixos níveis de confiabilidade.

Para alcançar os objetivos acima citados, necessita-se definir métricas que os expressem (consumo de recursos, qualidade de serviços e resiliência). A Tabela 2.1 apresenta as principais métricas relacionadas a cada objetivo.

Objetivo do Modelo	Métrica	Descrição
Consumo de Recursos	Custo	Descreve a soma do total de recursos gastos para alocar as requisições de VNs.
	Lucro	Descreve a soma do total de recursos demandados pelas requisições de VNs.
	Custo/Lucro	Descreve a relação entre os recursos gastos sobre os recursos demandados.
	Aceitação de VNs	Descreve o número de requisições de VNs que puderam ser alocadas.
Qualidade de Serviço	Tamanho do caminho	Descreve o número de enlaces físicos que, em média, um enlace virtual requer.
	Utilização	Descreve o somatório de recursos consumidos pelas redes virtuais.
	<i>Throughput</i>	Descreve a vazão média de dados entre os roteadores virtuais.
	<i>Delay</i>	Descreve o tempo que um pacote demora para trafegar através de um enlace virtual.
Resiliência	Quantidade de recurso de backup	Descreve o número disponível de recursos para <i>backup</i> .
	Caminhos redundantes	Descreve a diversidade de caminhos adotados nos mapeamentos de VNs.
	Custo da implementação da resiliência	Descreve o número de roteadores físicos adicionais requeridos para prover a resiliência.
	Número de migrações	Descreve o número de roteadores virtuais que necessitam ser migrados em caso de falha.

Tabela 2.1: Exemplo de métricas consideradas pelas funções objetivos. Tabela adaptada de Fisher et al. (FISCHER et al., 2013)

2.2.3 Taxonomia do Problema

De acordo com as demandas observadas nos InPs, modelos e estratégias para realizar tais mapeamento são desenvolvidos para suprir as necessidades específicas das requisições de VNs. As abordagens desenvolvidas para a resolução do problema de mapeamento de redes virtuais podem ser classificadas em: estática ou dinâmica; centralizada ou descentralizada; concisa ou redundante. As categorias são mutuamente independentes, isto é, um modelo pode ser dinâmico e descentralizado ao mesmo tempo. Essas categorias são brevemente descritas a seguir.

Mapeamento Estático ou Dinâmico. Em situações reais, redes virtuais são mapeadas de maneira *online*, isto é, redes virtuais são requisitadas sem o conhecimento prévio,

por parte dos InPs, do comportamento de chegada (quantidade de VNs requisitadas por unidade de tempo), dos recursos requeridos e da duração dos mapeamentos das redes solicitadas. As abordagens estáticas do problema negligenciam tais características, ou seja, sabe-se *a priori* qual é o subconjunto de VNs a serem alocadas e suas características.

Mapeamento Centralizado ou Descentralizado. O problema de mapeamento de redes virtuais pode ser resolvido de maneira centralizada ou descentralizada. No modelo centralizado, uma única entidade é responsável por realizar os mapeamentos. A vantagem dessa abordagem é que uma entidade, a cada mapeamento, tem uma visão global da infraestrutura. Como desvantagem, a abordagem centralizada apresenta um único ponto de falha. O modelo descentralizado objetiva resolver o problema de mapeamento de redes virtuais para escalas maiores, uma vez que em cenários reais, uma única entidade pode ficar sobrecarregada para resolver os mapeamentos de requisições de VNs. A desvantagem clara é a sobrecarga imposta ao sistema para manter uma visão geral da infraestrutura.

Mapeamento Conciso ou Redundante. Em cenários que exigem altos níveis de disponibilidade, os serviços executando nas VNs não podem ser interrompidos. Uma estratégia para melhorar os níveis de disponibilidade dos serviços é a implementação de redundância nas VNs. Para prover tal redundância, alguns modelos de mapeamento já o fazem na etapa de alocação de recursos. Essa alocação adicional de recursos é usada para garantir que em caso de falha nos dispositivos físicos, haja recursos de reserva para assegurar o funcionamento das VNs. Quanto maior a redundância requerida, maior é a quantidade de recursos gastos nas infraestruturas. Nos modelos concisos, o mapeamento de redes virtuais não considera a reserva adicional de recursos para suprir a demanda em situações de falha.

2.3 Sumário

Como mencionado neste capítulo, a virtualização de redes surgiu como uma alternativa para diversificar e alavancar o desenvolvimento arquitetural das redes. Por meio da virtualização de redes, soluções para as atuais limitações das redes de núcleo podem ser desenvolvidas e avaliadas em larga escala sem, no entanto, interferir no funcionamento das atuais redes de produção. Além disso, a virtualização de redes traz benefícios diretos para os atuais provedores de serviço, uma vez que por meio da virtualização, pode-se alcançar uma maior flexibilidade no gerenciamento das atuais redes e serviços. Apesar dos esforços empreendidos pela comunidade científica, muitas questões relacionadas à virtualização permanecem em aberto. Uma das principais questões está relacionada com o mapeamento eficiente de redes virtuais. Como pode ser observado na Seção 2.2, o problema de mapeamento é um problema de otimização multifacetado, podendo, por exemplo, ser modelado a partir de uma gama de objetivos e restrições.

Ao longo dos próximos capítulos, os conceitos introduzidos serão utilizados de maneira extensiva. No Capítulo 3, os conceitos introduzidos neste capítulo são associados de maneira sistematizada aos principais trabalhos relacionados, apresentando a taxonomia em que tais trabalhos se enquadram e as funções objetivos/métricas consideradas. No Capítulo 4, propõe-se um modelo (centralizado e conciso) de mapeamento de redes virtuais para caracterizar o impacto de topologias de redes de provedores no processo de mapeamento de redes virtuais. O modelo é avaliado de maneira dinâmica e são consideradas diferentes métricas como, por exemplo, consumo de recursos e taxa de rejeição. Por

fim, no Capítulo 5, apresenta-se uma estratégia para planejar a expansão das capacidades das infraestruturas físicas (InP) de forma a reduzir consistentemente a taxa de rejeição de requisições de VNs e, ao mesmo tempo, fazer melhor uso dos recursos da rede.

3 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

Neste capítulo é apresentada uma visão geral dos principais trabalhos que compõem o estado da arte relacionados ao problema de mapeamento de redes virtuais e ao planejamento e expansão de redes. Mais especificamente, na Seção 3.1, apresenta-se os trabalhos relacionados ao problema de mapeamento de redes virtuais e, na Seção 3.2, os trabalhos relacionados ao planejamento e expansão de redes.

3.1 Mapeamento de Redes Virtuais

Nesta seção faz-se um breve resumo das soluções propostas relacionadas ao problema de mapeamento de redes virtuais, ressaltando o tipo de topologia física e virtual utilizada, bem como as taxas de rejeição obtidas pelos métodos de mapeamento, quando disponíveis. Ainda, destaca-se que os trabalhos apresentados são, de acordo com a taxonomia apresentada anteriormente, dinâmicos, centralizados e concisos.

Yu et al. (YU et al., 2008) apresentam um modelo de mapeamento *online* para redes virtuais com suporte a múltiplos caminhos e migração. A fragmentação de enlaces virtuais em múltiplos caminhos é usada para aprimorar a utilização de recursos físicos, ampliando as chances de acomodar um maior número de redes virtuais no substrato. Por sua vez, a migração de elementos de redes virtuais reotimiza a utilização dos recursos físicos. O procedimento de mapeamento de roteadores e enlaces é realizado em etapas distintas. A função objetivo considerada no modelo é baseada na maximização a longo prazo do lucro proveniente dos mapeamentos de solicitações de VNs.

A Figura 3.1 ilustra, por meio de um exemplo, o benefício do suporte a múltiplos caminhos no processo de mapeamento de redes virtuais. Em um primeiro instante (Figura 3.1(a)), a infraestrutura física hospeda uma única VN (VN-1), a qual solicita 20 unidades de largura de banda em cada enlace. Os roteadores virtuais a , b e c são mapeados, respectivamente, nos roteadores físicos A , E e F , enquanto que os enlaces virtuais $a-c$ e $a-b$ são mapeados nos caminhos $A-D-E$ e $A-D-F$. Em um segundo instante (Figura 3.1(b)), uma nova requisição de VN (VN-2) é solicitada, requerendo 30 unidades de largura de banda. De acordo com a disposição dos recursos disponíveis, é impossível mapear a requisição no substrato (devido à fragmentação dos recursos disponíveis). Entretanto, a nova requisição pode ser mapeada se permitido mapear 20 unidades de largura de banda no caminho $D-E$ e 10 unidades no caminho $D-G-H-E$. A possibilidade de direcionar parte do fluxo solicitado em múltiplos caminhos leva, portanto, a uma melhor utilização dos recursos globais da infraestrutura e a um aumento na taxa de aceitação de VNs. Os experimentos foram realizados utilizando topologias geradas de forma aleatória tanto para

o substrato quanto para as VNs, com conectividade fixa de 50%. Não são apresentadas taxas de rejeição.

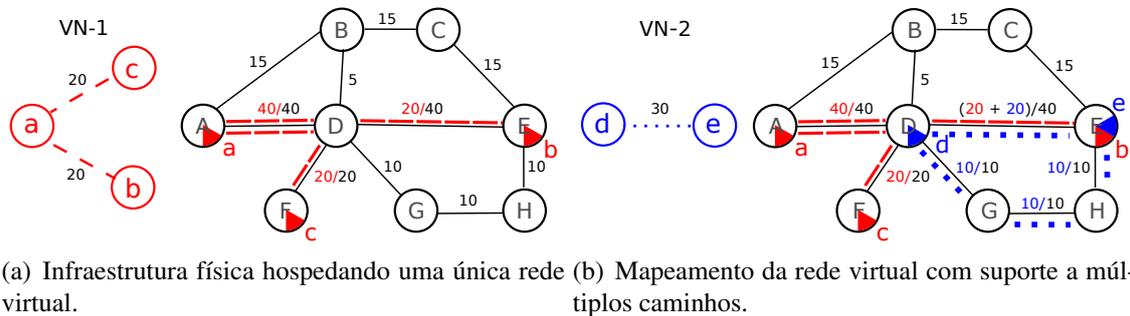


Figura 3.1: Mapeamento de redes virtuais com suporte a múltiplos caminhos. Figura adaptada de Yu et al. (YU et al., 2008).

Outro modelo *online*, formulado por Chowdhury et al. (CHOWDHURY; RAHMAN; BOUTABA, 2009, 2011), também realiza o mapeamento de roteadores e enlaces em fases distintas. Entretanto, restrições de localidade são usadas para pré-selecionar roteadores físicos onde roteadores virtuais serão hospedados, o que, segundo os autores, facilita o estágio subsequente de mapeamento de enlaces. A função objetivo apresentada realiza, ao mesmo tempo, a minimização do custo dos mapeamentos de requisições de VNs e o balanceamento da utilização dos recursos físicos (isto é, minimiza a disparidade na utilização de recursos físicos).

A etapa de pré-seleção de roteadores físicos é ilustrada na Figura 3.2. Tendo como base as restrições de localidade dos roteadores virtuais requisitados pela VNs e a representação da infraestrutura física, a estratégia de pré-seleção consiste em criar, inicialmente, uma representação aumentada da topologia. Para cada roteador virtual solicitado, insere-se um meta-nó na infraestrutura e o conecta, por meio de meta-enlaces (com largura de banda infinita), aos possíveis hospedeiros (roteadores físicos). Os possíveis roteadores a hospedar o roteador virtual são representados na Figura pelas regiões em tom de cinza e são definidos em função da proximidade com o nó virtual em questão. Assim, o espaço de soluções factíveis é reduzido, já que as possibilidades de mapeamento para os roteadores virtuais é restrita a um subconjunto dos roteadores físicos. O estágio subsequente de mapeamento de enlaces consiste em mapear cada enlace virtual requisitado na representação aumentada da infraestrutura. Além disso, o modelo também possibilita a fragmentação de enlaces virtuais em múltiplos caminhos físicos. As topologias físicas usadas na avaliação do modelo possuem as mesmas características das utilizadas por Yu et al. (YU et al., 2008), sendo geradas de forma aleatória com conectividade fixa de 50%. As taxas de rejeição para o conjunto de requisições nos cenários estudados atingem entre 25% e 35% para topologias aleatórias, 40% e 45% para topologias *full mesh* e 35% para topologias *hub & spoke*.

Alkmim et al. (ALKMIM; BATISTA; FONSECA, 2011a, 2013) propõem um modelo focado na necessidade de transferir imagens binárias de roteadores virtuais (armazenadas em repositórios conectados à rede) para os roteadores físicos que os hospedarão. Além de considerar requisitos relacionados às capacidades de roteadores e enlaces, bem como restrições de localidade, o modelo desenvolvido apresenta uma função objetivo que minimiza o tempo necessário para transferir tais imagens pela rede.

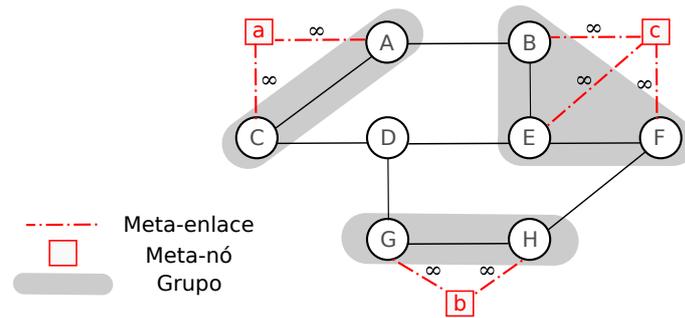


Figura 3.2: Estratégia de pré-seleção de roteadores físicos por meio de uma representação aumentada da infraestrutura física. Figura adaptada de Chowdhury et al. (CHOWDHURY; RAHMAN; BOUTABA, 2009)

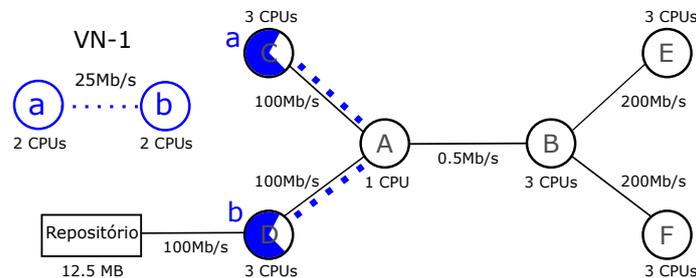


Figura 3.3: Mapeamento de redes virtuais considerando a transferência de imagens binárias para os roteadores físicos. Figura adaptada de Alkmim et al. (ALKMIM; BATISTA; FONSECA, 2011a)

A Figura 3.3 ilustra o mapeamento de uma VN (VN-1) considerando o impacto da transferência de imagens no tempo de instanciação. Na infraestrutura física, cada roteador possui uma capacidade diferente (representada, nesse exemplo, pela quantidade de núcleos) e cada enlace uma capacidade de largura de banda (representada em Mb/s). A infraestrutura conta com um repositório central de imagens binárias, o qual está conectado ao roteador *D*. Tal repositório armazena uma imagem binária com tamanho de 12.5MB. A VN solicitada (VN-1) requisita dois roteadores (cada um com 2 núcleos) e um enlace com largura de banda de 25Mb/s, além de solicitar que a instanciação seja realizada em no máximo 100 segundos. Se o processo de transferência de imagem é desconsiderado, a VN poderia ser instanciada nos roteadores físicos *B* e *E* ou *B* e *F* (considerando, por exemplo, uma função objetivo que minimiza a utilização dos recursos). Como resultado, a instanciação requereria 404.5 segundos para finalizar, uma vez que utilizaria o enlace *A–B* (o qual possui largura de banda de 0.5 Mb/s) para a transferência da imagem aos roteadores. A proposta de Alkmim et al. (ALKMIM; BATISTA; FONSECA, 2011a) pode resultar em uma alocação que consome mais recursos físicos, porém considera o impacto da velocidade de transferência das imagens binárias no tempo total de instanciação. As topologias empregadas nos cenários de avaliação são do tipo orgânicas, criadas utilizando o modelo BA-2 (ALBERT; BARABÁSI, 2000), e nos experimentos realizados, as taxas de rejeição são de aproximadamente 53%.

Cheng et al. (CHENG et al., 2011) realizam o mapeamento de elementos de redes virtuais baseados em um esquema de classificação de nós. Roteadores e enlaces, tanto

virtuais quanto físicos, são classificados conforme sua capacidade e a capacidade de seus vizinhos. Elementos físicos e virtuais são ordenados conforme sua classificação, de forma a combinar elementos com classificação semelhante para produzir seus mapeamentos. De forma similar ao trabalho de Yu et al. (YU et al., 2008), a função objetivo apresentada pelos autores maximiza o lucro por meio do relacionamento entre o ganho (relacionado à quantidade de recursos solicitados) e o custo (relacionado à quantidade de recursos utilizados para o mapeamento) dos mapeamentos de solicitações de VNs na infraestrutura física.

O procedimento de classificação de roteadores candidatos é ilustrado na Figura 3.4. No exemplo, os tamanhos dos círculos e as espessuras das linhas representam a quantidade de recurso disponível, respectivamente, em roteadores e enlaces (isto é, linhas mais espessas representam enlaces com maior disponibilidade de recursos). Os roteadores candidatos *A* (Figura 3.4(a)) e *B* (Figura 3.4(b)) apresentam, aparentemente, a mesma quantidade de recursos se considerados de maneira isolada. Entretanto, a estratégia desenvolvida pelos autores para classificar os roteadores candidatos considera a capacidade disponível nos elementos vizinhos. Dessa forma, o roteador *A* é uma melhor alternativa, já que os seus vizinhos ($v1$, $v2$, $v3$ e $v4$) apresentam mais recursos que os vizinhos de *B*. Assim, o roteador candidato *A* apresenta uma maior chance de hospedar com sucesso roteadores virtuais que solicitem uma maior fatia de recursos. Ressalta-se que o procedimento de classificação é realizado em todos os roteadores físicos e que, para cada roteador virtual, existe uma lista de possíveis candidatos. Para evitar que roteadores físicos com maior capacidade disponível sejam os candidatos preferenciais dos roteadores virtuais requisitados, os autores apresentam uma estratégia de emparelhamento de roteadores virtuais e físicos. A estratégia combina aqueles roteadores (virtuais e físicos) que apresentam quantidade de recursos semelhantes (isto é, recursos requeridos pelos roteadores virtuais e recursos disponíveis de roteadores físicos). Segundo os autores, tal estratégia evita a criação de gargalos na rede física. Nos cenários propostos para a avaliação, as topologias do substrato e das VNs são geradas de forma aleatória, e as taxas de rejeição atingidas variam entre 15% e 25%.

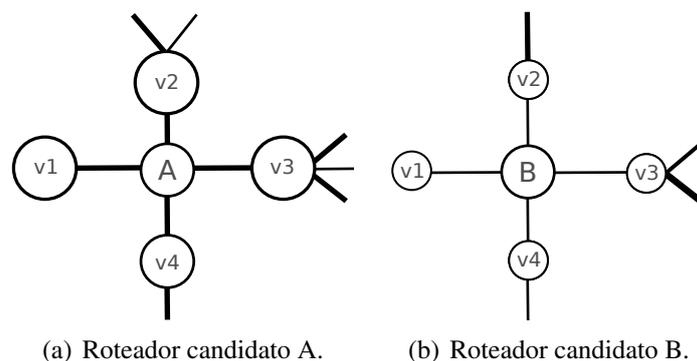


Figura 3.4: Exemplo da classificação de roteadores candidatos para alocação de roteadores virtuais. Figura adaptada de Cheng et al. (CHENG et al., 2011).

Bays et al. (BAYS et al., 2012), por sua vez, apresentam um modelo que considera a necessidade de prover, no processo de alocação, confidencialidade às redes virtuais. Redes virtuais podem requerer diferentes níveis de criptografia, e roteadores virtuais que necessitam realizar operações criptográficas devem ser mapeados a roteadores físicos

capazes de dar suporte a tais operações. Requisitantes de redes virtuais podem, ainda, demandar que suas redes não compartilhem recursos físicos com outras redes virtuais específicas. Os autores definem uma função objetivo que minimiza o consumo de largura de banda dos mapeamentos na infraestrutura física, isto é, o resultado do mapeamento de enlaces virtuais tende a ser menos custoso para os provedores de infraestrutura.

A abordagem de mapeamento proposta por Bays et al. (BAYS et al., 2012) é ilustrada na Figura 3.5. No exemplo, a infraestrutura física (à direita) é composta por um conjunto de roteadores e enlaces físicos, além de contar com três regiões definidas por 1, 2 e 3. À esquerda da figura, são representadas as três requisições de VNs (VN-1, VN-2 e VN-3), as quais demandam algum tipo de confidencialidade (representado, na figura, pela presença de cadeados). A VN-1 requer dois roteadores virtuais com suporte a operações criptográficas, enquanto que as redes VN-2 e VN-3, além de também demandarem tal suporte criptográfico, são conflitantes (isto é, não pode haver o compartilhamento de recursos físicos entre elas). Ainda, as VNs podem também solicitar que os roteadores virtuais sejam posicionados em roteadores físicos pertencentes a uma dada região, por exemplo, roteador a_1 da rede VN-1 requisita ser mapeado na região 1 (na Figura, números sobrescritos representam a localidade requisitada). A avaliação é realizada usando topologias orgânicas, geradas com o modelo BA-2, atingindo taxas de rejeição entre 48% e 58% nos cenários em que os requisitos de segurança são considerados.

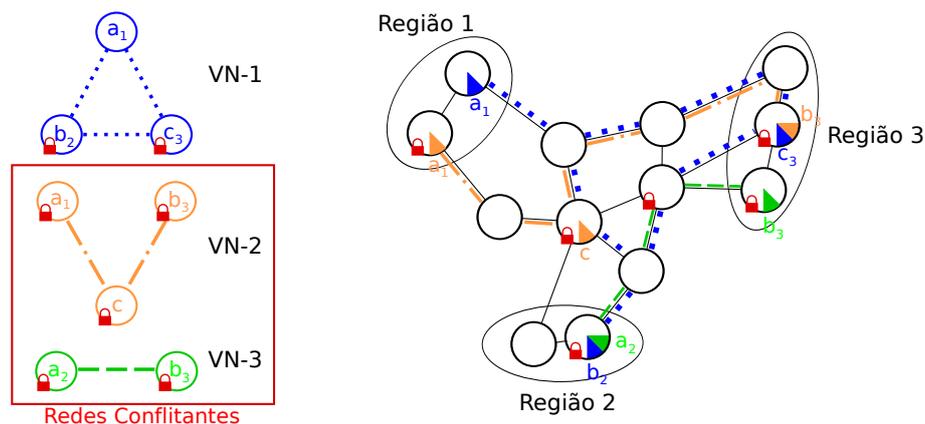


Figura 3.5: Aplicação do modelo de alocação de redes virtuais considerando aspectos relacionados à confidencialidade.

Além dos trabalhos até então mencionados, cujo foco é o mapeamento de redes virtuais, destacam-se também trabalhos que provêm isolamento de recursos em ambientes de virtualização de redes. Tais abordagens garantem que as alocações de recursos definidas na etapa de mapeamento serão cumpridas corretamente. Carvalho et al. (CARVALHO; FERNANDES; DUARTE, 2011) apresentam uma abordagem dinâmica baseada em lógica nebulosa, nos perfis de utilização dos roteadores virtuais e nos contratos de nível de serviço. A ideia chave é punir redes virtuais que excedam a utilização dos recursos estabelecidos em seus contratos. Por sua vez, Fernandes e Duarte (FERNANDES; DUARTE, 2011) propõem uma ferramenta para controle e gerenciamento de recursos que, por meio do monitoramento do tráfego de cada rede virtual, reajusta parâmetros das redes para garantir que os contratos de nível de serviço não serão violados. Como a avaliação de trabalhos dessa linha de pesquisa abstrai a etapa de mapeamento, não há dados relaciona-

dos à taxa de rejeição ou topologias empregadas. Os mesmos devem ser entendidos como complementares a este trabalho, tendo em vista que se assume a oferta, pelo substrato, de mecanismos que forneçam isolamento de recursos e confidencialidade.

Como mencionado, desconhecem-se trabalhos anteriores que avaliem de maneira justa o resultado de estratégias de mapeamento considerando diferentes topologias de rede. Os trabalhos desenvolvidos utilizam topologias genéricas ou orgânicas, como as geradas aleatoriamente ou pelo modelo BA-2, as quais não representam fielmente as propriedades topológicas presentes nas infraestruturas de redes de provedores. A Tabela 3.1 sistematiza as características dos trabalhos descritos nesta seção, ressaltando o método empregado para a resolução do problema de mapeamento, as topologias utilizadas no substrato físico e nas redes virtuais e as taxas de rejeição observadas.

Publicação	Método de Resolução	Topologia Física	Topologia Virtual	Taxa de Rejeição	Objetivo/Métrica
(YU et al., 2008)	Heurístico	Aleatória	Aleatória	–	Consumo de Recursos/Lucro
(CHOWDHURY; RAHMAN; BOU-TABA, 2009)	Exato/Heurístico	Aleatória	Aleatória	20%–45%	Consumo de Recursos/Custo e Balanceamento
(CHOWDHURY; RAHMAN; BOU-TABA, 2011)	Exato/Heurístico	Aleatória	<i>Hub & Spoke</i>	35%	Consumo de Recursos/Custo e Balanceamento
(CHOWDHURY; RAHMAN; BOU-TABA, 2011)	Exato/Heurístico	Aleatória	<i>Full Mesh</i>	40%–45%	Consumo de Recursos/Custo e Balanceamento
(ALKMIM; BATISTA; FONSECA, 2011a)	Exato	BA-2	BA-2	53%	Consumo de Recursos/Tempo
(CHENG et al., 2011)	Heurístico	Aleatória	Aleatória	15%–25%	Consumo de Recursos/Lucro e Custo
(BAYS et al., 2012)	Exato	BA-2	BA-2	48%–58%	Consumo de Recursos/Custo

Tabela 3.1: Sistematização das características analisadas nos trabalhos de mapeamento de redes virtuais estudados.

3.2 Planejamento e Expansão de Redes

Nesta seção faz-se um breve resumo dos principais trabalhos relacionados ao problema de planejamento e expansão de redes de computadores, destacando os contextos em que foram aplicados e as metodologias adotadas. Inicialmente, são apresentados trabalhos clássicos de planejamento e expansão de redes e, posteriormente, trabalhos mais recentes.

Mukherjee et al. (MUKHERJEE et al., 1996) propõem um modelo de expansão para redes ópticas cujos objetivos são minimizar o atraso médio entre os nós da infraestrutura e maximizar a capacidade dos enlaces, visando a favorecer o atendimento de demandas futuras. O problema é formulado através de programação inteira (IP – *Integer Programming*), porém devido a não linearidade da função objetivo e por se tratar de um problema NP-difícil, os autores propõem uma abordagem heurística. A solução proposta é baseada na metaheurística *Simulated Annealing* e no algoritmo de desvio de fluxos. A abordagem é dividida em duas etapas. A primeira, baseada na metaheurística, é responsável por encontrar uma solução para os escoamento das demandas de fluxos da matriz de demanda. A segunda, baseada no algoritmo de desvio de fluxos, define o roteamento para o tráfego definido na etapa anterior. As expansões são realizadas considerando o replanejamento

da capacidade da rede de *backbone* da NSFNET (*National Science Foundation Network*) com 14 nós e considera como base uma matriz de tráfego estática, a qual representa a média de tráfego entre os pares origem-destino da infraestrutura.

Ramaswami et al. (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 1996) apresentam uma formulação para o problema de expansão considerando a minimização global do congestionamento da infraestrutura. As expansões são realizadas considerando limites máximos de atraso permitidos e demandas existentes entre pares origem-destino. Os autores apresentam inicialmente um modelo de otimização e, posteriormente, por questões de escalabilidade, uma abordagem heurística que realiza a expansão da capacidade de caminhos físicos entre pares de roteadores com alta demanda, priorizando caminhos mais curtos. O modelo de otimização proposto, baseado em programação linear inteira-mista (MILP – *Mixed Integer Linear Programming*) evita o congestionamento global da infraestrutura por meio da minimização da utilização de cada enlace físico. O modelo é semelhante à formulação clássica do problema de fluxo em redes. Para cada par de demanda $s-t$ (origem e destino), é necessário escoar a demanda associada (definida pela matriz de demanda) pelos enlaces que os interconectam na infraestrutura física. O modelo não considera restrições relacionadas às capacidades dos enlaces, mas impõe restrições relacionadas com o atraso (*delay*) acumulado entre os pares $s-t$. Para otimizar o modelo, os autores propõem limites inferiores e superiores para o atraso de forma a reduzir o espaço de soluções factíveis. A avaliação do modelo exato é realizada utilizando redes físicas com tamanho entre 7 e 14 nós, enquanto que para a estratégia heurística, avalia-se com redes de tamanho entre 32 e 256 nós.

Krishnaswamy et al. (KRISHNASWAMY; SIVARAJAN, 2001) também abordam o problema de expansão de redes ópticas com o objetivo de minimizar o congestionamento entre nós da infraestrutura. No entanto, consideram que não é permitida a adição de repetidores na topologia física e, por isso, a inserção de novas fibras é restrita a um comprimento máximo. Um modelo de programação linear inteira (ILP – *Integer Linear Programming*) é proposto para resolver o problema. Os autores apresentam resultados numéricos para o modelo proposto aplicando-o em redes pequenas. Para instâncias que representam redes maiores, os autores propõem uma abordagem heurística. A estratégia heurística consiste em, inicialmente, obter uma solução inicial para o problema proposto, por meio da relaxação de variáveis inteiras do modelo ILP proposto. Para factibilizar a solução, aplica-se uma técnica de integralização nas variáveis relaxadas, a qual consiste em atribuir, sequencialmente, valores um (1) para variáveis reais com valores mais próximos de um (1) e, definir valores zero (0) para variáveis reais com valores mais próximos de zero (0). Ao mesmo tempo em que as variáveis são integralizadas, a factibilidade da solução é verificada. Ressalta-se que a estratégia de integralização adotada considera que as variáveis estão ordenadas (de maneira decrescente) em relação ao seu valor real. As avaliações consideram redes com tamanhos variando entre 7 e 14 nós.

Passa-se, agora, a uma breve revisão dos trabalhos recentes da área. Curtis et al. (CURTIS; LOPEZ-ORTIZ, 2009) apresentam modelos que possuem como objetivo otimizar a utilização da capacidade dos elementos da infraestrutura considerando aspectos de balanceamento de carga e resiliência. O modelo visa a garantir que o planejamento da infraestrutura é capaz de satisfazer um conjunto de requisitos referente à qualidade de serviço. Além do provisionamento adequado das capacidades dos dispositivos, modelos para o projeto de novas infraestruturas são apresentados. O modelo apresentado é baseado

em programação inteira e tem como objetivo a minimização do custo da infraestrutura ao mesmo tempo que atende a demanda de recursos requerida. Os autores consideram um modelo de custo fixo para a instalação de novos enlaces. Devido à presença de restrições exponenciais no modelo proposto, o tempo de execução, mesmo para instâncias pequenas, pode ser impraticável. O modelo para o projeto e expansão de infraestruturas considera como requisitos a tolerância a falhas (simultâneas) de até k enlaces. De forma similar aos trabalhos clássicos apresentados anteriormente, os autores empregam uma estimativa de demanda baseada em matrizes de tráfego para realizar o planejamento da capacidade dos enlaces da infraestrutura.

Johnston et al. (JOHNSTON; LEE; MODIANO, 2011) apresentam um esquema no qual uma rede de *backup* é planejada para prover proteção contra múltiplas falhas em enlaces. Sob a falha de enlaces na rede primária, o tráfego precisa ser re-roteado por meio de caminhos pré-planejados em uma rede de *backup*. Para garantir a sobrevivência da infraestrutura mesmo sob múltiplas falhas aleatórias em enlaces, os autores apresentam modelos baseados em ILP para planejar a rede de *backup*. Tais modelos de expansão determinam quais elementos precisam ser adicionados à infraestrutura física, além de definir a capacidade adequada de cada um. Por razões de escalabilidade, os autores propõem, ainda, uma metaheurística baseada em *Simulated Annealing* para viabilizar a resolução do problema considerando redes de grande porte. As avaliações do modelo exato são realizadas considerando a topologia da rede NSFNET, a qual apresenta 14 nós. O tamanho das redes utilizadas na avaliação do método heurístico não são apresentados.

Gangxiang et al. (SHEN; TUCKER, 2009), por sua vez, propõem um modelo de planejamento de infraestruturas que busca a redução do consumo de energia de redes de *backbone*. Os modelos previamente mencionados tem como objetivo, em geral, a minimização do *delay* ou dos custos totais da expansão. O modelo proposto por Gangxiang et al. (SHEN; TUCKER, 2009) difere dos anteriores, uma vez que objetiva a minimização do consumo energético dos componentes da infraestrutura (por exemplo, roteadores e *transponders*). Ademais, o modelo considera uma série de restrições que o torna mais realista (por exemplo, restrições relacionadas ao número de portas de roteadores). O modelo considera o consumo energético dos componentes da rede para definir em quais regiões da infraestrutura novos recursos devem ser adicionados. Assim como os demais trabalhos da área, os autores utilizam matrizes de demanda para realizar a expansão dos recursos. Os autores também desenvolvem heurísticas, visando a garantir a escalabilidade da solução proposta. As avaliações são realizadas considerando topologia físicas de *backbone* com tamanho variando entre 6 e 24 nós.

O ponto comum dos trabalhos descritos até então reside no emprego de matrizes de demanda para planejar a expansão de redes físicas. No entanto, no contexto de virtualização de redes, as matrizes de demanda observadas em redes de InPs tendem a apresentar uma utilização comparativamente mais homogênea de recursos entre pares de dispositivos físicos. Como consequência de tal homogeneidade, as características topológicas da infraestrutura, desconsideradas nos trabalhos anteriores, passam a apresentar uma importância consideravelmente superior no processo de expansão do que as matrizes de demanda observadas.

Além dos trabalhos mencionados anteriormente, cujo foco é a expansão da capacidade de enlaces em redes de *backbone*, há também soluções recentes que focam no planejamento de redes de *datacenters*. Dentre esses trabalhos, destacam-se as publicações

de Curtis et. al. (CURTIS et al., 2012) e Gao et al. (GAO et al., 2012), que introduzem modelos de otimização e heurísticas aplicados à expansão de tais redes. De forma similar aos trabalhos que focam na expansão de redes de *backbone*, consideram-se a inclusão de equipamentos e/ou o aumento da capacidade de equipamentos já existentes de forma a satisfazer a demanda requerida nas infraestruturas.

Os trabalhos focados no planejamento/expansão de redes de *datacenters* objetivam, em geral, maximizar a capacidade de transmissão de dados simultânea sem interferência entre pares de dispositivos da infraestrutura (largura de banda bisseccional). Os algoritmos desenvolvidos para a expansão de tais redes são, em geral, projetados para topologias específicas (como, por exemplo, topologias baseadas em árvores), o que dificulta (ou mesmo, inviabiliza) a adaptação destes para redes de *backbone*. Ainda que a adaptação fosse possível, a aplicação de tais soluções no contexto de redes de *backbone* traria ineficiência (desperdício) na alocação de recursos, haja visto que existem diferenças entre os objetivos dos modelos de expansão. Diante dessa nova realidade, torna-se um desafio a identificação de regiões do substrato que precisam ser replanejadas para aumentar a probabilidade de acomodar com sucesso novas requisições de redes virtuais.

3.3 Sumário

Neste capítulo, apresentou-se uma visão geral dos principais trabalhos que compõem o estado da arte. Como mencionado na Seção 3.1, os trabalhos relacionados ao problema de mapeamento de redes virtuais utilizam como substrato físico topologias genéricas ou orgânicas, as quais não representam fielmente as propriedades topológicas presentes em infraestruturas de redes de provedores. Ademais, tais trabalhos apresentam normalmente altas taxas de rejeição para o conjunto de requisições de VNs. Diante da possibilidade de expandir infraestruturas físicas como uma estratégia para reduzir as altas taxas de rejeição, a Seção 3.2 explora os principais trabalhos relacionados ao planejamento e expansão de infraestruturas físicas. Tais trabalhos apresentam, como ponto em comum, o emprego de matrizes de demanda para planejar as expansões. No entanto, no contexto de virtualização de redes, as matrizes de demanda observadas tendem a apresentar uma utilização comparativamente mais homogênea de recursos entre pares de dispositivos físicos, o que torna um desafio a identificação de regiões a expandir.

Face às limitações apresentadas nos trabalhos relacionados ao problema de mapeamento de redes virtuais e ao problema de planejamento e expansão de redes, verifica-se a existência de um espaço de pesquisa em aberto em ambos os temas. Relacionado ao problema de mapeamento de redes virtuais, apresenta-se no Capítulo 4 um estudo que objetiva compreender como topologias tipicamente observadas em substratos físicos reais influenciam os diferentes aspectos do mapeamento de redes virtuais. Dessa forma, almeja-se compreender quais características topológicas influenciam diretamente o processo de mapeamento. Diante das constatações apresentadas no Capítulo 4 e, tendo em vista o espaço de pesquisa identificado neste capítulo, o Capítulo 5, concentra-se em apresentar uma estratégia de expansão específica para cenários virtualizados. Diante da nova realidade imposta pela virtualização, o desafio consiste em identificar as regiões do substrato que precisam ser replanejadas para aumentar a probabilidade de acomodar com sucesso novas requisições de redes virtuais.

4 CARACTERIZANDO O IMPACTO DE TOPOLOGIAS NO MAPEAMENTO DE REDES VIRTUAIS

Neste capítulo é apresentado um estudo de caracterização do impacto de topologias físicas no processo de mapeamento de redes virtuais. Mais especificamente, na Seção 4.1, apresenta-se as topologias alvo desse estudo, as quais são tipicamente observadas em provedores de infraestruturas; na Seção 4.2, propõem-se um modelo de mapeamento de redes virtuais considerando restrições típicas de provedores de serviço; por fim, na Seção 4.3, caracteriza-se o impacto de topologias no mapeamento de redes virtuais a partir da aplicação do modelo proposto considerando as topologias físicas mencionadas. Apresenta-se uma análise detalhada do consumo de recursos e da taxa de rejeição para cada topologia considerada, além de indicar as principais causas das rejeições.

4.1 Topologias de Redes de Provedores

No contexto desta dissertação, assumimos, sem perda de generalidade, que provedores de infraestrutura (InPs) apresentam topologias equivalentes àquelas empregadas por provedores de serviços de Internet (ISPs – *Internet Service Providers*). Nesse contexto, as topologias mais tradicionais são: *ladder*, estrela e *hub & spoke (H&S)*. Infraestruturas de rede organizadas em topologia *ladder* têm como principal característica a ausência de *hubs*, isto é, nós com alta conectividade e concentração de fluxo. Além disso, a infraestrutura é formada por um conjunto de *loops*. Esse tipo de topologia tende a possuir um custo baixo no que tange à implantação de enlaces (devido à baixa conectividade) e a apresentar distâncias longas (em termos de número de *hops*) entre nós. Redes *estrela* apresentam poucos *hubs* conectados a um número elevado de nós que, por sua vez, possuem conectividade baixa. Nesse tipo de rede, a distância entre nós tende a ser pequena, porém o tráfego tende a se concentrar nos *hubs*. A classe *H&S* apresenta um número maior de *hubs* em relação às outras topologias mencionadas, e há uma tendência de que esses *hubs* estejam interconectados. Além disso, existe uma grande quantidade de nós que se conecta a um ou mais *hubs*. A Figura 4.1 ilustra exemplos das três topologias recém mencionadas.

Kamiyama et al. (KAMIYAMA et al., 2010) realizaram um estudo em que sistematizam a classificação de infraestruturas de redes de provedores nas três classes de topologias previamente descritas. Para o estudo, foram analisadas 23 redes comerciais de *backbone* (disponíveis publicamente) com tamanhos variando entre 21 e 128 nós. A partir dessa análise, os autores definem um conjunto de métricas, as quais capturam as principais propriedades topológicas presentes nessas infraestruturas. Tais métricas incluem, por exem-

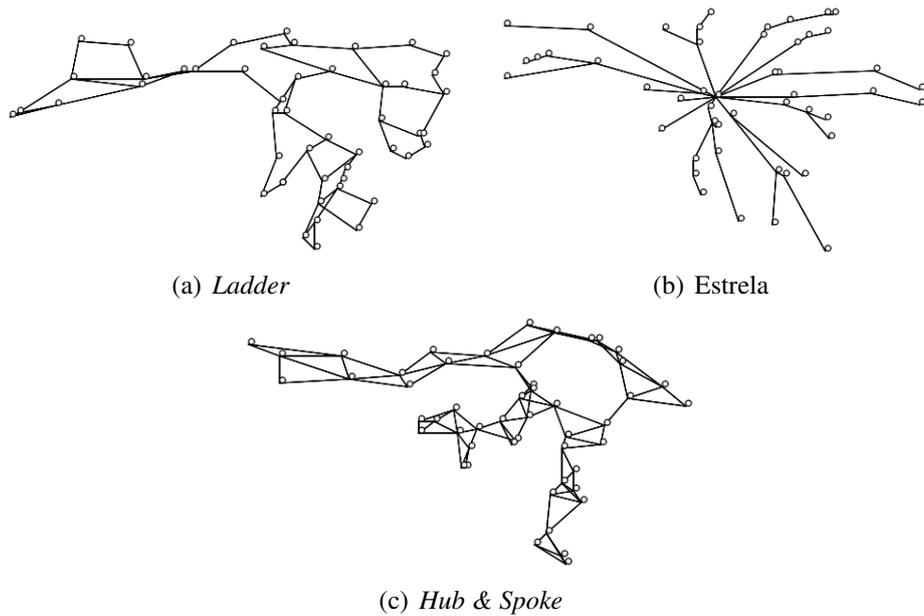


Figura 4.1: Exemplos de classes de topologias de provedores de rede.

plo, o grau de conectividade da topologia e a presença de nós entendidos como *hubs*. Dessa forma, os autores mapeiam a relação entre tais métricas e o tipo de topologia da infraestrutura de rede, permitindo a classificação de topologias de redes de provedores em uma das classes descritas.

Tendo em vista a classificação bem aceita de topologias de redes de provedores recém apresentada e a abordagem sistemática proposta por Kamiyama et al. (KAMIYAMA et al., 2010) para caracterizar e, portanto, gerar essas topologias com elevado grau de fidedignidade (a redes reais), o presente estudo tomará as três classes como base para a investigação. Assim, pretende-se analisar como tais classes topológicas afetam o processo de mapeamento, identificando possíveis relações entre as taxas de rejeição e o consumo de recursos de dispositivos da infraestrutura.

4.2 Modelo Ótimo de Mapeamento de Redes Virtuais

Para analisar o impacto de diferentes tipos de topologias no processo de mapeamento de redes virtuais, formalizamos um modelo baseado em Programação Linear Inteira. A seguir, são detalhadas as entradas, as variáveis e as restrições desse modelo. Letras sobrescritas são usadas para representar se um conjunto ou variável refere-se a recursos virtuais (V) ou físicos (P), ou se está associado a roteadores (R) ou enlaces (L). Ressalta-se que a utilização de um modelo ótimo, neste caso, garante que os resultados não sejam influenciados pela qualidade de possíveis soluções não ótimas (por exemplo, aquelas obtidas por meio de heurísticas). Desta forma, elimina-se possíveis distorções na análise dos resultados obtidos.

A topologia da rede física, bem como a de cada rede virtual requisitada, é representada por um grafo direcionado $N = (R, L)$. Os vértices R representam roteadores, enquanto que cada aresta L representa um enlace unidirecional. Enlaces bidirecionais são representados como um par de arestas em direções opostas (por exemplo, (a, b) e (b, a)). Dessa forma, o modelo permite a representação de quaisquer tipos de topologias físicas e

virtuais.

Cada roteador físico está associado a um identificador de localidade, armazenado no conjunto S^P . Tal permite que requisitantes de redes virtuais indiquem localidades específicas em que certos roteadores virtuais devem ser instanciados (por exemplo, para garantir conectividade entre duas ou mais localidades). Caso um roteador virtual possua requisito de localidade, o mesmo é armazenado no conjunto S^V . A abordagem proposta de marcar roteadores físicos com identificadores de localidades específicas difere dos trabalhos já desenvolvidos (CHOWDHURY; RAHMAN; BOUTABA, 2011; FAJJARI et al., 2011), os quais tratam as restrições de localidade simplesmente como regiões definidas a partir de um raio.

Considera-se que roteadores físicos possuem capacidades limitadas de CPU e memória. Tais capacidades são representadas, respectivamente, por C_i^P e M_i^P . De forma análoga, os requisitos de CPU e de memória de cada roteador virtual de uma rede r são representados por $C_{r,i}^V$ e $M_{r,i}^V$. Enlaces físicos, por sua vez, possuem capacidade limitada de largura de banda, representada por $B_{i,j}^P$, enquanto que a largura de banda requisitada por cada enlace virtual é representada por $B_{r,i,j}^V$.

O modelo recebe requisições e aloca redes virtuais de forma *online*. Por conta disso, é necessário considerar os elementos virtuais já alocados no substrato. Roteadores virtuais previamente alocados são representados pelo conjunto $E_{i,r,j}^R$, e enlaces, pelo conjunto $E_{i,j,r,k,l}^L$. A seguir, apresenta-se um sumário das entradas do modelo proposto.

- $N^P = \{R^P, L^P\}$ – Representa a rede física, composta por um conjunto de roteadores físicos R^P e um conjunto de enlaces físicos L^P .
- $N^V = \{R^V, L^V\}$ – Representa uma requisição de rede virtual, composta por um conjunto de roteadores virtuais R^V e um conjunto de enlaces virtuais L^V .
- $S \in \mathbb{N}$ – Conjunto de todas as possíveis localidades físicas onde roteadores físicos podem residir, representadas por números naturais.
- $S^P \in R^P \times S$ – Indica a localização de roteadores da rede física.
- $S^V \in R^V \times S$ – Indica requisitos de localização de roteadores em requisições de redes virtuais.
- $C_i^P \in \mathbb{N}$ – Indica a capacidade total de CPU de um roteador físico i .
- $M_i^P \in \mathbb{N}$ – Indica a capacidade total de memória de um roteador físico i .
- $B_{i,j}^P \in \mathbb{N}$ – Indica a largura de banda de um enlace físico (i, j) .
- $C_{r,i}^V \in \mathbb{N}$ – Indica a capacidade de CPU exigida por um roteador virtual i de uma rede virtual r .
- $M_{r,i}^V \in \mathbb{N}$ – Indica a capacidade de memória necessária a um roteador virtual i de uma rede virtual r .
- $B_{r,i,j}^V \in \mathbb{N}$ – Indica a largura de banda exigida por um enlace virtual (i, j) de uma rede virtual r .

- $E_{i,r,j}^R \in \{0, 1\}$ – Indica se um roteador virtual j de uma rede virtual r previamente recebida encontra-se alocado no roteador físico i . Em caso positivo, assume o valor 1; caso contrário, assume o valor 0.
- $E_{i,j,r,k,l}^L \in \{0, 1\}$ – Indica se um enlace virtual (k, l) de uma rede virtual r previamente recebida encontra-se alocado no enlace físico (i, j) . Em caso positivo, assume o valor 1; caso contrário, assume o valor 0.

As variáveis do modelo representam a solução ótima do problema de mapeamento para as entradas recebidas. Tais variáveis indicam onde estão alocados, no substrato físico, os roteadores e enlaces virtuais requisitados. Caso uma requisição seja aceita, cada um de seus roteadores é alocado a um roteador físico, enquanto que cada enlace virtual pode ser mapeado a um único enlace físico ou a um caminho composto por múltiplos enlaces.

- $A_{i,r,j}^R \in \{0, 1\}$ – Alocação de roteadores, indica se o roteador físico i está hospedando o roteador virtual j da rede virtual r .
- $A_{i,j,r,k,l}^L \in \{0, 1\}$ – Alocação de enlaces, indica se o enlace físico (i, j) está hospedando o enlace virtual (k, l) da rede virtual r .

Por fim, é apresentada a função objetivo e suas restrições. A função objetivo do modelo visa minimizar a largura de banda consumida pelas redes virtuais alocadas no substrato físico. Ressalta-se que outras funções objetivos poderiam ser consideradas no modelo por meio da alteração da equação correspondente. O propósito de cada restrição será detalhado a seguir.

Objetivo:

$$\min \sum_{(i,j) \in L^P} \sum_{r \in N^V, (k,l) \in L^V} A_{i,j,r,k,l}^L B_{r,k,l}^V$$

Sujeito a:

$$\sum_{r \in N^V, j \in R^V} C_{r,j}^V A_{i,r,j}^R \leq C_i^P \quad \forall i \in R^P \quad (\text{R1})$$

$$\sum_{r \in N^V, j \in R^V} M_{r,j}^V A_{i,r,j}^R \leq M_i^P \quad \forall i \in R^P \quad (\text{R2})$$

$$\sum_{r \in N^V, (k,l) \in L^V} B_{r,k,l}^V A_{i,j,r,k,l}^L \leq B_{i,j}^P \quad \forall (i, j) \in L^P \quad (\text{R3})$$

$$\sum_{i \in R^P} A_{i,r,j}^R = 1 \quad \forall r \in N^V, j \in R^V \quad (\text{R4})$$

$$\sum_{j \in R^V} A_{i,r,j}^R \leq 1 \quad \forall i \in R^P, r \in N^V \quad (\text{R5})$$

$$\sum_{j \in R^P} A_{i,j,r,k,l}^L - \sum_{j \in R^P} A_{j,i,r,k,l}^L = A_{i,r,k}^R - A_{i,r,l}^R \quad \forall r \in N^V, (k, l) \in L^V, i \in R^P \quad (\text{R6})$$

$$jA_{i,r,k}^R = lA_{i,r,k}^R \quad \forall (i, j) \in S^P, r \in N^V, (k, l) \in S^V \quad (\text{R7})$$

$$A_{i,r,j}^R = E_{i,r,j}^R \quad \forall (i, r, j) \in E^R \quad (\text{R8})$$

$$A_{i,j,r,k,l}^L = E_{i,j,r,k,l}^L \quad \forall (i, j, r, k, l) \in E^L \quad (\text{R9})$$

A restrição R1 garante que a capacidade de CPU de cada roteador físico não será excedida, garantindo, portanto, que os requisitos CPU de cada roteador virtual serão atendidos. A restrição R2 aplica o mesmo controle à capacidade de memória dos roteadores, e a restrição R3, à largura de banda dos enlaces. A restrição R4 garante que todo roteador virtual será alocado a um roteador físico. Por sua vez, a restrição R5 impede que múltiplos roteadores virtuais de uma mesma rede virtual sejam alocados a um mesmo roteador físico. A restrição R6 garante que todo enlace virtual será alocado a um caminho físico válido. Dessa forma, o caminho físico hospedando um enlace virtual (a, b) será garantidamente um caminho válido entre o roteador físico hospedando o roteador virtual a e o roteador físico hospedando o roteador virtual b . A restrição R7 garante que todo roteador virtual que possua um requisito de localidade será mapeado a um roteador físico na localidade solicitada. Por fim, as restrições R8 e R9 garantem que os elementos das redes virtuais previamente alocadas continuarão hospedados nos mesmos elementos físicos. A alocação dos roteadores é mantida pela restrição R8, enquanto que a alocação dos enlaces, pela restrição R9.

4.3 Avaliação do Impacto de Topologias no Mapeamento

Para avaliar o impacto de diferentes topologias de rede no processo de mapeamento de redes virtuais, o modelo formalizado na seção anterior foi implementado e executado no *CPLEX Optimization Studio*¹ versão 12.3. Os experimentos foram realizados em uma máquina com quatro processadores AMD Opteron 6276 e 64 GB de memória RAM, usando o sistema operacional Ubuntu GNU/Linux Server 11.10 x86_64.

4.3.1 Carga de Trabalho

Para realizar os experimentos, desenvolveu-se um gerador de requisições de redes virtuais. Tal gerador é executado por um período de 500 unidades de tempo. Em cada unidade, são geradas, em média, cinco requisições, seguindo uma distribuição de Poisson. Cada requisição gerada possui uma duração limitada, ou seja, após um determinado número de unidades de tempo, a mesma é removida. Tal duração é de, em média, cinco unidades de tempo, seguindo uma distribuição exponencial. Ressalta-se que essa forma de instanciação, baseada no emprego de unidades de tempo e com uso dos modelos de chegada de requisições e de duração de redes virtuais previamente citados, vem sendo empregada em trabalhos da área, como nos realizados por Yu et al. (YU et al., 2008) e

¹<http://www-01.ibm.com/software/integration/optimization/cplex-optimization-studio/>

Houidi et al. (HOUIDI et al., 2011).

As topologias utilizadas como substrato físico são geradas por meio da ferramenta IGen². Para gerar redes com as características topológicas das classes previamente apresentadas – *estrela*, *ladder* e *hub & spoke* – são usados, respectivamente, os métodos *Mentor*, *MultiTour* e *TwoTree*. Em linha com a caracterização de topologias apresentada anteriormente na Seção 4.1, na rede *ladder* os nós apresentam grau médio 3 e grau máximo normalizado igual a 4. A rede *estrela* possui uma proporção de nós altamente interconectados (*hubs*) menor que 0,25, enquanto que a rede *hub & spoke* apresenta uma proporção maior ou igual a 0,25. Tal proporção é definida como o número de nós com grau maior que o grau médio, dividido pelo total de nós da rede. Além dessas propriedades topológicas, as redes físicas possuem 50 roteadores, cada um com capacidade total de CPU definida como 100%, e 256 MB de memória. Os roteadores são distribuídos uniformemente entre 16 localidades e a largura de banda dos enlaces físicos é distribuída uniformemente entre 1 e 10 Gbps.

A topologia de cada rede virtual é gerada por meio da ferramenta BRITE³, usando o modelo Barabási-Albert (BA-2) (ALBERT; BARABÁSI, 2000). Acredita-se que tal modelo é capaz de representar adequadamente as características de requisições de redes virtuais, uma vez que tal modelo propicia a síntese de topologias de rede com características orgânicas. Além disso, ressalta-se que o uso das classes de topologias típicas de provedores, nesse caso, poderia levar a uma redução artificial nas taxas de rejeição devido à similaridade entre as redes virtuais e a rede física. As redes virtuais possuem entre 2 e 5 roteadores cada. Roteadores virtuais requerem entre 10% e 50% de CPU e entre 24 MB e 128 MB de memória, ambos parâmetros seguindo uma distribuição uniforme. A largura de banda dos enlaces virtuais é distribuída uniformemente entre 1 e 5 Gbps. Foram realizados dois cenários de avaliação sobre cada topologia física, os quais se diferenciam pela presença ou ausência de requisitos de localidade. No primeiro cenário, cada rede virtual possui dois roteadores (os *end points* dessa rede) com requisitos de localidade, gerados aleatoriamente entre as 16 localidades existentes. No outro, nenhuma rede virtual possui tais requisitos. Foram executadas 30 repetições de cada experimento, considerando como base diferentes instâncias para cada tipo de substrato.

4.3.2 Resultados

Primeiramente, analisa-se a taxa de rejeição de requisições de redes virtuais nos cenários previamente descritos. Ressalta-se que requisições de redes virtuais somente são rejeitadas caso não seja possível mapear todos os seus roteadores e enlaces virtuais no substrato físico. A Figura 4.2 ilustra a taxa média de rejeição obtida em cada cenário. Cada ponto no gráfico representa a taxa média de rejeição alcançada desde o início do experimento até a unidade de tempo em questão. Observa-se claramente que, quando há restrições de localidade, as taxas de rejeição são substancialmente maiores (variando entre 65,38% e 83,71%), nas três topologias físicas, em relação aos cenários em que não há tais requisitos (nos quais variam entre 0,53% e 43,10%). O comportamento apresentado é influenciado pela redução no espaço de soluções factíveis causada pela presença de restrições de localidade.

Ainda observando o gráfico ilustrado na Figura 4.2, percebe-se uma diferença nas

²<http://igen.sourceforge.net/>

³<http://www.cs.bu.edu/brite/>

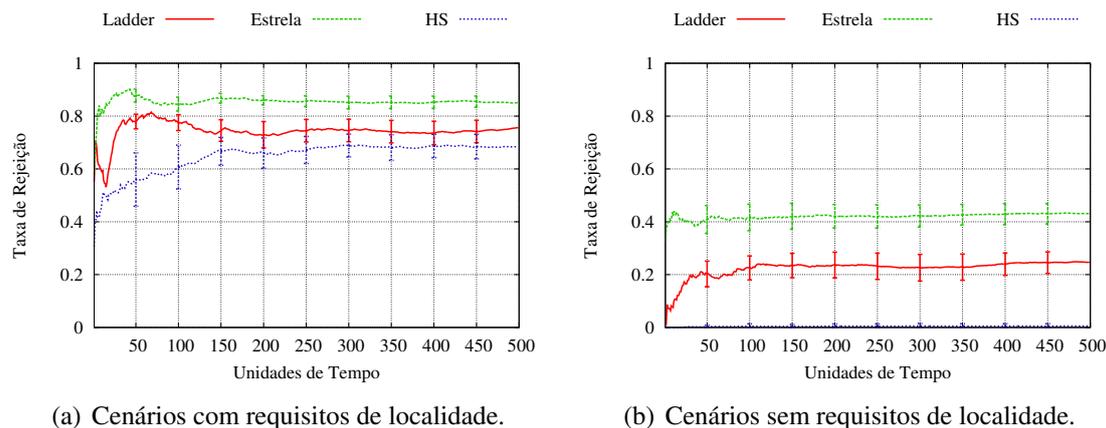


Figura 4.2: Porcentagem média de requisições rejeitadas nos experimentos realizados.

taxas de rejeição ao se utilizar diferentes topologias físicas. A topologia do tipo *hub & spoke* apresenta uma taxa de rejeição inferior às demais em ambos cenários avaliados (68,44% no cenário com restrições de localidade e 0,53% no cenário sem tais restrições). Em contrapartida, a topologia *estrela* apresenta o pior desempenho (85,04% de rejeição no cenário com localidade e 43,10% no cenário sem localidade). A topologia *ladder* apresenta taxas de rejeição de 75,63% e 24,66% para os cenários com localidade e sem localidade, respectivamente. Topologias do tipo *hub & spoke* tendem a causar a rejeição de um número menor de requisições, por possuírem, em média, um número maior de nós com alto grau de conectividade (*hubs*). A presença de múltiplos *hubs* leva a uma menor probabilidade de que o esgotamento dos recursos de um desses nós centrais cause um impacto significativo nos mapeamentos de requisições futuras. Ao contrário, topologias *estrela* apresentam poucos nós centrais, e por isso, há uma grande probabilidade de que tais nós se tornem um gargalo no processo de alocação de redes virtuais à medida em que ocorre o esgotamento de seus recursos. Já em redes da classe *ladder*, como não há nós centrais, o esgotamento de recursos de alguns enlaces físicos pode impossibilitar a criação de enlaces virtuais que utilizariam tais caminhos como “pontes” para interconectar determinados pontos da infraestrutura.

A Figura 4.3 ilustra a sobrecarga média dos mapeamentos de redes virtuais em cada experimento. Tal sobrecarga é medida como a razão entre a largura de banda efetivamente consumida por uma rede virtual hospedada no substrato físico e a largura de banda requisitada por tal rede. Em geral, o consumo real de largura de banda é maior do que a largura de banda total requisitada pelas redes virtuais, devido à frequente necessidade de alocar enlaces virtuais a caminhos compostos por múltiplos enlaces físicos. Somente não há sobrecarga quando cada enlace virtual é mapeado a apenas um enlace físico (razão 1,0). Ressalta-se que taxas menores de sobrecarga favorecem diretamente o provedor da infraestrutura, por economizar recursos que podem ser usados para acomodar requisições futuras. Além disso, tal economia pode levar a custos mais baixos para os solicitantes. Topologias do tipo *ladder* causam uma sobrecarga média maior em relação às demais (94,59% para cenários com localidade e 23,36% para cenários sem localidade), já que a estrutura topológica apresenta, em média, uma distância longa (em termos de número de *hops*) entre nós, bem como a ausência de (*hubs*) centrais. A topologia da classe *hub & spoke* apresenta a menor taxa de sobrecarga (64,67% para o cenário com localidade),

por ser uma topologia com maior quantidade de interconexões e *hubs*. No cenário sem localidade (Figura 4.3(b)), nota-se que a sobrecarga média obtida nas infraestruturas *ladder* e *estrela* é similar – 23,36% e 21,92%, respectivamente – enquanto que a taxa obtida considerando-se a topologia *hub & spoke* é de apenas 1,89%. Isso evidencia que, quando consideradas restrições de localidade, enlaces virtuais tendem a ser mapeados a caminhos mais longos no substrato, devido a uma maior distância média entre os locais onde roteadores virtuais são hospedados. No entanto, topologias que contam com uma maior quantidade de *hubs* tendem a reduzir o impacto dessas restrições.

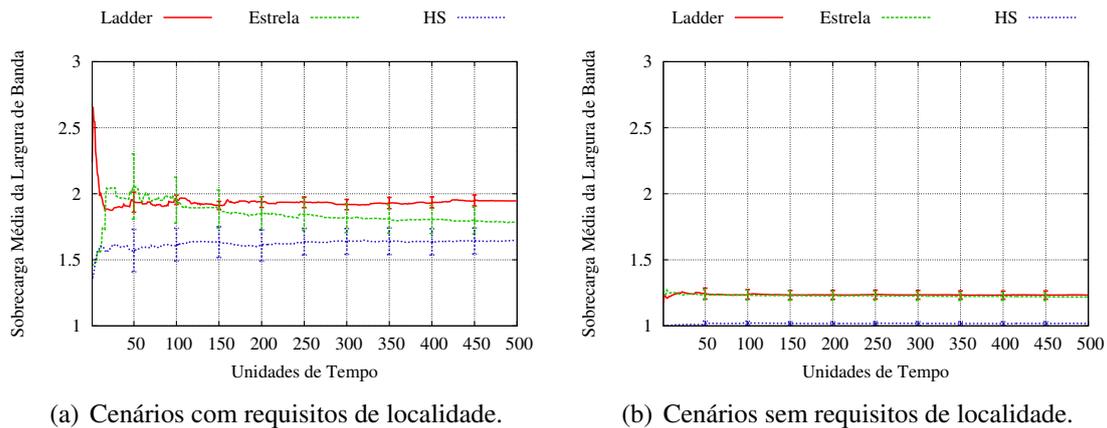


Figura 4.3: Sobrecarga média de largura de banda necessária para acomodar as requisições aceitas.

A seguir, avalia-se o consumo médio dos recursos físicos – CPU e memória dos roteadores e largura de banda dos enlaces – nos experimentos realizados. A Figura 4.4 apresenta o consumo médio de CPU dos roteadores físicos da infraestrutura. Considerando requisitos de localidade, nota-se que o consumo médio de CPU ao se empregar a topologia do tipo *ladder* (11,49%) é aproximadamente duas vezes maior que o consumo médio no experimento que utiliza a topologia do tipo *estrela* (5,36%). A topologia *hub & spoke* levou o consumo médio de CPU nos roteadores físicos a 16,82%. Nos experimentos em que não há requisitos de localidade (Figura 4.4(b)), nota-se um consumo de CPU maior, sendo consumido, em média, 23,80% dos recursos na topologia *estrela*, 35,22% na topologia *ladder* e 38,60% na topologia *hub & spoke*. O maior consumo dos recursos de CPU é diretamente influenciado pela quantidade de redes virtuais alocadas no substrato. Isso explica o consumo mais elevado nos cenários que não consideram localidade, visto que nesses casos a taxa de rejeição é mais baixa. No entanto, o consumo relativamente baixo de CPU, cuja média geral é inferior a 40% em todos os experimentos, mostra que a rejeição de redes virtuais não é causada pela exaustão dos recursos de CPU dos roteadores da topologia de maneira global.

A Figura 4.5 apresenta o consumo médio de memória nos roteadores físicos. Percebe-se que o comportamento da utilização de memória dos roteadores é similar ao da utilização de CPU. Nos experimentos que consideram requisitos de localidade, a utilização média de memória é de 5,65% na topologia *estrela*, 11,21% na topologia *ladder* e 15,93% na topologia *hub & spoke*. Já os experimentos em que não há tais requisitos levam a uma utilização média de 23,49% na topologia *estrela*, 35,52% na topologia *ladder* e 38,03% na topologia *hub & spoke*. Nota-se que em nenhum dos experimentos ocorre o esgota-

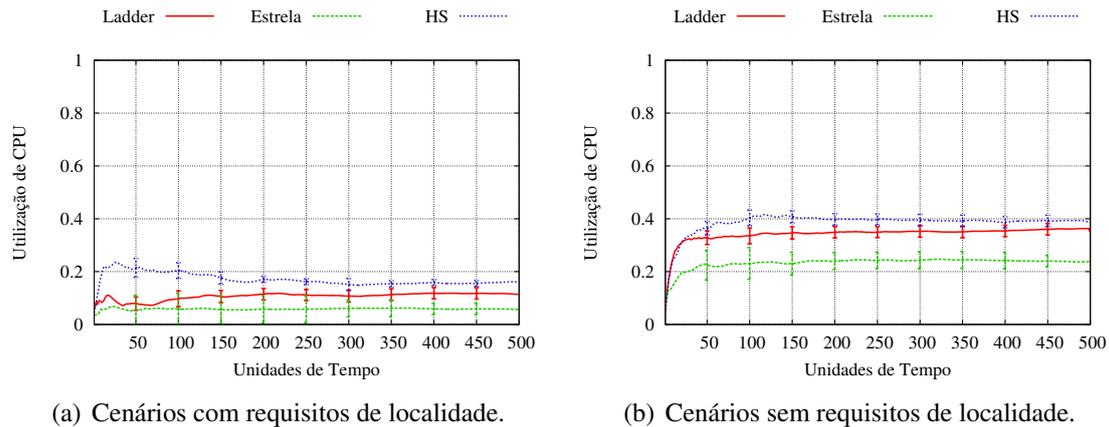


Figura 4.4: Utilização média de CPU dos roteadores físicos.

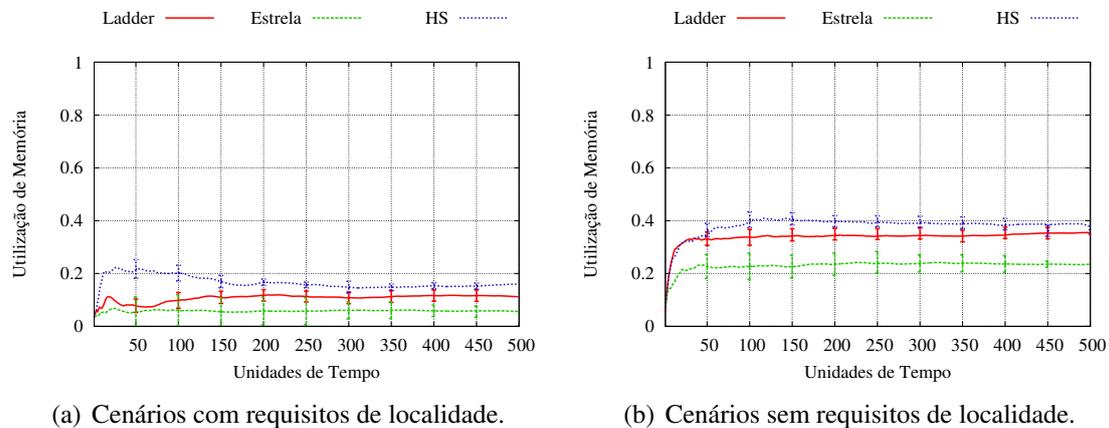


Figura 4.5: Utilização média de memória dos roteadores físicos.

mento desse recurso, podendo-se afirmar que tal fator, bem como o uso de CPU, não é a causa da rejeição de redes virtuais nesses cenários.

O consumo médio da largura de banda dos enlaces das infraestruturas é apresentado na Figura 4.6. Nos experimentos em que as redes virtuais possuem requisitos de localidade, há uma utilização de 18,01% dos recursos da topologia *estrela*, 40,63% da topologia *ladder* e 35,89% da topologia *hub & spoke*. Já nos experimentos sem restrições de localidade o consumo médio é de 44,93% na topologia *estrela*, 66,50% na topologia *ladder* e 54,08% na topologia *hub & spoke*. Tais resultados demonstram que, assim como o consumo de CPU e memória dos roteadores físicos, o consumo geral da largura de banda disponível na topologia não é a causa das taxas de rejeição observadas nos experimentos. A saturação de alguns pontos específicos das topologias faz com que não seja possível alocar um número maior de redes virtuais, ainda que uma visão global da rede revele que ainda há recursos disponíveis.

Para melhor compreender as taxas de rejeição observadas nos experimentos realizados, a Figura 4.7 ilustra a utilização média dos recursos de roteadores com diferentes graus de conectividade nos cenários que empregam a topologia *hub & spoke*. A média é calculada sobre as 100 últimas unidades de tempo (após a estabilização das taxas de rejeição), e normalizada em relação ao roteador com maior taxa de utilização. Nota-se

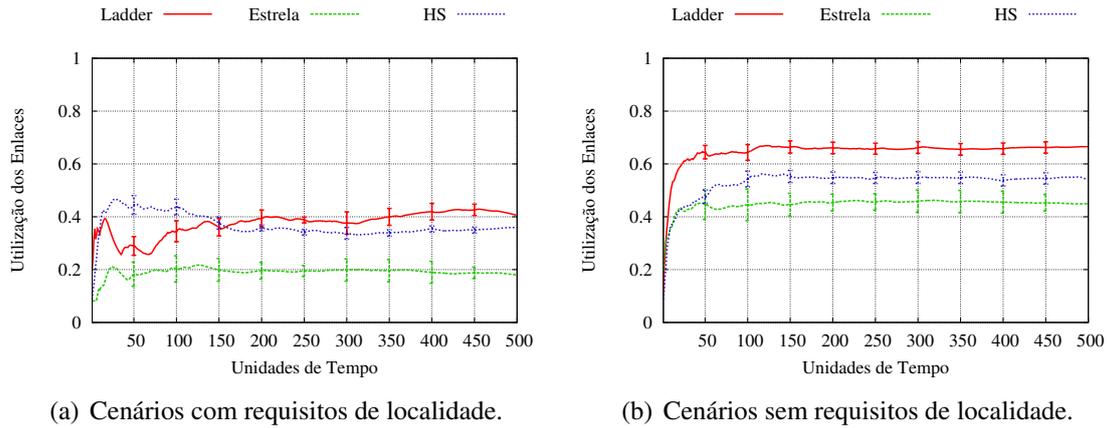


Figura 4.6: Utilização média de largura de banda dos enlaces físicos.

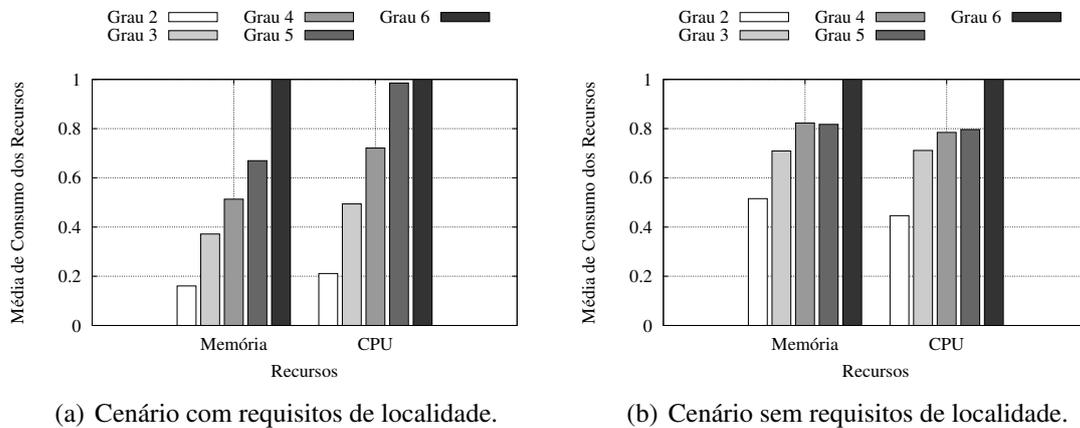


Figura 4.7: Consumo médio dos recursos de roteadores físicos com diferentes graus de conectividade nos cenários que empregam a topologia *hub & spoke*.

uma relação clara entre o grau de conectividade e a utilização de CPU e memória dos roteadores físicos, evidenciando o fato de que os recursos dos roteadores com maiores graus de conectividade (*hubs*) são consumidos em uma proporção mais alta. Essa relação é ainda mais acentuada quando as redes virtuais possuem requisitos de localidade. Os resultados evidenciam a importância da presença de *hubs* na topologia física, e mostram como a exaustão de recursos em pontos específicos da rede de um provedor pode exacerbar a rejeição de requisições. Ressalta-se que fenômenos semelhantes de consumo são observados nas topologias estrela e *ladder* (em maior e menor escala, respectivamente), porém os resultados são omitidos por limitação de espaço.

Topologias de rede de ISPs podem apresentar diferentes graus de conectividade e, devido ao esgotamento de recursos em regiões específicas do substrato (por exemplo, enlaces conectados a *hubs* ou pontes), o particionamento da infraestrutura acontece em diferentes níveis. Nesse contexto, uma partição é definida como um componente fortemente conexo (CFC) com largura de banda residual igual ou maior que a largura de banda média dos enlaces requisitados pelas VNs. Observa-se que, em cenários com requisitos de localidade, topologias em estrela apresentam 13,60 partições com uma média de 3,63 roteadores por componente, enquanto que topologias *ladder* apresentam, em mé-

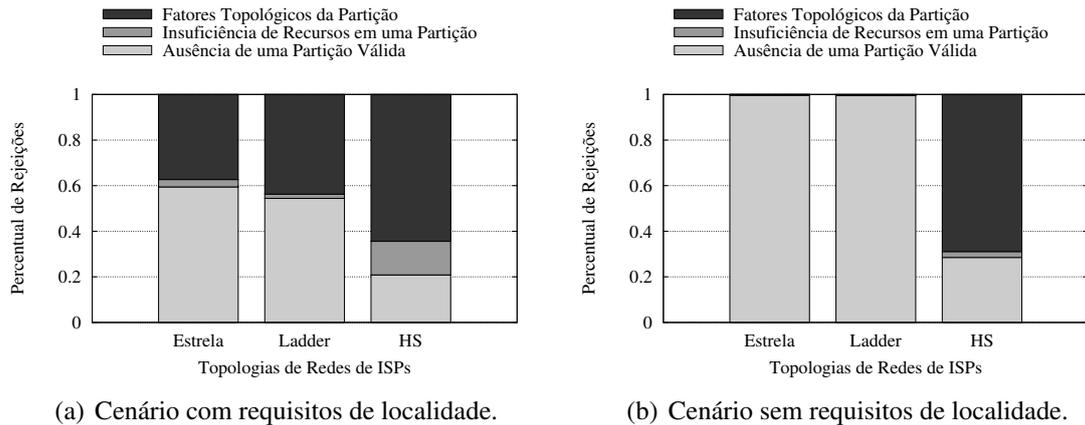


Figura 4.8: Percentual médio das causas de rejeição observadas em todos os experimentos.

dia, 12,30 partições com 4,38 roteadores por componente. Por sua vez, topologias *hub & spoke* apresentam um baixo nível de particionamento e um alto número de roteadores por componente, isto é, 7,22 partições e 7,52 roteadores, respectivamente. Em cenários sem requisitos de localidade, os níveis de particionamento da infraestrutura são maiores devido ao alto consumo de largura de banda. Topologias em estrela e *ladder* apresentam níveis de particionamento similares; em média, 19,20 e 19,67 partições com 2,61 e 2,48 roteadores por componente, respectivamente. Topologias *hub & spoke* apresentam, em média, 12,65 partições e 3,94 roteadores por componente. A seguir, analisa-se como este e outros fatores influenciam nas taxas de rejeição observadas.

A Figura 4.8 apresenta os resultados referentes as causas de rejeição observadas nos experimentos realizados. Foram observadas três principais causas de rejeição: a ausência de uma partição válida, a insuficiência de recursos em uma partição e fatores topológicos da partição. A primeira causa está relacionada com a indisponibilidade de uma partição adequada na infraestrutura com tamanho igual a ou maior do que o número de roteadores virtuais solicitados. Isto significa que não é possível mapear a requisição de VN na topologia devido à falta de conectividade entre os roteadores físicos. Em outras palavras, não há nenhum componente CFC que, para cada par (a, b) de roteadores, existe um caminho entre “a” e “b” com a largura de banda maior do que ou igual à largura de banda máxima requerida. Em cenários com requisitos de localidade, 59,45% das rejeições em topologias estrela, assim como 54,44% em topologias *ladder* são causados por este tipo de falta de conectividade. Em cenários sem requisitos de localidade, 99,63% das rejeições em topologias estrela e 99,47% das rejeições em topologias *ladder* são associadas à esta causa. Em topologias *hub & spoke*, as rejeições associadas à esta causa somam 20,85% em cenários com requisitos de localidade e 28,50% em cenários sem tais requisitos. Esses resultados apontam para uma correlação direta entre os altos níveis de particionamento e as altas taxas de rejeição.

A segunda causa – a insuficiência de recursos em uma partição – ocorre quando existe uma partição válida (isto é, existe um CFC com tamanho suficiente para mapear todos os roteadores virtuais requisitados), mas não é possível realizar o mapeamento devido ao esgotamento dos recursos dos roteadores físicos (CPU e memória) dentro de uma partição. Em cenários com requisitos de localidade, as rejeições causadas por insuficiência

de recursos nos roteadores são de 3,2%, 1,8% e 14,7% para as topologias estrela, *ladder* e *hub & spoke*, respectivamente. Em cenários sem tais requisitos, esses percentuais são, respectivamente, 0,33%, 0,37% e 2,58%. Topologias em estrela e *ladder* apresentam percentuais similares em ambos os cenários. Em cenários sem requisitos de localidade, um número insignificante de VNs são rejeitadas devido a essa causa, já que a principal causa da rejeição está relacionada aos altos níveis de particionamento. Em topologias do tipo *hub & spoke*, quando consideradas restrições de localidade, o percentual de VNs rejeitadas associadas a esta causa é maior em comparação às demais topologias. Este comportamento está relacionado com o baixo percentual de redes rejeitadas associadas à ausência de uma partição válida na topologia, o que leva a um maior consumo de recursos dos roteadores físicos.

A terceira causa das rejeições de requisições refere-se à VNs que foram negadas apesar da existência de uma partição adequada e da disponibilidade de recursos nos roteadores físicos. Neste caso, as rejeições são resultado de fatores topológicos dentro de uma partição, os quais inviabilizam o mapeamento de uma requisição. Isto ocorre quando as restrições de localidade não são satisfeitas ou quando VNs requisitam uma topologia significativamente diferente da topologia disponível na partição. Nessa última situação, uma grande quantidade de recursos (largura de banda) é necessária para mapear tal requisição, o que pode estar indisponível. Quando requisitos de localidade são considerados, topologias estrela e *ladder* apresentam, respectivamente, 37,30% e 43,71% das rejeições associadas a fatores topológicos. Em cenários sem requisitos de localidade, esses percentuais são de 0,04% e 0,15%, respectivamente. Rejeições relacionadas a fatores topológicos em topologias *hub & spoke* atingem 64,39% em cenários com requisitos de localidade e 68,90% em cenários sem tais requisitos. Ao analisar as rejeições associadas a esta causa, topologias estrela e *ladder* apresentam um comportamento semelhante, já que os níveis de particionamento e as taxas de rejeição são similares em ambas as topologias. No entanto, existem diferenças mínimas, que podem ser explicada por fatores topológicos, tais como a ausência de nós *hub* em topologias *estrela*. Em topologias *hub & spoke*, no entanto, os fatores topológicos representam a causa mais significativa das taxas de rejeição. Embora este tipo de topologia apresente uma conectividade maior em relação às demais, a rejeição de um menor número de VNs leva ao consumo maior de largura de banda nos enlaces físicos, o que leva a uma redução da conectividade dentro de partições da infraestrutura.

Por fim, na Figura 4.9 apresenta-se o tempo médio necessário para encontrar a alocação ótima de cada requisição aceita. Ressalta-se que, nesse caso, o eixo vertical é apresentado em escala logarítmica, visto que há uma diferença significativa nos resultados de diferentes experimentos. Em todos os cenários com requisitos de localidade, o tempo necessário para a alocação nas topologias avaliadas permanece abaixo de 1 segundo. O emprego da topologia *estrela* leva a, em média, um tempo de 0,055 segundos, a topologia *ladder*, a um tempo médio de 0,20 segundos e a topologia *hub & spoke*, um tempo de 0,44 segundos. Nos demais cenários, em que não há restrições de localidade, as médias gerais permanecem abaixo de 3 segundos. A topologia *estrela* leva a, em média, um tempo de 0,13 segundos, a topologia *ladder* a um tempo médio de 0,92 segundos e a topologia *hub & spoke* a um tempo de 2,41 segundos.

As médias de tempo relativamente altas observadas nos cenários que consideram a topologia do tipo *hub & spoke* devem-se à maior quantidade de enlaces presentes nessa topologia. Tal característica leva a um conjunto maior de possíveis mapeamentos para as

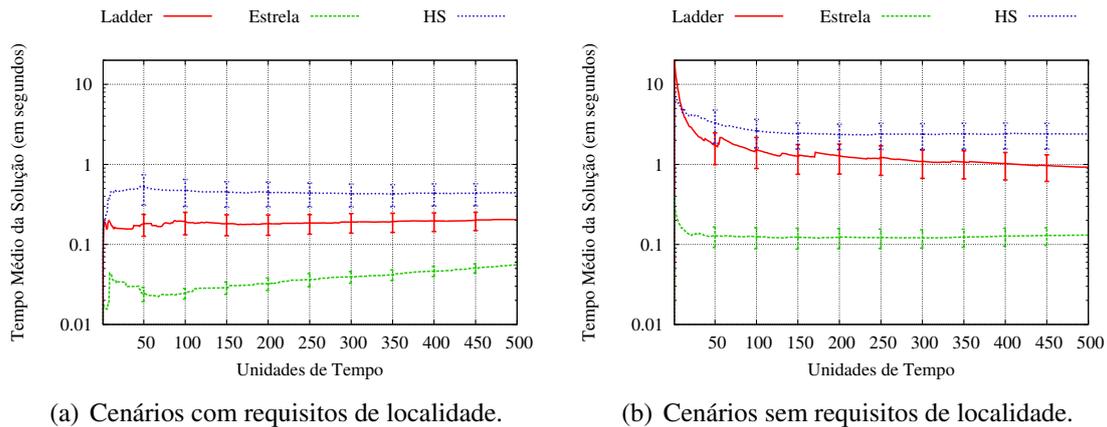


Figura 4.9: Tempo médio necessário para encontrar a alocação ótima.

redes virtuais requisitadas, o que tende a aumentar o tempo necessário para encontrar a alocação ótima. De forma similar, a desconsideração de requisitos de localidade também leva a um maior espaço de soluções factíveis, o que explica as médias de tempo mais elevadas observadas nos cenários que possuem tal característica. Além disso, notam-se alguns picos no início dos experimentos, chegando a um máximo de 24,81 segundos no cenário em que é usada a topologia *ladder*, e 9,99 segundos no cenário em que emprega-se a topologia *hub & spoke*. Tal comportamento deve-se à maior quantidade de recursos disponíveis no início dos experimentos (quando as redes físicas encontram-se com uma grande quantidade de recursos disponíveis), o que também amplia as possibilidades de arranjo de redes virtuais nos substratos.

Os resultados apresentados mostram que há um impacto significativo na taxa de rejeição e no consumo dos recursos físicos das infraestruturas ao se utilizar diferentes classes de topologias de rede para a alocação de redes virtuais. A estrutura topológica exerce um impacto ainda maior ao se considerarem requisitos de localidade nas requisições de redes virtuais. Tais casos evidenciam que as rejeições de redes virtuais requisitadas não são causadas pelo esgotamento de recursos da infraestrutura, mas sim por fatores relacionados a determinadas características topológicas.

O principal fator que influencia a rejeição de redes virtuais é o esgotamento de recursos em regiões pontuais do substrato. Por exemplo, em topologias do tipo *estrela* e *hub & spoke*, em geral, o esgotamento dos recursos físicos dos *hubs*, além dos enlaces conectados aos mesmos, consiste na principal causa da impossibilidade de se mapear novas redes virtuais. Em topologias da classe *ladder*, em que não há *hubs*, a principal causa do aumento de requisições rejeitadas é o esgotamento dos recursos de enlaces específicos da topologia. Enlaces entendidos como “pontes” na infraestrutura podem se tornar gargalos e, se os recursos de um de tais enlaces se esgotam, a infraestrutura é particionada em dois grupos de roteadores sem conectividade entre si.

Em resumo, mapeamentos de redes virtuais em topologias *estrela* apresentam baixo tempo de resolução, porém alta taxa de rejeição e, por consequência, baixa utilização dos recursos físicos. Em topologias *ladder*, a taxa de rejeição e o tempo de resolução apresentam valores intermediários em relação às demais classes de topologias consideradas, porém o mapeamento de redes virtuais leva a um consumo maior de largura de banda. Por fim, topologias do tipo *hub & spoke* apresentam baixas taxas de rejeição e de sobrecarga

média dos enlaces, porém levam a tempos de resolução mais altos em relação às demais topologias.

4.4 Sumário

Neste capítulo, realizou-se a caracterização do impacto do mapeamento de redes virtuais considerando diferentes topologias físicas. Inicialmente, sistematizou-se as principais características presentes nas topologias de rede de ISPs. A partir dessa sistematização, foi possível gerar sinteticamente topologias que apresentassem as mesmas propriedades observadas. Posteriormente, um modelo de alocação de redes virtuais foi proposto, o qual foi extensivamente avaliado sobre as diferentes topologias de ISPs. Dessa forma, caracterizou-se o modelo de mapeamento de redes virtuais em topologias reais quanto à taxa de rejeição, o consumo de recursos físicos e às principais causas das rejeições em cada cenário.

Como mencionado, observa-se nos experimentos que há um impacto significativo na taxa de rejeição e no consumo dos recursos físicos das infraestruturas ao se utilizar diferentes classes de topologias de rede para a alocação de redes virtuais. Além disso, grande parte das rejeições acontece em situações em que há uma grande quantidade de recursos disponíveis (de maneira global), mas alguns pontos já saturados acabam inviabilizando o mapeamento de novas requisições. Os resultados indicam, ainda, que um grande percentual de requisições rejeitadas está relacionada aos altos níveis de particionamento das infraestruturas físicas, o que diretamente leva a níveis altos de fragmentação de recursos físicos.

No Capítulo 5 propõe-se uma estratégia embasada na reconexão de componentes fortemente conexos (partições) para sugerir ajustes na infraestrutura física que levem a um aumento nas taxas de aceitação. Tal estratégia tem como objetivo promover a reconexão de partições recorrentes, favorecendo a acomodação de um maior número de redes virtuais a longo prazo.

5 RECONECTANDO PARTIÇÕES DE INFRAESTRUTURAS FÍSICAS: UMA ESTRATÉGIA DE EXPANSÃO PARA O MAPEAMENTO EFICIENTE DE REDES VIRTUAIS

Neste capítulo é apresentada uma estratégia de expansão aplicada às redes de InP que favorece o mapeamento de um maior número de redes virtuais a longo prazo. Baseado nos resultados apresentados no Capítulo 4, em especial aqueles relacionados ao consumo de recursos e às causas das rejeições, propõem-se uma estratégia baseada na reconexão de componentes fortemente conexos das infraestruturas físicas. Mais especificamente, na Seção 5.1, procura-se confirmar a hipótese de que a utilização de matrizes de demanda não é adequada para planejar a expansão de infraestruturas virtualizadas, haja visto a distribuição comparativamente mais homogênea do consumo de recursos entre os pares de demanda. Na Seção 5.2 formaliza-se o problema de expansão de redes de InP e propõe-se uma estratégia de resolução heurística. Por fim, na Seção 5.3, um conjunto extensivo de experimentos é apresentado a fim de observar aspectos como ganhos em taxa de aceitação e no aproveitamento dos recursos físicos das infraestruturas.

5.1 Matrizes de Demanda em Ambientes Virtualizados

Uma matriz de demanda representa a quantidade de fluxo entre pares de dispositivos de uma determinada infraestrutura. Em infraestruturas tradicionais (isto é, sem suporte à virtualização de redes), conhece-se *a priori* quais pares de dispositivos requerem uma maior quantidade de recursos (como, por exemplo, largura de banda). No entanto, acredita-se que matriz de demanda observada como resultado da criação de *slices* em redes de InPs tende a apresentar uma distribuição comparativamente mais homogênea de recursos entre pares de dispositivos físicos. Tal advém do fato de que elementos de redes virtuais, em geral, podem ser hospedados em (praticamente) qualquer dispositivo físico com recursos suficientes disponíveis. Visto que a localidade de dispositivos físicos possui pouca influência no processo de mapeamento de redes virtuais, não é possível identificar gargalos de forma tão clara.

Como a premissa recém apresentada representa um elemento fundamental para a estratégia proposta, julgou-se importante confirmá-la. Para tal, foram executados uma série de experimentos. Primeiramente, para analisar a matriz de demanda de infraestruturas tradicionais, um conjunto de requisições de VNs foi mapeada na infraestrutura física (seguindo o modelo proposto na Seção 4.2). Para tanto, considera-se que as requisições apresentam restrições de localidade estrita, isto é, todos os roteadores solicitados apre-

sentam restrições relacionadas à localidade dos mapeamentos. Dessa forma, o comportamento observado em redes tradicionais (por exemplo, redes de ISPs) relacionado com a chegada de requisições em pontos específicos da infraestrutura é reproduzido. Para analisar a matriz de demanda de infraestruturas com suporte à virtualização de redes, o mesmo conjunto de requisições mapeadas na infraestrutura tradicional é mapeada em uma infraestrutura virtualizada desconsiderando todas as restrições estritas de localidade. Dessa forma, os roteadores virtuais que antes necessariamente precisavam ser mapeados em pontos específicos da infraestrutura, podem ser mapeados, potencialmente, em qualquer ponto da infraestrutura (desde que haja recursos disponíveis). Ressalta-se que, em ambos os experimentos, o mesmo número de requisições foi mapeado nas infraestruturas, assim como cada requisição demandou a mesma quantidade de recursos físicos. Ainda, destaca-se que os cenários avaliados representam casos extremos (por exemplo, redes virtuais nem sempre podem ser mapeadas desconsiderando a localidade), mas mesmo assim, conseguem expressar de maneira fidedigna o comportamento esperado.

A Figura 5.1 ilustra, para cada cenário (infraestrutura tradicional e infraestrutura virtualizada), a distribuição da demanda em relação aos pares de dispositivos físicos. Os valores da matriz de demanda da infraestrutura tradicional são normalizados em relação ao cenário com suporte à virtualização e ordenados em ordem crescente. Em infraestruturas tradicionais, em função das demandas serem relacionadas com a localidade, existem regiões na infraestrutura com maior consumo que as demais. Já em cenários virtualizados, como há a possibilidade de realizar mapeamentos em qualquer dispositivo físico, o consumo de recursos tende a ser mais homogêneo. A Figura revela que 15 pares de demanda origem-destino apresentam demandas superiores ao consumo observado em infraestruturas virtualizadas (variando de 1,01 a 4,39 vezes maior), 27 pares apresentam demandas iguais e, o restante (93 pares), apresentam demandas inferiores (variando de 0 a 0,97 vezes menor). Assim, a Figura evidencia que a distribuição de recursos entre os pares de demanda tende a ser não homogêneo em cenários tradicionais, dificultando assim, a adequação de estratégias clássicas de expansão (baseada em matrizes de demanda) para as infraestruturas virtualizadas.

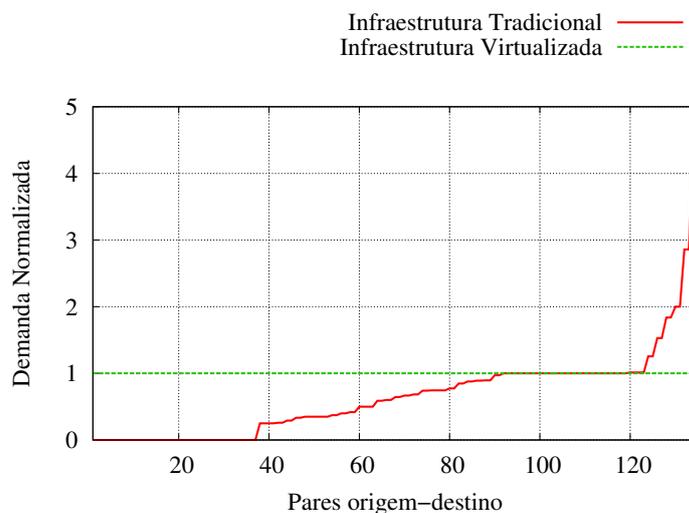


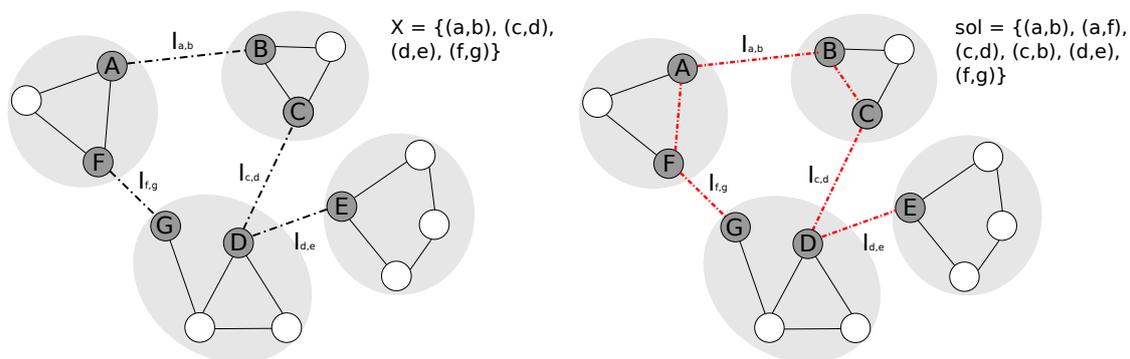
Figura 5.1: Matriz de demanda de infraestruturas tradicionais vs. Matriz de demanda de infraestruturas com suporte à virtualização de redes.

5.2 Expansão de Redes de InP para o Mapeamento de Redes Virtuais

Nesta seção, descreve-se o problema de expansão de redes de InP e formaliza-se um modelo baseado em Programação Linear Inteira. Após, apresenta-se uma solução algorítmica para o modelo.

5.2.1 Visão Geral do Problema

Uma das principais causas de rejeições de redes virtuais no contexto do problema de mapeamento de redes virtuais é a ausência de uma partição adequada na infraestrutura física (LUIZELLI et al., 2013). As partições podem ser entendidas como conjuntos isolados entre si de roteadores. A sua ocorrência está diretamente relacionada ao esgotamento total (ou quase total) dos recursos disponíveis em dispositivos específicos (*e.g.*, pontes ou *hubs*) da infraestrutura no processo de mapeamento. Com a variação na utilização (alocação/reserva) dos recursos físicos, há também variações no conjunto de partições e, consequentemente, nos dispositivos que pertencem a cada partição. Dessa forma, faz-se necessário identificar os elementos que mais impactam nos particionamentos, isto é, elementos que em situação de consumo total passam a particionar a infraestrutura. A Figura 5.2 (a) ilustra o estado de uma infraestrutura física com, momentaneamente, quatro partições, representadas pelos círculos em tom claro. Na Figura, enlaces que foram identificados como elementos particionadores ao longo de consecutivos mapeamentos de redes virtuais – (a, b) , (c, d) , (d, e) e (f, g) – são representados por linhas hachuradas.



(a) Identificação dos enlaces de corte, armazenados em X . (b) Solução baseada no conceito de reconexão dos enlaces de corte. Em destaque, os elementos a serem expandidos.

Figura 5.2: Aplicação da estratégia proposta na infraestrutura física.

Partindo-se da constatação de que o particionamento é uma das grandes causas de rejeições de redes virtuais e observando que a infraestrutura física, por uma perspectiva global, apresenta uma grande quantidade de recursos disponíveis, propomos, como estratégia de expansão de redes de InPs, a reconexão de partições que historicamente levam a altos níveis de fragmentação de recursos (partições recorrentes). Dessa forma, os elementos antes considerados para a expansão de infraestruturas (matrizes de demanda) deixam de ser considerados e os fatores topológicos passam a ser empregados no processo de decisão. O processo de expansão de redes é sujeito a algumas restrições dos provedores como, por exemplo, o número de elementos a serem expandidos e o capital disponível. Nesse contexto, busca-se investigar quais elementos físicos de redes de InPs (priorizados de acordo com características topológicas relevantes como, por exemplo, enlaces de

corde) precisam ser replanejados objetivando a reconexão das partições mais recorrentes. A Figura 1(b) ilustra a solução baseada na reconexão de partições, na qual é possível perceber o fortalecimento estrutural (*i.e.*, onde os investimentos de expansão serão feitos) do caminho composto por múltiplos enlaces – (g, f) , (f, a) , (a, b) , (b, c) , (c, d) e (d, e) – e roteadores – (a, b, c, d, e, f, g) – interconectando as principais regiões da infraestrutura. Espera-se que a estratégia proposta seja utilizada com uma certa periodicidade (*e.g.*, a cada seis meses ou a cada ano), dependendo da política de investimentos dos InPs, e que a cada vez possam ser feitas expansões em porções diferentes da rede física, fortalecendo-a de forma orgânica.

5.2.2 Definições e Modelagem

A seguir, são detalhadas as entradas, as variáveis e as restrições desse modelo. Letras sobrescritas são usadas para representar se um conjunto ou variável refere-se a recursos virtuais (V) ou físicos (P), ou se está associado a roteadores (R) ou enlaces (L).

Substrato e redes virtuais. A topologia da rede física, bem como a de cada rede virtual requisitada, é representada por um grafo direcionado $N = (R, L)$. Os vértices R representam roteadores, enquanto que cada aresta L representa um enlace unidirecional. Enlaces bidirecionais são representados como um par de arestas em direções opostas (por exemplo, (a, b) e (b, a)). Dessa forma, o modelo permite a representação de quaisquer tipos de topologias físicas e virtuais.

Em ambientes reais, roteadores físicos tem capacidade limitada de recursos, além de um limite físico para a expansão de suas capacidades. No modelo, as capacidades de CPU e memória são representadas, respectivamente, por C_i^P e M_i^P , enquanto que o limite máximo de expansão, por EC_i^P e EM_i^P . Da mesma forma, enlaces físicos possuem uma capacidade, representada por $B_{i,j}^P$, e um limite físico de expansão representado por $EB_{i,j}^P$.

Para considerar o consumo de recursos físicos da infraestrutura, faz-se necessário considerar as redes virtuais previamente alocadas no substrato. Os roteadores virtuais previamente alocados são representados pelo conjunto $A_{i,r,j}^R$, o qual indica se o roteador virtual j da rede virtual r está hospedado no roteador físico i . Já os enlaces virtuais previamente alocados são representados pelo conjunto $A_{i,j,r,k,l}^L$, o qual indica se o enlace virtual (k, l) da rede virtual r está hospedado no enlace físico (i, j) . Os requisitos de CPU e memória de cada roteador i da rede virtual r são representados por $C_{r,i}^V$ e $M_{r,i}^V$, enquanto que $B_{r,k,l}^V$ representa os requisitos de largura de banda para cada enlace virtual.

Particionamento do Substrato. Infraestruturas físicas podem ter diferentes graus de conectividade e topologias. Como consequência do esgotamento dos recursos físicos em regiões específicas do substrato (*e.g.*, pontes ou enlaces conectados a *hubs*), o particionamento da infraestrutura ocorre em diferentes níveis. Nesse contexto, uma partição é definida como um Componente Fortemente Conexo (CFC), cujos enlaces possuem largura de banda livre igual ou superior à média requisitada pelas redes virtuais. Os enlaces de corte identificados na infraestrutura são representados pelo conjunto X e, para cada $(i, j) \in X$, existe um valor correspondente no conjunto I , o qual representa a importância de cada enlace de corte no contexto do mapeamento de redes virtuais. A forma de valorar esses enlaces será explicada na Subseção 5.2.3.

Custos da Expansão. A expansão das capacidades dos dispositivos incorre em custos para os provedores de redes (InPs). Além disso, os custos monetários para aumentar as capacidades (*e.g.*, memória ou largura de banda) dos dispositivos físicos – roteadores e

enlaces – são heterogêneos. Tais custos são modelados como $costCpu_i^P$ e $costMem_i^P$, relacionados à expansão de CPU e memória do roteador i , e $costBw_{i,j}^P$ relacionado à expansão da largura de banda do enlace físico (i, j) . Nesta dissertação, trabalha-se com a ideia de que a unidade mínima acrescida é modelada em megabits por segundo para enlaces, megabytes para memória e módulos de processamento para CPU. Dessa forma, é possível generalizar o modelo de expansão. A Equação 5.1 apresenta uma estimativa dos custos totais para expandir a infraestrutura. As variáveis xb_e , xm_i e xc_i representam, respectivamente, a quantidade acrescida de recursos de largura de banda, memória e CPU nos dispositivos da infraestrutura.

$$\begin{aligned} CustoExp = & \sum_{e \in L^P} xb_e \cdot costBw^P e \\ & + \sum_{i \in R^P} (xc_i \cdot costCPU^P i + xm_i \cdot costMem^P i) \end{aligned} \quad (5.1)$$

Variáveis. As variáveis do modelo representam a solução ótima do problema de expansão. As variáveis z_e indicam quais são os enlaces de corte (armazenados em X) selecionados para compor um novo *core* para a infraestrutura. Além disso, as variáveis x_e indicam se o enlace e faz parte do caminho construído entre os enlaces de corte selecionados por z_e . As variáveis auxiliares q_u indicam se o roteador u do enlace de corte e pertence ao novo *core*. Todas as variáveis pertencem ao domínio binário.

Restrições. Além dos custos de expansão, trabalha-se com uma quantidade limitada de recursos. Por esse motivo, o modelo possui um conjunto de restrições, descrito a seguir.

As Equações 5.2, 5.3 e 5.4 garantem que a capacidade expandida nos enlaces (largura de banda) e nos roteadores físicos (CPU e memória) não excederá o limite máximo de expansão dos recursos da infraestrutura. Ressalta-se que as Equações 5.3 e 5.4 são válidas para ambos os índices (i e j) da variável x . Porém, por questões de espaço, apenas as equações relativas ao índice i são mostradas.

$$x_e \cdot \left(B_{i,j}^P + \frac{CapitalDisp \cdot Cobertura}{costBw_{i,j}^P} \right) \leq EB_{i,j}^P \quad \forall e \in L^P \quad (5.2)$$

$$x_{i,j} \cdot \left(C_i^P + \frac{CapitalDisp \cdot Cobertura}{costCpu_i^P} \right) \leq EC_i^P \quad \forall (i, j) \in L^P \quad (5.3)$$

$$x_{i,j} \cdot \left(M_i^P + \frac{CapitalDisp \cdot Cobertura}{costMem_i^P} \right) \leq EM_i^P \quad \forall (i, j) \in L^P \quad (5.4)$$

A Equação 5.5 garante que o montante a ser investido na infraestrutura física pelo InP não exceda o montante de capital de que o mesmo dispõe.

$$CustoExp \leq CapitalDisp \quad (5.5)$$

As Equações 5.6 e 5.7 definem um subconjunto de dispositivos físicos para compor um novo *core*, que atua como um reforço estrutural para a rede. O novo *core* é definido a partir de um subconjunto de roteadores físicos (R^C), o qual é definido por todos os roteadores que tem um ou mais enlaces em X . Constrói-se um caminho entre os enlaces de corte mais relevantes selecionados pela função objetivo (Equação 5.9). O símbolo

$\delta^+(u)$ representa os enlaces de saída do roteador u , enquanto que $\delta^-(u)$ representa os enlaces de entrada do roteador u .

$$\sum_{a \in \delta^+(u)} x_a^k - \sum_{a \in \delta^-(u)} x_a^k = \begin{cases} 1 \cdot q_u & \text{se } u = s \\ -1 \cdot q_u & \text{se } u = k \\ 0 & u \in R^P / \{s, k\} \end{cases} \quad \forall u \in R^P, \forall k \in R^C \quad (5.6)$$

$$q_u \geq \frac{\sum_{a \in \delta^+(u)} z_a}{|\delta^+(u)|} \quad \forall u \in R^P \quad (5.7)$$

Na prática, um InP dificilmente desejará expandir a capacidade de todos os dispositivos da rede física. Portanto, a Equação 5.8 garante que somente um subconjunto dos dispositivos físicos da infraestrutura será afetado pelo procedimento de expansão. Em outras palavras, essa equação define os limites de cobertura para a expansão dos enlaces. O lado esquerdo da equação define o percentual de enlaces afetados pela expansão.

$$\frac{\sum_{e \in L^P} x_e}{|L^P|} \leq Cobertura \quad (5.8)$$

Objetivo. O objetivo do modelo, exibido na Equação 5.9, é maximizar a reconexão entre os enlaces de corte considerados mais importantes. Como consequência, a taxa de aceitação deve ser maximizada e a taxa de utilização dos recursos ociosos deve ser aprimorada.

$$\text{Maximize } \sum_{e \in X} I_e \cdot z_e \quad (5.9)$$

5.2.3 Estratégia de Expansão Proposta

Nesta subseção é apresentada a estratégia proposta para o problema de expansão de redes de InPs. É detalhado cada procedimento específico utilizado para construir uma solução factível, e apresentada uma visão geral do procedimento algorítmico. A estratégia proposta é composta por duas etapas. A primeira etapa consiste em identificar quais elementos serão replanejados, enquanto que a segunda define uma estratégia para a distribuição de recursos entre os dispositivos já selecionados. Ressalta-se que uma estratégia heurística foi adotada devido à similaridade do problema sendo tratado com o problema da árvore de Steiner mínima (GOEMANS; MYUNG, 1993), o qual é conhecidamente NP-Difícil.

O Algoritmo 1 apresenta uma versão simplificada da estratégia proposta de reconexão de partições recorrentes em pseudocódigo, e seus detalhes são explicados a seguir. Como descrito anteriormente, uma partição é definida em termos da utilização dos recursos físicos. Assim, em um determinado intervalo de tempo (o que pode ser, por exemplo, um dia ou uma semana), aplica-se um procedimento para identificar o conjunto de partições da infraestrutura, bem como os enlaces de corte (isto é, enlaces que causam particionamentos devido ao esgotamento dos seus recursos). Nas linhas 5 e 6, calcula-se os particionamentos e os enlaces de corte observados em cada um desses intervalos. Existem algoritmos polinomiais para encontrar Componentes Fortemente Conexos (CFC) em grafos (e, por conseguinte, os enlaces de corte) como o algoritmo de Tarjan (SLEATOR; TARJAN, 1983), o qual pode ser computado com complexidade linear de $O(|R| + |L|)$.

Um histórico dos enlaces de corte (computados anteriormente) é armazenado no conjunto X como uma informação para guiar o algoritmo na seleção dos principais dispositivos físicos. Como os enlaces de corte variam ao longo do tempo (o que ocorre devido à variação da utilização dos recursos físicos), mantém-se um conjunto I que contém, para cada enlace (i, j) pertencente a X , informações sobre a relevância de tal enlace. O valor armazenado para cada enlace de corte é uma combinação da frequência e da cobertura, os quais vão sendo acumulados a cada intervalo em que os particionamentos e os enlaces de corte são determinados (linhas 7-8). Para a frequência, realiza-se a contagem de quantas vezes o enlace (i, j) foi a causa de um particionamento da infraestrutura. O valor é então normalizado em relação ao montante total. A cobertura, por sua vez, mede a percentagem de roteadores que ficaram desconectados da infraestrutura a partir de tal particionamento.

No momento em que é realizada a expansão da infraestrutura física (o que pode acontecer, por exemplo, semestralmente ou anualmente), analisa-se o histórico de enlaces de corte armazenados até o momento em X e a importância I de cada um. Quanto maiores os valores para $I_{i,j}$, maiores serão as chances de que o enlace em questão esteja frequentemente causando o particionamento de um grande conjunto de roteadores físicos na infraestrutura. O valor de $I_{i,j}$ é calculado pela multiplicação dos valores acumulados para a frequência e a cobertura. O procedimento é realizado na linha 11 do Algoritmo 1. A estratégia proposta leva em consideração a importância dos elementos topológicos da infraestrutura física, ao contrário das estratégias aplicadas em trabalhos clássicos, as quais são fundamentadas unicamente na utilização de matrizes de demanda para selecionar os dispositivos a serem expandidos. Primeiramente, ordena-se os enlaces físicos (i, j) armazenados em X em relação ao valor correspondente em $I_{i,j}$ (linha 14). Então, um subgrafo $N^c = (R^c, L^c)$ é construído, onde R^c é um subconjunto de roteadores, (cujo tamanho é igual ao percentual de cobertura) contido no conjunto X e L^c é representado por todos os enlaces que compõem os menores caminhos (ou caminhos de menor custo) entre os roteadores de R^c (linhas 15-18). Aplica-se no subgrafo N^c um algoritmo de *Minimum Spanning Tree (MST)* para construir um novo *core* para a infraestrutura, o qual irá atuar como um reforço estrutural evitando o particionamento de regiões críticas (linha 19). Como existem algoritmos polinomiais para realizar esse procedimento, tal como o algoritmo de Prim, o procedimento pode ser calculado em $O(|L^c| + |R^c| \log |R^c|)$ passos. É importante mencionar que a solução resultante da $mst(N^c)$ pode conter mais elementos que a cobertura mínima (restrição 7). Isso acontece porque L^c é composto por um conjunto de caminhos que interligam todos os roteadores de R^c . Por esse motivo, podem existir roteadores intermediários na solução que não pertençam inicialmente a R^c . Quando isso acontece, repete-se iterativamente o processo de reconstrução do grafo N^c , eliminando o enlace de corte menos relevante (linhas 20-24).

Por fim, após a criação da estrutura de reforço, é sugerida a expansão da capacidade dos enlaces e roteadores (linhas 26-27). A expansão dos dispositivos físicos pode seguir diferentes estratégias. Por exemplo, todo o capital disponível para a expansão pode ser investido uniformemente entre os roteadores e enlaces selecionados ou definir uma distribuição probabilística baseada na importância de cada elemento. Por questões de espaço, nesta dissertação a solução de expansão não utiliza uma estratégia de priorização para a distribuição do investimento entre os dispositivos selecionados na etapa anterior (ou seja, os recursos são distribuídos uniformemente).

Input: Capital disponível, Percentual de cobertura, Periodicidade da expansão, Infraestrutura física do InP N , Mapeamento das redes virtuais $A_{i,r,j}^R$ and $A_{i,j,r,k,l}^L$

Output: Conjunto de dispositivos físicos a serem expandidos

```

1  $X \leftarrow \emptyset$ 
2  $F \leftarrow \emptyset$ 
3  $C \leftarrow \emptyset$ 
4 foreach UnidadeTempo do
5    $particoes \leftarrow obterConjuntoParticoes(N, E^R, E^L)$ 
6    $X \leftarrow atualizarEnlacesCorte(particoes)$ 
7    $F \leftarrow atualizarFrequencia(X)$ 
8    $C \leftarrow atualizarCobertura(X, particoes)$ 
9   if PeriodicidadeDaExpansao then
10    foreach  $(i, j) \in X$  do
11       $I_{i,j} \leftarrow \frac{F_{i,j}}{\sum_{\forall(i,j)} F_{i,j}} \cdot C_{i,j}$ 
12    end
13    while true do
14       $ordenaDesc(X, I)$ 
15       $list \leftarrow seleciona \% \text{ dos enlaces de } X \text{ (\% igual ao percentual de}$ 
16       $cobertura)$ 
17       $R^c \leftarrow roteadores \text{ de } list$ 
18       $L^c \leftarrow \text{enlaces dos caminhos de custo mínimo entre cada par de roteador}$ 
19       $(a, b) \in R^c$ 
20       $N^c = (R^c, L^c)$ 
21       $sol^c \leftarrow mst(N^c)$ 
22      if  $numeroRoteadores(sol^c) > Cobertura$  ou
23       $numeroEnlaces(sol^c) > Cobertura$  then
24         $X.removeItem()$ 
25      else
26         $parar$ 
27      end
28    end
29     $sugiraExpansaoEnlaces(CapitalDisponivel)$ 
30     $sugiraExpansaoRoteadores(CapitalDisponivel)$ 
31     $X \leftarrow \emptyset$ 
32  end

```

Algoritmo 1: Visão geral da solução proposta para o problema de expansão de redes de InPs.

5.3 Avaliação do Impacto da Expansão no Mapeamento de Redes Virtuais

Para mensurar o impacto de expansões sugeridas pela estratégia proposta no processo de mapeamento de redes virtuais, a mesma foi implementada e submetida a um processo sistemático de avaliação. Os experimentos foram realizados em uma máquina com quatro processadores AMD Opteron 6276 e 64 GB de memória RAM, usando o sistema opera-

cional Ubuntu GNU/Linux Server 11.10 x86_64.

5.3.1 Carga de Trabalho e Modelo de Mapeamento

Para realizar os experimentos, desenvolveu-se um gerador de requisições de redes virtuais. Esse gerador é executado por um período de 360 unidades de tempo (nesta avaliação trabalhamos com a ideia de que cada unidade de tempo corresponde a um dia, perfazendo o período de 360 dias). Em cada unidade de tempo, três requisições de redes virtuais são geradas. Cada requisição gerada possui uma duração limitada, ou seja, após um determinado número de unidades de tempo, a mesma é removida. Ressalta-se que essa forma de instanciação, baseada no emprego de unidades de tempo e com uso de parâmetros fixos para a chegada de requisições, tem como objetivo proporcionar um maior controle sobre os experimentos, evitando que os resultados sejam afetados de forma imprevisível pela variação simultânea de múltiplos fatores.

As redes utilizadas como substrato físico foram geradas por meio da ferramenta IGen¹. A topologia dessas redes segue o padrão *hub & spoke*, conforme caracterização realizada por Luizelli et al. (LUIZELLI et al., 2013). Essa classe de topologia foi escolhida como uma aproximação de redes encontradas em ambientes reais. As redes físicas instanciadas possuem 50 roteadores, cada um com capacidade total de CPU definida como 100% e 256 MB de memória, enquanto que a largura de banda dos enlaces físicos é de 10 Gbps. Além disso, as capacidades de expansão de roteadores e enlaces físicos são definidas como o dobro de suas capacidades iniciais.

A topologia de cada rede virtual segue a forma de anel. Acredita-se que tal topologia é capaz de representar requisições de redes virtuais de forma adequada, devido a características como a resiliência a falhas individuais em enlaces. Além disso, ressalta-se que o emprego de classes de topologias típicas de provedores (como, por exemplo, *hub & spoke*), nesse caso, poderia levar a uma redução artificial nas taxas de rejeição devido à similaridade entre as redes virtuais e a rede física. As redes virtuais possuem 5 roteadores cada. Roteadores virtuais requerem 20% de CPU e 48 MB de memória, enquanto que a largura de banda requisitada é de 2.5 Gbps. Ressalta-se que tal escolha de parâmetros tem como objetivo reproduzir, por meio de uma carga de trabalho homogênea, os mesmos fenômenos observados em avaliações prévias (LUIZELLI et al., 2013). Tais fenômenos incluem uma alta taxa de rejeição de redes virtuais e uma quantidade significativa de recursos disponíveis na infraestrutura de maneira global. Na avaliação recém referida, observou-se que a carga de trabalho descrita leva a uma taxa de aceitação de 66,60% e a uma utilização global de recursos de 60,03% para largura de banda, 52,43% para CPU e 55,93% para memória. Ou seja, apesar do consumo de recursos ficar abaixo de 60%, ainda se observa em (LUIZELLI et al., 2013) taxas de rejeição da ordem de 30%. Vale frisar que realidade semelhante é observada em outros trabalhos relacionados a VNE, tais como os citados na Introdução. Com a expansão criteriosa da infraestrutura física, cujos resultados são apresentados em Subseção a seguir, espera-se alcançar patamares bem superiores de aceitação e, mais importante, a um melhor aproveitamento sustentado dessa grande quantidade de recursos ociosos.

Durante a avaliação, realiza-se uma única expansão, na 180^a unidade de tempo (*i.e.*, passado um semestre). Os custos de expansão também são definidos de maneira homogênea, isto é, considera-se que os dispositivos são iguais e, portanto, os custos de expansão

¹<http://igen.sourceforge.net/>

são os mesmos. Os experimentos possuem, ainda, dois parâmetros variáveis: a cobertura de expansão e o percentual de crescimento. Foram executadas 30 repetições de cada experimento, considerando como base diferentes instâncias de substrato físico.

Como o modelo de expansão proposto está relacionado com o problema de mapeamento de redes virtuais, considera-se o problema *online* proposto por Luizelli et al. (LUIZELLI et al., 2013). Naquele modelo, os autores consideram as principais restrições relatadas na literatura recente. Em contraste, neste trabalho considera-se uma versão simplificada na qual não são consideradas restrições de localidade, uma vez que o objetivo é avaliar, inicialmente, o impacto da aplicação do modelo de expansão em uma versão genérica do problema de mapeamento de redes virtuais.

5.3.2 Resultados

Primeiramente, analisa-se o ganho médio em termos de requisições de redes virtuais aceitas após a expansão dos recursos da infraestrutura física. Ressalta-se que requisições de redes virtuais somente são aceitas caso seja possível mapear todos os seus roteadores e enlaces virtuais no substrato. A Figura 5.3 ilustra os ganhos médios de redes virtuais *adicionais* aceitas considerando variações no percentual de recursos físicos expandidos (expansão) e na quantidade de dispositivos afetados pela expansão (cobertura). Quanto maior é o percentual da cobertura, mais o investimento é multiplexado entre os dispositivos da infraestrutura. O gráfico revela que o ideal é haver um equilíbrio entre o investimento e a cobertura da expansão. Se a cobertura da expansão for demasiadamente alta ou baixa, os benefícios obtidos são menos significativos. As médias observadas apontam que, para maximizar a aceitação adicional de redes virtuais, a cobertura da expansão deve ser entre 20% e 30%. Considerando esses percentuais de cobertura, observa-se, respectivamente, um aumento de 31,06% e 31,76% na aceitação adicional de redes virtuais para um aumento (investimento) de 20% de novos recursos em relação à rede original. Para um investimento de 10%, os ganhos observados são de, respectivamente, 14,48% e 12,87%.

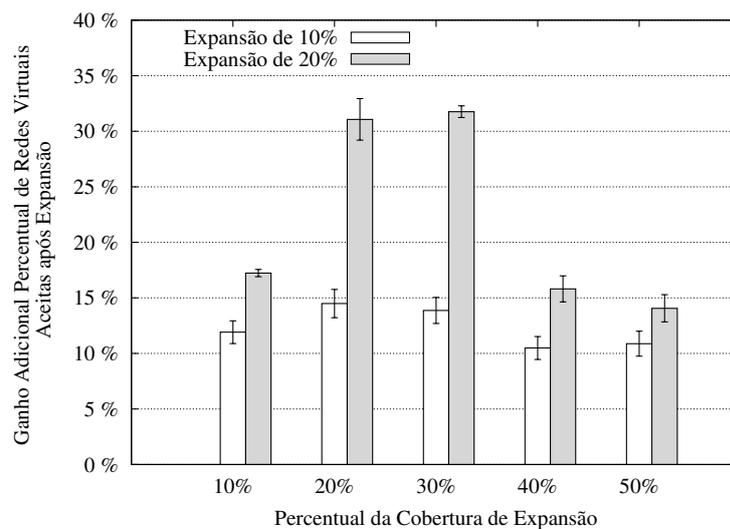


Figura 5.3: Média adicional de redes virtuais aceitas após a aplicação do procedimento de expansão.

A Figura 5.4 ilustra a utilização média dos enlaces físicos após a expansão. Cada

ponto no gráfico representa a utilização média alcançada desde o início do experimento até a unidade de tempo em questão. A linha horizontal em preto em cada gráfico representa a expansão de recursos realizada. Valores acima dessa linha indicam que o provedor está utilizando, além dos recursos expandidos (10% na Figura 5.4(a) e 20% na Figura 5.4(b), como explicado a seguir), uma parcela de recursos não utilizados (ou pouco utilizados) antes do processo de expansão. Nos casos em que a média é inferior à linha horizontal, ocorre a subutilização dos recursos expandidos. A Figura 5.4(a) apresenta a média de utilização dos recursos para uma expansão de 10% dos recursos da rede física. Nesse caso, nota-se que a utilização dos recursos é melhor aproveitada quando a cobertura é menor. Para uma cobertura de até 20%, é possível obter um ganho sustentado de utilização de recursos de até 21% em relação ao cenário sem expansão. Nos demais casos, com cobertura igual ou superior a 30%, o benefício obtido em termos de utilização de recursos mantém-se abaixo dos 10% investidos. Isso está diretamente relacionado à multiplexação de poucos recursos em muitos dispositivos, o que leva a um aumento bem pouco significativo das capacidades dos recursos expandidos. A Figura 5.4(b) apresenta a média de utilização de largura de banda para uma expansão de 20% dos recursos. Nota-se que, para coberturas de 20% e 30%, tem-se um ganho de utilização de recursos de até 45% em relação ao cenário sem expansão. Os ganhos observados em termos de utilização de recursos devem-se, principalmente, ao reforço estrutural realizado em certas regiões da infraestrutura, o que leva a um menor nível de particionamento e favorece diretamente a uma menor fragmentação dos recursos ociosos. Ressalta-se que tais benefícios podem levar a custos mais baixos para os solicitantes, uma vez que o provedor consegue melhor aproveitar recursos antes não utilizados. Assim como na avaliação anterior, o gráfico revela que existe uma relação entre o percentual investido, a cobertura da expansão e o percentual de ganho na utilização dos recursos físicos.

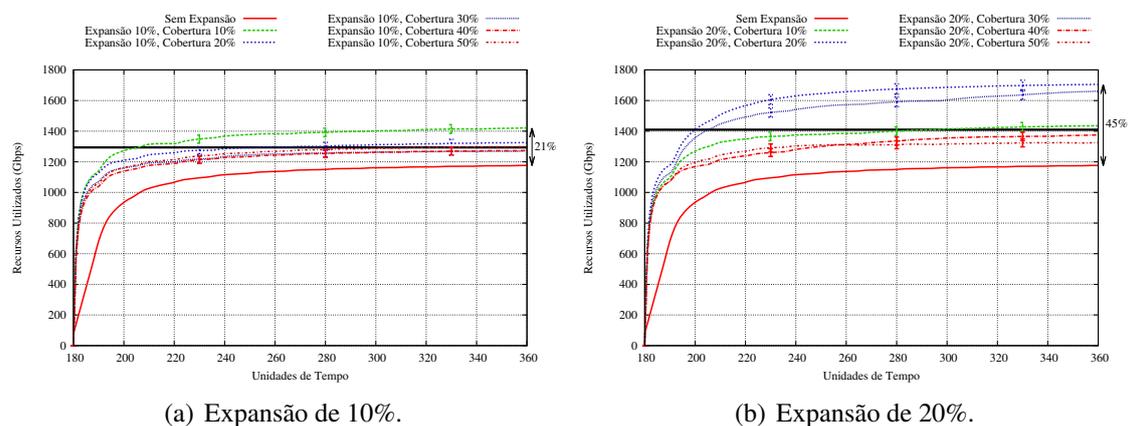


Figura 5.4: Utilização global de largura de banda dos enlaces físicos após a expansão.

A seguir, a Figura 5.5 apresenta uma visão qualitativa da estratégia proposta por meio de uma representação gráfica da utilização média dos recursos de uma infraestrutura física antes e depois da aplicação do procedimento de expansão. Nota-se, primeiramente, que a utilização dos recursos dos enlaces físicos e roteadores antes da expansão está concentrada em certas regiões da infraestrutura. Devido à superutilização dos recursos de certos dispositivos físicos (principalmente de nós *hubs* e enlaces de corte), os recursos da infraestrutura, de modo geral, acabam sendo subutilizados. Após a aplicação da estratégia

de expansão, a qual cria uma estrutura de reforço baseada na reconexão das partições recorrentes, nota-se que a distribuição do consumo de recursos físicos é, de maneira geral, significativamente mais homogênea. Ademais, a estratégia de expansão proporciona uma maior utilização de recursos previamente subutilizados na infraestrutura.

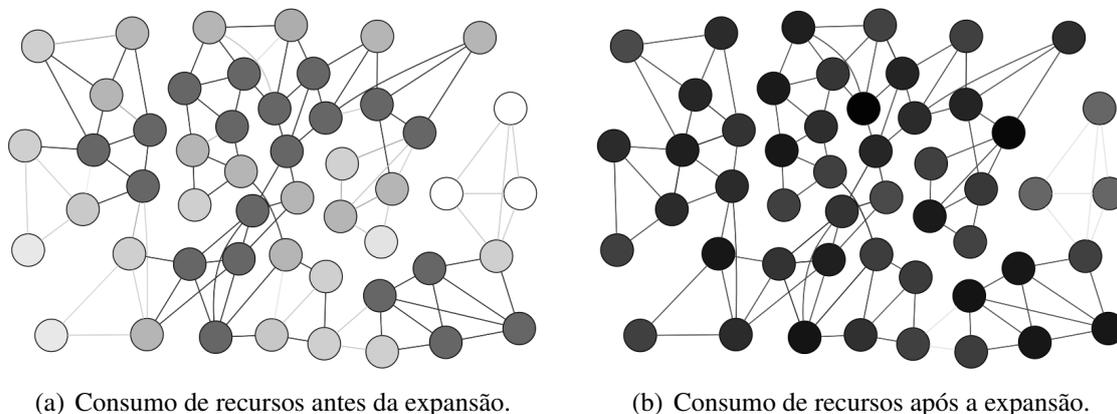


Figura 5.5: Representação gráfica do consumo médio de recursos da infraestrutura antes (a) e depois (b) de uma expansão de 20% dos recursos com cobertura de 20%. Tons mais escuros representam maior utilização de recursos físicos.

Por fim, discute-se o tempo médio necessário para encontrar uma solução factível para o problema de expansão. Em todos os experimentos, o tempo médio necessário para a resolução do algoritmo proposto permanece abaixo de 1 segundo, já que a estratégia de expansão proposta apresenta complexidade polinomial. Tais resultados indicam que a solução pode ser aplicada em infraestruturas com escalas maiores, ainda assim sendo capaz de gerar soluções em um tempo hábil.

5.4 Sumário

Embora tenha-se empreendido esforços para resolver o problema de mapeamento de redes virtuais, observa-se que parte das requisições de redes virtuais é rejeitada devido ao esgotamento de recursos apenas em pontos-chave da infraestrutura (como evidenciado no Capítulo 4). Neste capítulo, definiu-se, de maneira pioneira, o problema de expansão de infraestruturas físicas no contexto da virtualização de redes e propôs-se uma estratégia algorítmica de expansão baseada na reconexão de componentes fortemente conexos (partições) da infraestrutura para sugerir ajustes que levem a uma maior aceitação de redes virtuais e, em consequência, a um melhor aproveitamento da infraestrutura física. Os resultados demonstram que o fortalecimento de partes-chave de uma infraestrutura pode levar a uma ocupação muito mais satisfatória. De forma resumida, os resultados obtidos evidenciam que a expansão de 10% a 20% dos recursos da infraestrutura utilizando a estratégia proposta contribui para um aumento sustentado de até 30% no número de redes virtuais aceitas e de até 45% no aproveitamento dos recursos em comparação com a rede original.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A virtualização de redes é um tema que vem recebendo considerável atenção da comunidade científica e da indústria, resultando em uma série de trabalhos que envolvem principalmente questões de mapeamento de redes virtuais. No entanto, desconhecia-se trabalhos anteriores que avaliassem de maneira justa o resultado de estratégias de mapeamento considerando diferentes topologias de rede. Os trabalhos até então desenvolvidos, de maneira geral, utilizavam topologias genéricas ou orgânicas, as quais não representavam fielmente as propriedades topológicas presentes nas infraestruturas de redes de provedores.

Após formalizar um modelo ótimo de mapeamento *online* de redes virtuais e aplicá-lo sobre substratos com diferentes características topológicas tipicamente observadas em redes de provedores, caracterizou-se o impacto de diferentes classes de topologias no que diz respeito a taxas de rejeição e à utilização dos recursos da infraestrutura. Os resultados obtidos demonstram o impacto significativo causado pelo mapeamento de redes virtuais nas diferentes estruturas topológicas avaliadas. A alocação de redes virtuais é prejudicada pelo esgotamento de recursos em alguns pontos específicos da infraestrutura física, ainda que uma visão global da rede revele que ainda há recursos disponíveis no restante do substrato. Tal impacto é ainda maior quando consideradas restrições de localidade em requisições de redes virtuais.

No estudo de caracterização realizado, observou-se que grande parte das requisições de redes virtuais é rejeitada devido ao esgotamento de recursos apenas em pontos-chave da infraestrutura. Tal foi determinante para que se propusesse, nesta dissertação, uma estratégia de expansão baseada na reconexão de partições recorrentes para suprir as necessidades que a virtualização impõe às redes de InPs. A principal inovação da estratégia consiste em considerar fatores topológicos no processo de expansão ao invés de matrizes de demanda.

Após formalizar a estratégia de expansão para infraestruturas físicas de InPs no contexto do problema de mapeamento de redes virtuais e aplicá-la sobre substratos com topologias observadas em redes de provedores, avaliou-se a mesma no que diz respeito a melhorias em relação à taxa de aceitação e utilização de recursos da infraestrutura. Os resultados obtidos evidenciam que a expansão dos recursos da infraestrutura utilizando a estratégia proposta contribui significativamente para um aumento sustentado de até 30% no número de redes virtuais aceitas e de até 45% no aproveitamento dos recursos em comparação com a rede original.

Ao longo do desenvolvimento desta dissertação algumas dificuldades surgiram. Primeiro, destaca-se a dificuldade em encontrar instâncias de redes comerciais representati-

vas (isto é, com tamanho e características apropriadas). Embora haja instâncias publicamente disponíveis de redes comerciais, em geral, são de difícil comparação. Ademais, não existem estudos que apontem quais são as características presentes em topologias virtuais. Segundo, a dificuldade em precisar adequadamente as variáveis do problema. Como o problema abordado nesta dissertação é multifacetado, a segunda dificuldade consistiu em determinar, de maneira correta, o isolamento das variáveis envolvidas para propiciar um ambiente de avaliação justo. Terceiro, o tempo de execução para a resolução dos modelos. Haja visto que foi realizada uma avaliação extensiva (tanto para a caracterização, quanto para a expansão), o tempo de computação foi um fator limitante (considerando um único processador, o tempo de processamento foi superior a 2000 horas). Quarto e último, a dificuldade de comparação existente entre os modelos propostos (mapeamento e expansão) e os presentes na literatura. Os modelos desenvolvidos, em geral, não oferecem as condições necessárias para a comparação, já que apresentam requisitos e objetivos diferentes.

Tendo avaliado o impacto do mapeamento de redes virtuais em substratos de redes com diferentes estruturas topológicas, pretende-se, como trabalho futuro, estender a caracterização por meio do emprego de diferentes topologias virtuais. Dessa forma, objetiva-se compreender o relacionamento entre as topologias físicas e virtuais no processo de mapeamento de redes virtuais em relação à taxa de aceitação e consumo de recursos. Como perspectivas de trabalhos futuros relacionados à estratégia de expansão proposta, pretende-se estender a avaliação aplicando-a em outras topologias de *backbone*, bem como aprofundar a compreensão do inter-relacionamento dos parâmetros do modelo. Além disso, pretende-se propor e avaliar novas estratégias de distribuição de recursos entre os dispositivos da infraestrutura a serem expandidos.

REFERÊNCIAS

- ALBERT, R.; BARABÁSI, A.-L. Topology of Evolving Networks: local events and universality. **Physical Review Letters**, [S.l.], v.85, p.5234–5237, Dec 2000.
- ALKMIM, G. P.; BATISTA, D. M.; FONSECA, N. L. S. Optimal Mapping of Virtual Networks. In: IEEE GLOBAL TELECOMMUNICATIONS CONFERENCE, Houston, USA. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2011. p.1–6.
- ALKMIM, G. P.; BATISTA, D. M.; FONSECA, N. L. S. Mapeamento de Redes Virtuais em Substratos de Rede. In: XXIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES E SISTEMAS DISTRIBUÍDOS, Campo Grande, MS, Brazil. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2011. p.45–58.
- ALKMIM, G. P.; BATISTA, D. M.; FONSECA, N. L. S. Mapping virtual networks onto substrate networks. **Journal of Internet Services and Applications**, [S.l.], v.3, n.4, p.1–15, 2013.
- ANDERSEN, D. **Theoretical Approaches to Node Assignment**. Unpublished manuscript. 2002. Disponível em: <<http://www.cs.cmu.edu/~dga/papers/andersen-assign.ps>>. Acesso em: 30 apr. 2013.
- BAYS, L. R. et al. Security-aware Optimal Resource Allocation for Virtual Network Embedding. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NETWORK AND SERVICE MANAGEMENT, 8., Las Vegas, USA. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2012. p.378–384.
- CARVALHO, H. E. T.; FERNANDES, N. C.; DUARTE, O. C. M. B. Um Controlador Robusto de Acordos de Nível de Serviço para Redes Virtuais Baseado em Lógica Nebulosa. In: XXIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES E SISTEMAS DISTRIBUÍDOS. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2011. p.645 – 658.
- CHENG, X. et al. Virtual network embedding through topology-aware node ranking. **SIGCOMM Computer Communication Review**, New York, NY, USA, v.41, n.2, p.38–47, Apr. 2011.
- CHENG, X. et al. Virtual network embedding through topology awareness and optimization. **Computer Networks**, [S.l.], v.56, n.6, p.1797 – 1813, 2012.
- CHOWDHURY, M.; RAHMAN, M. R.; BOUTABA, R. ViNEYard: virtual network embedding algorithms with coordinated node and link mapping. **IEEE/ACM Transactions on Networking**, [S.l.], v.PP, n.99, p.1, 2011.

CHOWDHURY, N.; BOUTABA, R. Network virtualization: state of the art and research challenges. **IEEE Communications Magazine**, [S.l.], v.47, n.7, p.20–26, July 2009.

CHOWDHURY, N. M. K.; BOUTABA, R. A survey of network virtualization. **Computer Networks**, [S.l.], v.54, n.5, p.862 – 876, 2010.

CHOWDHURY, N.; RAHMAN, M.; BOUTABA, R. Virtual Network Embedding with Coordinated Node and Link Mapping. In: IEEE CONFERENCE ON COMPUTER COMMUNICATIONS, 28., Rio de Janeiro, Brasil. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2009. p.783 –791.

CURTIS, A. et al. REWIRE: an optimization-based framework for unstructured data center network design. In: IEEE CONFERENCE ON COMPUTER COMMUNICATIONS, 31., Orlando, USA. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2012. p.1116–1124.

CURTIS, A.; LOPEZ-ORTIZ, A. Capacity Provisioning a Valiant Load-Balanced Network. In: IEEE CONFERENCE ON COMPUTER COMMUNICATIONS, 28., Rio de Janeiro, Brazil. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2009. p.3006–3010.

FAJJARI, I. et al. VNE-AC: virtual network embedding algorithm based on ant colony metaheuristic. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2011. p.1 – 6.

FERNANDES, N. C.; DUARTE, O. C. M. B. Provendo Isolamento e Qualidade de Serviço em Redes Virtuais. In: XXIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES E SISTEMAS DISTRIBUÍDOS. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2011. p.295 – 308.

FISCHER, A. et al. Virtual Network Embedding: a survey. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, [S.l.], v.15, n.4, p.1888–1906, 2013.

GAO, P. X. et al. It's not easy being green. **SIGCOMM Computer Communication Review**, New York, NY, USA, v.42, n.4, p.211–222, Aug. 2012.

GOEMANS, M. X.; MYUNG, Y.-S. A catalog of steiner tree formulations. **Networks**, [S.l.], v.23, n.1, p.19–28, 1993.

HADDADI, H. et al. Network topologies: inference, modeling, and generation. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, [S.l.], v.10, n.2, p.48 – 69, quarter 2008.

HOUIDI, I. et al. Virtual network provisioning across multiple substrate networks. **Computer Networks**, [S.l.], v.55, n.4, p.1011 – 1023, 2011.

JOHNSTON, M.; LEE, H.-W.; MODIANO, E. A robust optimization approach to backup network design with random failures. In: IEEE CONFERENCE ON COMPUTER COMMUNICATIONS, 30., Shanghai, China. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2011. p.1512–1520.

KAMIYAMA, N. et al. Impact of topology on parallel video streaming. In: NETWORK OPERATIONS AND MANAGEMENT SYMPOSIUM. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2010. p.607 – 614.

KRISHNASWAMY, R. M.; SIVARAJAN, K. N. Design of logical topologies: a linear formulation for wavelength-routed optical networks with no wavelength changers. **IEEE/ACM Transactions on Networking**, Piscataway, NJ, USA, v.9, n.2, p.186–198, Apr. 2001.

LUIZELLI, M. et al. Characterizing the Impact of Network Substrate Topologies on Virtual Network Embedding. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NETWORK AND SERVICE MANAGEMENT, 9., Zurich, Switzerland. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2013. p.42–50.

MUKHERJEE, B. et al. Some principles for designing a wide-area WDM optical network. **IEEE/ACM Transactions on Networking**, [S.l.], v.4, n.5, p.684–696, 1996.

PETERSON, L. et al. A Blueprint for Introducing Disruptive Technology into the Internet. **SIGCOMM Computer Communication Review**, New York, NY, USA, v.33, n.1, p.59–64, Jan. 2003.

RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. Design of logical topologies for wavelength-routed optical networks. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, [S.l.], v.14, n.5, p.840–851, 1996.

SHEN, G.; TUCKER, R. Energy-Minimized Design for IP Over WDM Networks. **IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking**, [S.l.], v.1, n.1, p.176–186, 2009.

SLEATOR, D. D.; TARJAN, R. E. A data structure for dynamic trees. **Journal of Computer and System Sciences**, [S.l.], v.26, n.3, p.362 – 391, 1983.

TURNER, J.; TAYLOR, D. Diversifying the Internet. In: IEEE GLOBAL TELECOMMUNICATIONS CONFERENCE. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2005. v.2, p.6 pp.–760.

YU, M. et al. Rethinking virtual network embedding: substrate support for path splitting and migration. **SIGCOMM Computer Communication Review**, New York, USA, v.38, n.2, p.17–29, Mar. 2008.

APÊNDICE A – ARTIGO PUBLICADO - SBRC 2013

- Título: Caracterizando o Impacto de Topologias no Mapeamento de Redes Virtuais
- Conferência: 31º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC 2013)
- URL: <http://sbrc2013.unb.br/>
- Data: 6-10 de Maio de 2013
- Local: Brasília, DF, Brasil

Caracterizando o Impacto de Topologias no Mapeamento de Redes Virtuais

Marcelo Caggiani Luizelli¹, Leonardo Richter Bays¹, Luciana Salete Buriol¹
Marinho Pilla Barcellos¹, Luciano Paschoal Gaspar¹

¹Instituto de Informática – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)
Caixa Postal 15.064 – 91.501-970 – Porto Alegre – RS – Brazil

{mcluizelli, lrbays, buriol, marinho, paschoal}@inf.ufrgs.br

Abstract. *Network virtualization is a mechanism that allows the coexistence of multiple virtual networks on top of a single physical substrate. One of the research challenges addressed in the literature is the efficient mapping of virtual resources on physical infrastructures. Although this challenge has received considerable attention, state-of-the-art approaches present high rejection rate, i.e., the ratio between the number of denied virtual network requests and the total amount of requests is considerably high. In this work, we investigate the relationship between the quality of virtual network mappings and the topological structures of the underlying substrates. Exact solutions of an online embedding model are evaluated under different classes of network topologies. The obtained results demonstrate that the use of certain topologies on physical substrates significantly contributes to the reduction of rejection rates and, therefore, to improved resource usage.*

Resumo. *A virtualização de redes é um mecanismo que permite a coexistência de múltiplas redes virtuais sobre um mesmo substrato físico. Um dos desafios de pesquisa abordados na literatura é o mapeamento eficiente de recursos virtuais em infraestruturas físicas. Embora o referido desafio tenha recebido considerável atenção, as abordagens que constituem o estado-da-arte apresentam alta taxa de rejeição, i.e., a proporção de solicitações de redes virtuais negadas em relação ao total de solicitações efetuadas ao substrato é elevada. Neste trabalho, investiga-se a relação entre a qualidade dos mapeamentos de redes virtuais e as estruturas topológicas dos substratos subjacentes. Avalia-se as soluções exatas de um modelo de mapeamento online sob diferentes classes de topologias de rede. Os resultados obtidos evidenciam que o emprego de determinadas topologias em substratos físicos contribui significativamente para a redução das taxas de rejeição e, portanto, para um melhor aproveitamento dos recursos.*

1. Introdução

A virtualização de redes é um mecanismo que permite a coexistência de múltiplas redes virtuais (VNs – *Virtual Networks*) heterogêneas compartilhando recursos de um mesmo substrato físico. Essas VNs podem apresentar arquiteturas, protocolos e topologias independentes das do substrato de rede na qual serão instanciadas. Provedores de Infraestruturas (InPs – *Infrastructure Providers*), lançando mão das facilidades de alocação e desalocação de redes virtuais e do isolamento de recursos que as tecnologias de virtualização provêm, passam, assim, a poder oferecer suporte à criação, sob demanda, de redes personalizadas, atendendo a diferentes requisitos impostos pelos contratantes.

Um dos maiores desafios de pesquisa em virtualização de redes é a alocação eficiente de recursos de infraestruturas físicas para requisições de redes virtuais (VNE – *Virtual Network Embedding*). Essa alocação de recursos físicos deve ser ciente das capacidades dos equipamentos de rede, bem como das demandas requeridas pelas redes virtuais (por exemplo, largura de banda dos enlaces virtuais e capacidade de processamento dos roteadores virtuais). Apesar de haver um número considerável de trabalhos que exploram o problema *online* de mapeamento de redes virtuais [Chowdhury et al. 2009, Houidi et al. 2011, Fajjari et al. 2011, Cheng et al. 2011, Cheng et al. 2012], constata-se que as taxas de rejeição para o conjunto de requisições entrantes são, normalmente, altas, podendo atingir até 80%. Supõe-se que um subconjunto dessas rejeições seja causado por insuficiências temporárias de recursos, ou seja, períodos em que os recursos disponíveis na infraestrutura como um todo não são capazes de suprir a demanda. Especula-se, contudo, que grande parte das rejeições ocorra em situações em que há grande disponibilidade de recursos, mas alguns poucos já saturados acabam inviabilizando, em função de características de conectividade do substrato, o atendimento de novas requisições.

Apesar dos esforços empreendidos para resolver o problema do mapeamento de redes virtuais, desconhecem-se trabalhos que investiguem a influência de topologias de rede no processo de mapeamento. Além disso, trabalhos existentes na área empregam topologias que nem sempre refletem as redes comerciais [Haddadi et al. 2008]. Acredita-se ser fundamental compreender a relação entre o uso de diferentes topologias e o processo de mapeamento, de forma a identificar como determinadas características topológicas influenciam nesse processo. Por exemplo, topologias organizadas de diferentes formas podem propiciar uma melhor utilização dos recursos físicos, podendo, assim, reduzir a taxa de rejeição de requisições, potencialmente elevando o lucro obtido por um provedor e, ao mesmo tempo, reduzindo custos para os solicitantes de redes virtuais.

Neste trabalho, objetiva-se caracterizar o impacto de diferentes classes de topologias tipicamente empregadas em infraestruturas comerciais na qualidade do mapeamento de redes virtuais. Mais especificamente, formaliza-se um modelo ótimo de mapeamento e emprega-se o mesmo na alocação *online* de redes virtuais sobre substratos com topologias estrela, *ladder* e *hub & spoke*. Os resultados obtidos são avaliados considerando diferentes métricas, como taxa de rejeição e consumo de recursos dos dispositivos da rede física. De forma resumida, destacam-se como principais contribuições deste artigo: (i) a formalização de um modelo de alocação *online* considerando restrições de localidade; (ii) a sistematização das características de redes tipicamente adotadas por provedores; e (iii) a avaliação e discussão do impacto de diferentes topologias no processo de mapeamento de redes virtuais.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta uma discussão dos trabalhos relacionados ao problema de mapeamento de redes virtuais, destacando as topologias consideradas e taxas de rejeição. Na Seção 3 são caracterizadas as topologias de rede consideradas neste trabalho. A Seção 4 formaliza o modelo de mapeamento *online* empregado. Na Seção 5 são apresentados e avaliados os resultados obtidos. Por fim, a Seção 6 conclui o artigo com considerações finais e indicações de trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

Nesta seção apresenta-se os principais trabalhos relacionados ao problema de mapeamento de redes virtuais. Faz-se um breve resumo das soluções propostas, ressaltando o

tipo de topologia física e virtual utilizada, bem como as taxas de rejeição obtidas pelos métodos de mapeamento, quando disponíveis.

Yu et al. [Yu et al. 2008] apresentam um modelo de mapeamento *online* para redes virtuais com suporte a múltiplos caminhos e migração. A fragmentação de enlaces virtuais em múltiplos caminhos é usada para aprimorar a utilização de recursos físicos, ampliando as chances de acomodar um maior número de redes virtuais no substrato. Por sua vez, a migração de elementos de redes virtuais visa reotimizar a utilização dos recursos físicos. O procedimento de mapeamento de roteadores e enlaces é realizado em etapas distintas. Os experimentos foram realizados utilizando topologias geradas de forma aleatória tanto para o substrato quanto para as VNs, com conectividade fixa de 50%. Não são apresentadas taxas de rejeição.

Outro modelo *online*, formulado por Chowdhury et al. [Chowdhury et al. 2009], também realiza o mapeamento de roteadores e enlaces em fases distintas. Entretanto, restrições de localidade são usadas para pré-selecionar roteadores físicos onde roteadores virtuais serão hospedados, o que, segundo os autores, facilita o estágio subsequente de mapeamento de enlaces. Além disso, o modelo também possibilita a fragmentação de enlaces virtuais em múltiplos caminhos físicos. As topologias usadas na avaliação do modelo possuem as mesmas características das utilizadas por Yu et al. [Yu et al. 2008], sendo geradas de forma aleatória com conectividade fixa de 50%. As taxas de rejeição para o conjunto de requisições nos cenários estudados atingem entre 25% e 35%.

Alkmim et al. [Alkmim et al. 2013] propõem um modelo focado na necessidade de transferir imagens binárias de roteadores virtuais (armazenadas em repositórios conectados à rede) para os roteadores físicos que os hospedarão. Além de considerar requisitos relacionados às capacidades de roteadores e enlaces, bem como restrições de localidade, o modelo objetiva minimizar o tempo necessário para transferir tais imagens pela rede. As topologias empregadas nos cenários de avaliação são do tipo orgânicas, criadas utilizando o modelo BA-2 [Albert and Barabási 2000], e nos experimentos realizados, as taxas de rejeição variam entre 40% e 80%.

Cheng et al. [Cheng et al. 2011] realizam o mapeamento de elementos de redes virtuais baseados em um esquema de classificação de nós. Roteadores e enlaces, tanto virtuais quanto físicos, são classificados conforme sua capacidade e a capacidade de seus vizinhos. Elementos físicos e virtuais são ordenados conforme sua classificação, visando combinar elementos com classificação semelhante para produzir seus mapeamentos. Segundo os autores, tal estratégia visa evitar a criação de gargalos na rede física. Nos cenários propostos para a avaliação, as topologias do substrato e das VNs são geradas de forma aleatória, e as taxas de rejeição atingidas variam entre 15% e 25%.

Bays et al. [Bays et al. 2012], por sua vez, apresentam um modelo que considera a necessidade de prover, no processo de alocação, confidencialidade às redes virtuais. Redes virtuais podem requerer diferentes níveis de criptografia, e roteadores virtuais que necessitam realizar operações criptográficas devem ser mapeados a roteadores físicos capazes de dar suporte a tais operações. Requisitantes de redes virtuais podem, ainda, demandar que suas redes não compartilhem recursos físicos com outras redes virtuais específicas. A avaliação é realizada usando topologias orgânicas, geradas com o modelo BA-2, atingindo taxas de rejeição entre 48% e 58% nos cenários em que os requisitos de segurança são considerados.

Além dos trabalhos até então mencionados, cujo foco é o mapeamento de re-

des virtuais, destacam-se também trabalhos que visam prover isolamento de recursos em ambientes de virtualização de redes. Tais abordagens visam garantir que as alocações de recursos definidas na etapa de mapeamento serão cumpridas corretamente. Carvalho et al. [Carvalho et al. 2011] apresentam uma abordagem dinâmica baseada em lógica nebulosa, nos perfis de utilização dos roteadores virtuais e nos contratos de nível de serviço. A ideia chave é punir redes virtuais que excedam a utilização dos recursos estabelecidos em seus contratos. Por sua vez, Fernandes e Duarte [Fernandes and Duarte 2011] propõem uma ferramenta para controle e gerenciamento de recursos que, por meio do monitoramento do tráfego de cada rede virtual, reajusta parâmetros das redes para garantir que os contratos de nível de serviço não serão violados. Como a avaliação de trabalhos dessa linha de pesquisa abstrai a etapa de mapeamento, não há dados relacionados à taxa de rejeição ou topologias empregadas. Os mesmos devem ser entendidos como complementares a este trabalho, tendo em vista que assumimos a oferta, pelo substrato, de mecanismos que forneçam isolamento de recursos e confidencialidade.

Como mencionado anteriormente, desconhecem-se trabalhos anteriores que avaliarem de maneira justa o resultado de estratégias de mapeamento considerando diferentes topologias de rede. Os trabalhos desenvolvidos utilizam topologias genéricas ou orgânicas, como as geradas aleatoriamente ou pelo modelo BA-2, as quais não representam fielmente as propriedades topológicas presentes nas infraestruturas de redes de provedores. Portanto, o presente trabalho objetiva compreender como topologias tipicamente observadas em substratos físicos reais influenciam diferentes aspectos do mapeamento de redes virtuais, tais como a rejeição de requisições de redes virtuais e a utilização dos recursos físicos.

3. Topologias de Redes de Provedores

No contexto deste artigo, assumimos, sem perda de generalidade, que provedores de infraestrutura (InPs) apresentam topologias equivalentes àquelas empregadas por provedores de serviços de Internet (ISPs – *Internet Service Providers*). Nesse contexto, as topologias mais tradicionais são: *ladder*, estrela e *hub & spoke (H&S)*. Infraestruturas de rede organizadas em topologia *ladder* têm como principal característica a ausência de *hubs*, isto é, nós com alta conectividade e concentração de fluxo. Além disso, a infraestrutura é formada por um conjunto de *loops*. Esse tipo de topologia tende a possuir um custo baixo no que tange à implantação de enlaces (devido à baixa conectividade) e a apresentar distâncias longas (em termos de número de *hops*) entre nós. Redes *estrela* apresentam poucos *hubs* conectados a um número elevado de nós que, por sua vez, possuem conectividade baixa. Nesse tipo de rede, a distância entre nós tende a ser pequena, porém o tráfego tende a se concentrar nos *hubs*. A classe *H&S* apresenta um número maior de *hubs* em relação às outras topologias mencionadas, e há uma tendência de que esses *hubs* estejam interconectados. Além disso, existe uma grande quantidade de nós que se conecta a um ou mais *hubs*. A Figura 1 ilustra exemplos das três topologias recém mencionadas.

Kamiyama et al. [Kamiyama et al. 2010] realizaram um estudo em que sistematizam a classificação de infraestruturas de redes de provedores nas três classes de topologias previamente descritas. Para o estudo, foram analisadas 23 redes comerciais de *backbone* (disponíveis publicamente) com tamanhos variando entre 21 e 128 nós. A partir dessa análise, os autores definem um conjunto de métricas, as quais capturam as principais propriedades topológicas presentes nessas infraestruturas. Tais métricas incluem, por exemplo, o grau de conectividade da topologia e a presença de nós entendidos como *hubs*. Dessa forma, os autores mapeiam a relação entre tais métricas e o tipo de topologia da

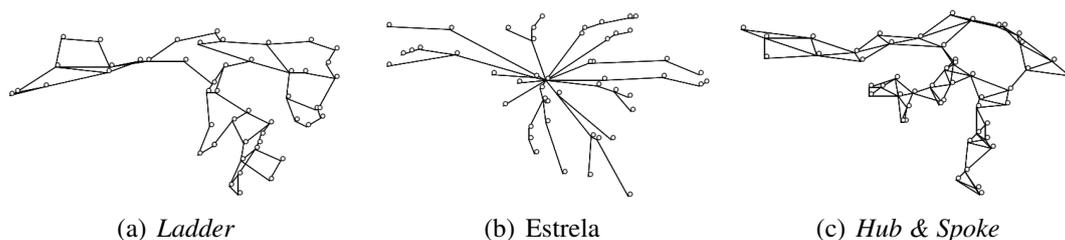


Figura 1. Exemplos de classes de topologias de provedores de rede.

infraestrutura de rede, permitindo a classificação de topologias de redes de provedores em uma das classes descritas.

Tendo em vista a classificação bem aceita de topologias de redes de provedores recém apresentada e a abordagem sistemática proposta por Kamiyama et al. [Kamiyama et al. 2010] para caracterizar e, portanto, gerar essas topologias com elevado grau de fidedignidade (a redes reais), o presente artigo tomará as três classes como base para a investigação. Assim, pretende-se analisar como tais classes topológicas afetam o processo de mapeamento, identificando possíveis relações entre as taxas de rejeição e o consumo de recursos de dispositivos da infraestrutura.

4. Modelo Ótimo de Mapeamento de Redes Virtuais

Para analisar o impacto de diferentes tipos de topologias no processo de mapeamento de redes virtuais, formalizamos um modelo baseado em Programação Linear Inteira. A seguir, são detalhadas as entradas, as variáveis e as restrições desse modelo. Letras sobreescritas são usadas para representar se um conjunto ou variável refere-se a recursos virtuais (V) ou físicos (P), ou se está associado a roteadores (R) ou enlaces (L).

A topologia da rede física, bem como a de cada rede virtual requisitada, é representada por um grafo direcionado $N = (R, L)$. Os vértices R representam roteadores, enquanto que cada aresta L representa um enlace unidirecional. Enlaces bidirecionais são representados como um par de arestas em direções opostas (por exemplo, (a, b) e (b, a)). Dessa forma, o modelo permite a representação de quaisquer tipos de topologias físicas e virtuais.

Cada roteador físico está associado a um identificador de localidade, armazenado no conjunto S^P . Tal permite que requisitantes de redes virtuais indiquem localidades específicas em que certos roteadores virtuais devem ser instanciados (por exemplo, para garantir conectividade entre duas ou mais localidades). Caso um roteador virtual possua requisito de localidade, o mesmo é armazenado no conjunto S^V .

Considera-se que roteadores físicos possuem capacidades limitadas de CPU e memória. Tais capacidades são representadas, respectivamente, por C_i^P e M_i^P . De forma análoga, os requisitos de CPU e de memória de cada roteador virtual de uma rede r são representados por $C_{r,i}^V$ e $M_{r,i}^V$. Enlaces físicos, por sua vez, possuem capacidade limitada de largura de banda, representada por $B_{i,j}^P$, enquanto que a largura de banda requisitada por cada enlace virtual é representada por $B_{r,i,j}^V$.

O modelo recebe requisições e aloca redes virtuais de forma *online*. Por conta disso, é necessário considerar os elementos virtuais já alocados no substrato. Roteadores virtuais previamente alocados são representados pelo conjunto $E_{i,r,j}^R$, e enlaces, pelo conjunto $E_{i,j,r,k,l}^L$.

As variáveis do modelo representam a solução ótima do problema de mapeamento para as entradas recebidas. Tais variáveis indicam onde estão alocados, no substrato físico, os roteadores e enlaces virtuais requisitados. Caso uma requisição seja aceita, cada um de seus roteadores é alocado a um roteador físico, enquanto que cada enlace virtual pode ser mapeado a um único enlace físico ou a um caminho composto por múltiplos enlaces.

- $A_{i,r,j}^R \in \{0,1\}$ – Alocação de roteadores, indica se o roteador físico i está hospedando o roteador virtual j da rede virtual r .
- $A_{i,j,r,k,l}^L \in \{0,1\}$ – Alocação de enlaces, indica se o enlace físico (i,j) está hospedando o enlace virtual (k,l) da rede virtual r .

Por fim, é apresentada a função objetivo e suas restrições. A função objetivo do modelo visa minimizar a largura de banda consumida pelas redes virtuais alocadas no substrato físico. O propósito de cada restrição será detalhado a seguir.

Objetivo:

$$\min \sum_{(i,j) \in L^P} \sum_{r \in N^V, (k,l) \in L^V} A_{i,j,r,k,l}^L B_{r,k,l}^V$$

Sujeito a:

$$\sum_{r \in N^V, j \in R^V} C_{r,j}^V A_{i,r,j}^R \leq C_i^P \quad \forall i \in R^P \quad (\text{R1})$$

$$\sum_{r \in N^V, j \in R^V} M_{r,j}^V A_{i,r,j}^R \leq M_i^P \quad \forall i \in R^P \quad (\text{R2})$$

$$\sum_{r \in N^V, (k,l) \in L^V} B_{r,k,l}^V A_{i,j,r,k,l}^L \leq B_{i,j}^P \quad \forall (i,j) \in L^P \quad (\text{R3})$$

$$\sum_{i \in R^P} A_{i,r,j}^R = 1 \quad \forall r \in N^V, j \in R^V \quad (\text{R4})$$

$$\sum_{j \in R^V} A_{i,r,j}^R \leq 1 \quad \forall i \in R^P, r \in N^V \quad (\text{R5})$$

$$\sum_{j \in R^P} A_{i,j,r,k,l}^L - \sum_{j \in R^P} A_{j,i,r,k,l}^L = A_{i,r,k}^R - A_{i,r,l}^R \quad \forall r \in N^V, (k,l) \in L^V, i \in R^P \quad (\text{R6})$$

$$j A_{i,r,k}^R = l A_{i,r,k}^R \quad \forall (i,j) \in S^P, r \in N^V, (k,l) \in S^V \quad (\text{R7})$$

$$A_{i,r,j}^R = E_{i,r,j}^R \quad \forall (i,r,j) \in E^R \quad (\text{R8})$$

$$A_{i,j,r,k,l}^L = E_{i,j,r,k,l}^L \quad \forall (i,j,r,k,l) \in E^L \quad (\text{R9})$$

A restrição R1 garante que a capacidade de CPU de cada roteador físico não será excedida, garantindo, portanto, que os requisitos CPU de cada roteador virtual serão aten-

dados. A restrição R2 aplica o mesmo controle à capacidade de memória dos roteadores, e a restrição R3, à largura de banda dos enlaces. A restrição R4 garante que todo roteador virtual será alocado a um roteador físico. Por sua vez, a restrição R5 impede que múltiplos roteadores virtuais de uma mesma rede virtual sejam alocados a um mesmo roteador físico. A restrição R6 garante que todo enlace virtual será alocado a um caminho físico válido. Dessa forma, o caminho físico hospedando um enlace virtual (a, b) será garantidamente um caminho válido entre o roteador físico hospedando o roteador virtual a e o roteador físico hospedando o roteador virtual b . A restrição R7 garante que todo roteador virtual que possua um requisito de localidade será mapeado a um roteador físico na localidade solicitada. Por fim, as restrições R8 e R9 garantem que os elementos das redes virtuais previamente alocadas continuarão hospedados nos mesmos elementos físicos. A alocação dos roteadores é mantida pela restrição R8, enquanto que a alocação dos enlaces, pela restrição R9.

5. Avaliação do Impacto de Topologias no Mapeamento

Para avaliar o impacto de diferentes topologias de rede no processo de mapeamento de redes virtuais, o modelo formalizado na seção anterior foi implementado e executado no *CPLEX Optimization Studio*¹ versão 12.3. Os experimentos foram realizados em uma máquina com quatro processadores AMD Opteron 6276 e 64 GB de memória RAM, usando o sistema operacional Ubuntu GNU/Linux Server 11.10 x86_64.

5.1. Carga de Trabalho

Para realizar os experimentos, desenvolveu-se um gerador de requisições de redes virtuais. Tal gerador é executado por um período de 500 janelas de tempo. Em cada janela, são geradas, em média, cinco requisições, seguindo uma distribuição de Poisson. Cada requisição gerada possui uma duração limitada, ou seja, após um determinado número de janelas de tempo, a mesma é removida. Tal duração é de, em média, cinco janelas de tempo, seguindo uma distribuição exponencial. Ressalta-se que essa forma de instanciação, baseada no emprego de janelas de tempo e com uso dos modelos de chegada de requisições e de duração de redes virtuais previamente citados, vem sendo empregada em trabalhos da área, como nos realizados por Yu et al. [Yu et al. 2008] e Houidi et al. [Houidi et al. 2011].

As topologias utilizadas como substrato físico são geradas por meio da ferramenta IGen². Para gerar redes com as características topológicas das classes previamente apresentadas – *estrela*, *ladder* e *hub & spoke* – são usados, respectivamente, os métodos *Mentor*, *MultiTour* e *TwoTree*. Em linha com a caracterização de topologias apresentada anteriormente na Seção 3, na rede *ladder* os nós apresentam grau médio 3 e grau máximo normalizado igual a 4. A rede *estrela* possui uma proporção de nós altamente interconectados (*hubs*) menor que 0,25, enquanto que a rede *hub & spoke* apresenta uma proporção maior ou igual a 0,25. Tal proporção é definida como o número de nós com grau maior que o grau médio, dividido pelo total de nós da rede. Além dessas propriedades topológicas, as redes físicas possuem 50 roteadores, cada um com capacidade total de CPU definida como 100%, e 256 MB de memória. Os roteadores são distribuídos uniformemente entre 16 localidades e a largura de banda dos enlaces físicos é distribuída uniformemente entre 1 e 10 Gbps.

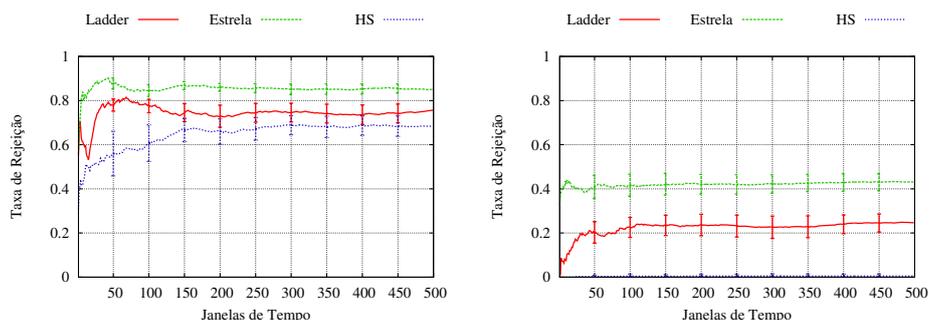
¹<http://www-01.ibm.com/software/integration/optimization/cplex-optimization-studio/>

²<http://igen.sourceforge.net/>

A topologia de cada rede virtual é gerada por meio da ferramenta BRITE³, usando o modelo Barabási-Albert (BA-2) [Albert and Barabási 2000]. Acredita-se que tal modelo é capaz de representar adequadamente as características de requisições de redes virtuais. Além disso, ressalta-se que o uso das classes de topologias típicas de provedores, nesse caso, poderia levar a uma redução artificial nas taxas de rejeição devido à similaridade entre as redes virtuais e a rede física. As redes virtuais possuem entre 2 e 5 roteadores cada. Roteadores virtuais requerem entre 10% e 50% de CPU e entre 24 MB e 128 MB de memória, ambos parâmetros seguindo uma distribuição uniforme. A largura de banda dos enlaces virtuais é distribuída uniformemente entre 1 e 5 Gbps. Foram realizados dois cenários de avaliação sobre cada topologia física, os quais se diferenciam pela presença ou ausência de requisitos de localidade. No primeiro cenário, cada rede virtual possui dois roteadores (os *end points* dessa rede) com requisitos de localidade, gerados aleatoriamente entre as 16 localidades existentes. No outro, nenhuma rede virtual possui tais requisitos. Foram executadas 30 repetições de cada experimento, considerando como base diferentes instâncias para cada tipo de substrato.

5.2. Resultados

Primeiramente, analisa-se a taxa de rejeição de requisições de redes virtuais nos cenários previamente descritos. Ressalta-se que requisições de redes virtuais somente são rejeitadas caso não seja possível mapear todos os seus roteadores e enlaces virtuais no substrato físico. A Figura 2 ilustra a taxa média de rejeição obtida em cada cenário. Cada ponto no gráfico representa a taxa média de rejeição alcançada desde o início do experimento até a janela de tempo em questão. Observa-se claramente que, quando há restrições de localidade, as taxas de rejeição são substancialmente maiores (variando entre 65,38% e 83,71%), nas três topologias físicas, em relação aos cenários em que não há tais requisitos (nos quais variam entre 0,53% e 43,10%). O comportamento apresentado é influenciado pela redução no espaço de soluções factíveis causada pela presença de restrições de localidade.



(a) Cenários com requisitos de localidade. (b) Cenários sem requisitos de localidade.

Figura 2. Porcentagem média de requisições rejeitadas nos experimentos realizados.

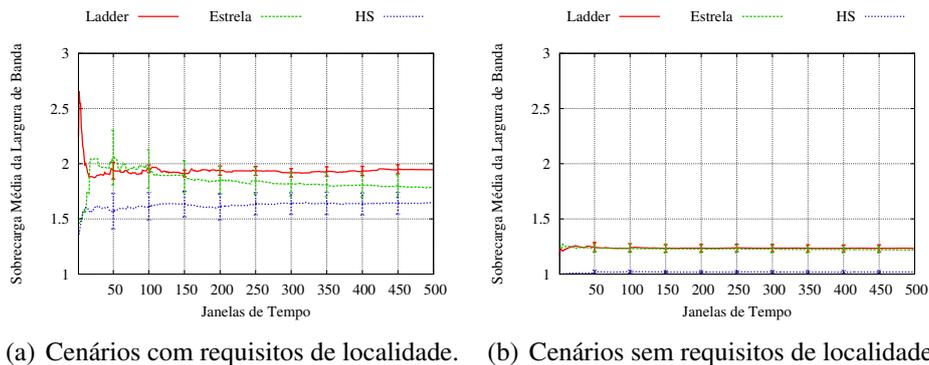
Ainda observando o gráfico ilustrado na Figura 2, percebe-se uma diferença nas taxas de rejeição ao se utilizar diferentes topologias físicas. A topologia do tipo *hub & spoke* apresenta uma taxa de rejeição inferior às demais em ambos cenários avaliados (68,44% no cenário com restrições de localidade e 0,53% no cenário sem tais restrições). Em contrapartida, a topologia *estrela* apresenta o pior desempenho (85,04% de rejeição

³<http://www.cs.bu.edu/brite/>

no cenário com localidade e 43,10% no cenário sem localidade). A topologia *ladder* apresenta taxas de rejeição de 75,63% e 24,66% para os cenários com localidade e sem localidade, respectivamente. Topologias do tipo *hub & spoke* tendem a causar a rejeição de um número menor de requisições, por possuírem, em média, um número maior de nós com alto grau de conectividade (*hubs*). A presença de múltiplos *hubs* leva a uma menor probabilidade de que o esgotamento dos recursos de um desses nós centrais cause um impacto significativo nos mapeamentos de requisições futuras. Ao contrário, topologias *estrela* apresentam poucos nós centrais, e por isso, há uma grande probabilidade de que tais nós se tornem um gargalo no processo de alocação de redes virtuais à medida em que ocorre o esgotamento de seus recursos. Já em redes da classe *ladder*, como não há nós centrais, o esgotamento de recursos de alguns enlaces físicos pode impossibilitar a criação de enlaces virtuais que utilizariam tais caminhos como “pontes” para interconectar determinados pontos da infraestrutura.

A Figura 3 ilustra a sobrecarga média dos mapeamentos de redes virtuais em cada experimento. Tal sobrecarga é medida como a razão entre a largura de banda efetivamente consumida por uma rede virtual hospedada no substrato físico e a largura de banda requisitada por tal rede. Em geral, o consumo real de largura de banda é maior do que a largura de banda total requisitada pelas redes virtuais, devido à frequente necessidade de alocar enlaces virtuais a caminhos compostos por múltiplos enlaces físicos. Somente não há sobrecarga quando cada enlace virtual é mapeado a apenas um enlace físico (razão 1,0). Ressalta-se que taxas menores de sobrecarga favorecem diretamente o provedor da infraestrutura, por economizar recursos que podem ser usados para acomodar requisições futuras. Além disso, tal economia pode levar a custos mais baixos para os solicitantes. Topologias do tipo *ladder* causam uma sobrecarga média maior em relação às demais (94,59% para cenários com localidade e 23,36% para cenários sem localidade), já que a estrutura topológica apresenta, em média, uma distância longa (em termos de número de *hops*) entre nós, bem como a ausência de (*hubs*) centrais. A topologia da classe *hub & spoke* apresenta a menor taxa de sobrecarga (64,67% para o cenário com localidade), por ser uma topologia com maior quantidade de interconexões e *hubs*. No cenário sem localidade (Figura 3(b)), nota-se que a sobrecarga média obtida nas infraestruturas *ladder* e *estrela* é similar – 23,36% e 21,92%, respectivamente – enquanto que a taxa obtida considerando-se a topologia *hub & spoke* é de apenas 1,89%. Isso evidencia que, quando consideradas restrições de localidade, enlaces virtuais tendem a ser mapeados a caminhos mais longos no substrato, devido a uma maior distância média entre os locais onde roteadores virtuais são hospedados. No entanto, topologias que contam com uma maior quantidade de *hubs* tendem a reduzir o impacto dessas restrições.

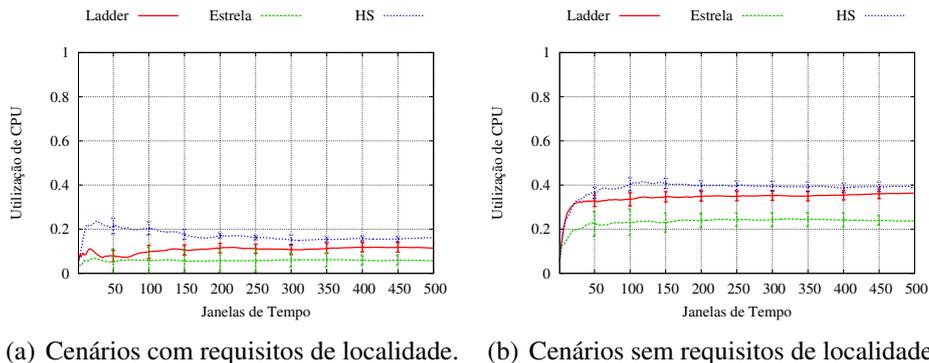
A seguir, avalia-se o consumo médio dos recursos físicos – CPU e memória dos roteadores e largura de banda dos enlaces – nos experimentos realizados. A Figura 4 apresenta o consumo médio de CPU dos roteadores físicos da infraestrutura. Considerando requisitos de localidade, nota-se que o consumo médio de CPU ao se empregar a topologia do tipo *ladder* (11,49%) é aproximadamente duas vezes maior que o consumo médio no experimento que utiliza a topologia do tipo *estrela* (5,36%). A topologia *hub & spoke* levou o consumo médio de CPU nos roteadores físicos a 16,82%. Nos experimentos em que não há requisitos de localidade (Figura 4(b)), nota-se um consumo de CPU maior, sendo consumido, em média, 23,80% dos recursos na topologia *estrela*, 35,22% na topologia *ladder* e 38,60% na topologia *hub & spoke*. O maior consumo dos recursos de CPU é diretamente influenciado pela quantidade de redes virtuais alocadas no substrato. Isso explica o consumo mais elevado nos cenários que não consideram localidade, visto



(a) Cenários com requisitos de localidade. (b) Cenários sem requisitos de localidade.

Figura 3. Sobrecarga média de largura de banda necessária para acomodar as requisições aceitas.

que nesses casos a taxa de rejeição é mais baixa. No entanto, o consumo relativamente baixo de CPU, cuja média geral é inferior a 40% em todos os experimentos, mostra que a rejeição de redes virtuais não é causada pela exaustão dos recursos de CPU dos roteadores da topologia de maneira global.

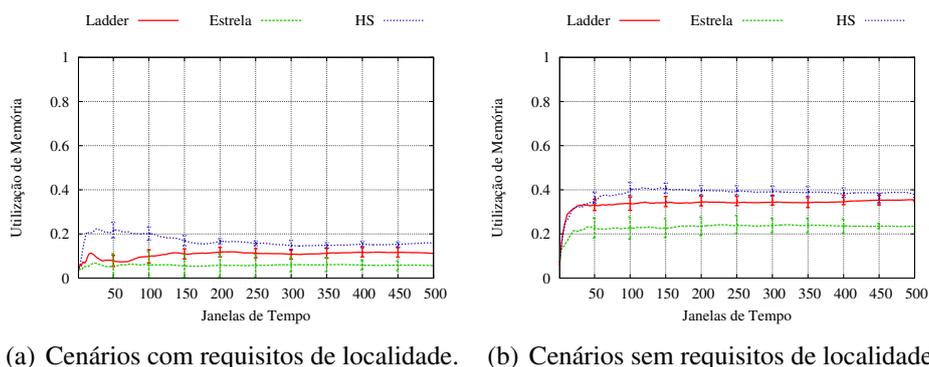


(a) Cenários com requisitos de localidade. (b) Cenários sem requisitos de localidade.

Figura 4. Utilização média de CPU dos roteadores físicos.

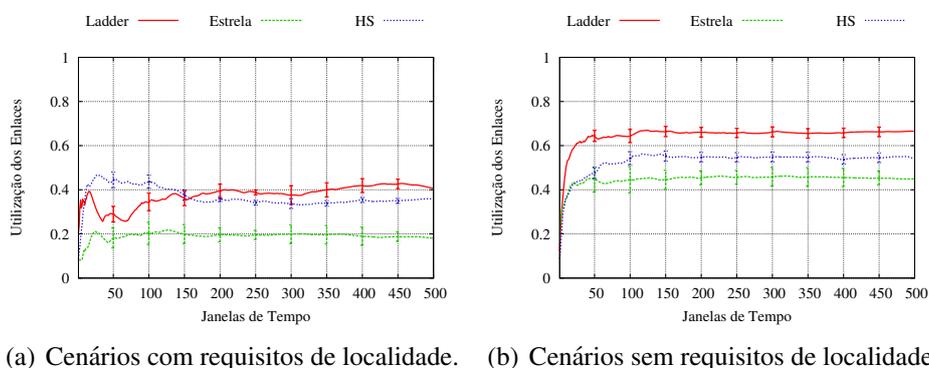
A Figura 5 apresenta o consumo médio de memória nos roteadores físicos. Percebe-se que o comportamento da utilização de memória dos roteadores é similar ao da utilização de CPU. Nos experimentos que consideram requisitos de localidade, a utilização média de memória é de 5,65% na topologia *estrela*, 11,21% na topologia *ladder* e 15,93% na topologia *hub & spoke*. Já os experimentos em que não há tais requisitos levam a uma utilização média de 23,49% na topologia *estrela*, 35,52% na topologia *ladder* e 38,03% na topologia *hub & spoke*. Nota-se que em nenhum dos experimentos ocorre o esgotamento desse recurso, podendo-se afirmar que tal fator, bem como o uso de CPU, não é a causa da rejeição de redes virtuais nesses cenários.

O consumo médio da largura de banda dos enlaces das infraestruturas é apresentado na Figura 6. Nos experimentos em que as redes virtuais possuem requisitos de localidade, há uma utilização de 18,01% dos recursos da topologia *estrela*, 40,63% da topologia *ladder* e 35,89% da topologia *hub & spoke*. Já nos experimentos sem restrições de localidade o consumo médio é de 44,93% na topologia *estrela*, 66,50% na topologia *ladder* e 54,08% na topologia *hub & spoke*. Tais resultados demonstram que, assim como o consumo de CPU e memória dos roteadores físicos, o consumo geral da largura de banda



(a) Cenários com requisitos de localidade. (b) Cenários sem requisitos de localidade.

Figura 5. Utilização média de memória dos roteadores físicos.



(a) Cenários com requisitos de localidade. (b) Cenários sem requisitos de localidade.

Figura 6. Utilização média de largura de banda dos enlaces físicos.

disponível na topologia não é a causa das taxas de rejeição observadas nos experimentos. A saturação de alguns pontos específicos das topologias faz com que não seja possível alocar um número maior de redes virtuais, ainda que uma visão global da rede revele que ainda há recursos disponíveis.

Para melhor compreender as taxas de rejeição observadas nos experimentos realizados, a Figura 7 ilustra a utilização média dos recursos de roteadores com diferentes graus de conectividade nos cenários que empregam a topologia *hub & spoke*. A média é calculada sobre as 100 últimas janelas de tempo (após a estabilização das taxas de rejeição), e normalizada em relação ao roteador com maior taxa de utilização. Nota-se uma relação clara entre o grau de conectividade e a utilização de CPU e memória dos roteadores físicos, evidenciando o fato de que os recursos dos roteadores com maiores graus de conectividade (*hubs*) são consumidos em uma proporção mais alta. Essa relação é ainda mais acentuada quando as redes virtuais possuem requisitos de localidade. Os resultados evidenciam a importância da presença de *hubs* na topologia física, e mostram como a exaustão de recursos em pontos específicos da rede de um provedor pode exacerbar a rejeição de requisições. Ressalta-se que fenômenos semelhantes de consumo são observados nas topologias *estrela* e *ladder* (em maior e menor escala, respectivamente), porém os resultados são omitidos por limitação de espaço.

Por fim, na Figura 8 apresenta-se o tempo médio necessário para encontrar a alocação ótima de cada requisição aceita. Ressalta-se que, nesse caso, o eixo vertical é apresentado em escala logarítmica, visto que há uma diferença significativa nos resul-

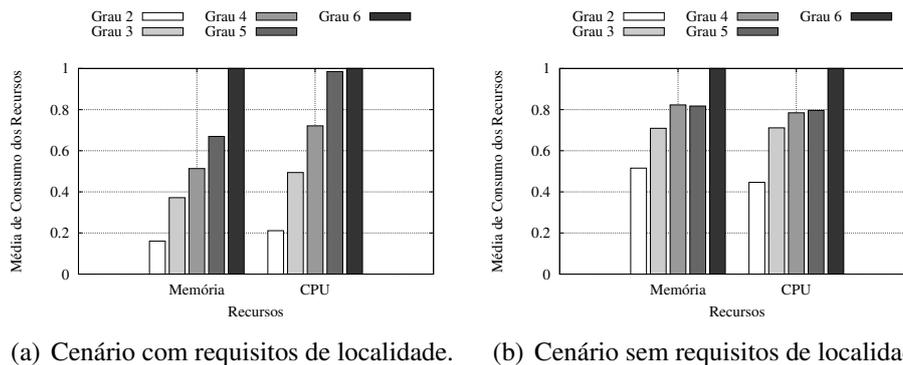


Figura 7. Consumo médio dos recursos de roteadores físicos com diferentes graus de conectividade nos cenários que empregam a topologia *hub & spoke*.

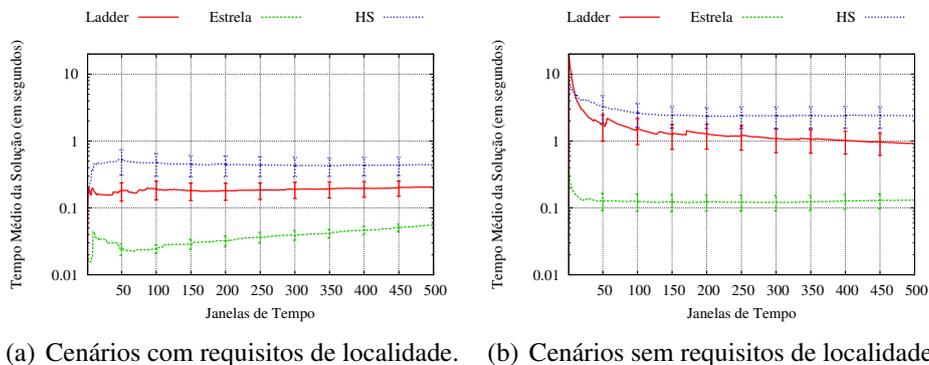


Figura 8. Tempo médio necessário para encontrar a alocação ótima.

tados de diferentes experimentos. Em todos os cenários com requisitos de localidade, o tempo necessário para a alocação nas topologias avaliadas permanece abaixo de 1 segundo. O emprego da topologia *estrela* leva a, em média, um tempo de 0,055 segundos, a topologia *ladder*, a um tempo médio de 0,20 segundos e a topologia *hub & spoke*, um tempo de 0,44 segundos. Nos demais cenários, em que não há restrições de localidade, as médias gerais permanecem abaixo de 3 segundos. A topologia *estrela* leva a, em média, um tempo de 0,13 segundos, a topologia *ladder* a um tempo médio de 0,92 segundos e a topologia *hub & spoke* a um tempo de 2,41 segundos.

As médias de tempo relativamente altas observadas nos cenários que consideram a topologia do tipo *hub & spoke* devem-se à maior quantidade de enlaces presentes nessa topologia. Tal característica leva a um conjunto maior de possíveis mapeamentos para as redes virtuais requisitadas, o que tende a aumentar o tempo necessário para encontrar a alocação ótima. De forma similar, a desconsideração de requisitos de localidade também leva a um maior espaço de soluções factíveis, o que explica as médias de tempo mais elevadas observadas nos cenários que possuem tal característica. Além disso, notam-se alguns picos no início dos experimentos, chegando a um máximo de 24,81 segundos no cenário em que é usada a topologia *ladder*, e 9,99 segundos no cenário em que emprega-se a topologia *hub & spoke*. Tal comportamento deve-se à maior quantidade de recursos disponíveis no início dos experimentos (quando as redes físicas encontram-se com uma grande quantidade de recursos disponíveis), o que também amplia as possibilidades de arranjo de redes virtuais nos substratos.

Os resultados apresentados mostram que há um impacto significativo na taxa de rejeição e no consumo dos recursos físicos das infraestruturas ao se utilizar diferentes classes de topologias de rede para a alocação de redes virtuais. A estrutura topológica exerce um impacto ainda maior ao se considerarem requisitos de localidade nas requisições de redes virtuais. Tais casos evidenciam que as rejeições de redes virtuais requisitadas não são causadas pelo esgotamento de recursos da infraestrutura, mas sim por fatores relacionados a determinadas características topológicas.

O principal fator que influencia a rejeição de redes virtuais é o esgotamento de recursos em regiões pontuais do substrato. Por exemplo, em topologias do tipo *estrela* e *hub & spoke*, em geral, o esgotamento dos recursos físicos dos *hubs*, além dos enlaces conectados aos mesmos, consiste na principal causa da impossibilidade de se mapear novas redes virtuais. Em topologias da classe *ladder*, em que não há *hubs*, a principal causa do aumento de requisições rejeitadas é o esgotamento dos recursos de enlaces específicos da topologia. Enlaces entendidos como “pontes” na infraestrutura podem se tornar gargalos e, se os recursos de um de tais enlaces se esgotam, a infraestrutura é particionada em dois grupos de roteadores sem conectividade entre si.

Em resumo, mapeamentos de redes virtuais em topologias *estrela* apresentam baixo tempo de resolução, porém alta taxa de rejeição e, por consequência, baixa utilização dos recursos físicos. Em topologias *ladder*, a taxa de rejeição e o tempo de resolução apresentam valores intermediários em relação às demais classes de topologias consideradas, porém o mapeamento de redes virtuais leva a um consumo maior de largura de banda. Por fim, topologias do tipo *hub & spoke* apresentam baixas taxas de rejeição e de sobrecarga média dos enlaces, porém levam a tempos de resolução mais altos em relação às demais topologias.

6. Conclusões

A virtualização de redes é um tema que vem recebendo considerável atenção da comunidade científica e da indústria, resultando em uma série de trabalhos que envolvem principalmente questões de mapeamento de redes virtuais. No entanto, desconhecem-se trabalhos anteriores que avaliem de maneira justa o resultado de estratégias de mapeamento considerando diferentes topologias de rede. Os trabalhos até então desenvolvidos, de maneira geral, utilizam topologias genéricas ou orgânicas, as quais não representam fielmente as propriedades topológicas presentes nas infraestruturas de redes de provedores.

Após formalizar um modelo ótimo de mapeamento *online* de redes virtuais e aplicá-lo sobre substratos com diferentes características topológicas tipicamente observadas em redes de provedores, caracterizou-se o impacto de diferentes classes de topologias no que diz respeito a taxas de rejeição e à utilização dos recursos da infraestrutura. Os resultados obtidos demonstram o impacto significativo causado pelo mapeamento de redes virtuais nas diferentes estruturas topológicas avaliadas. A alocação de redes virtuais é prejudicada pelo esgotamento de recursos em alguns pontos específicos da infraestrutura física, ainda que uma visão global da rede revele que ainda há recursos disponíveis no restante do substrato. Tal impacto é ainda maior quando consideradas restrições de localidade em requisições de redes virtuais.

Tendo avaliado o impacto do mapeamento de redes virtuais em substratos de redes com diferentes estruturas topológicas, pretende-se investigar estratégias para reduzir taxas de rejeição observadas em redes físicas de provedores. Mais especificamente, pretende-se, como trabalho futuro, investigar como um substrato físico pode ser pontualmente ex-

pandido ou redimensionado de forma a reduzir a rejeição de redes virtuais, considerando-se os custos necessários para realizar tais modificações na infraestrutura. A ideia chave é identificar os gargalos da rede com base em requisições negadas no passado e, por meio de ajustes pontuais na infraestrutura, ampliar consistentemente a aceitação de requisições de redes virtuais futuras.

Referências

- Albert, R. and Barabási, A.-L. (2000). Topology of evolving networks: Local events and universality. *Physical Review Letters*, 85:5234 – 5237.
- Alkmim, G., Batista, D., and da Fonseca, N. (2013). Mapping virtual networks onto substrate networks. *Journal of Internet Services and Applications*, 4(1):3.
- Bays, L. R., Oliveira, R. R., Buriol, L. S., Barcellos, M. P., and Gaspary, L. P. (2012). Um modelo para mapeamento Ótimo de redes virtuais com requisitos de segurança. In *XII Simpósio Brasileiro de Segurança da Informação e de Sistemas Computacionais*, pages 249 – 262.
- Carvalho, H. E. T., Fernandes, N. C., and Duarte, O. C. M. B. (2011). Um controlador robusto de acordos de nível de serviço para redes virtuais baseado em lógica nebulosa. In *XXIX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pages 645 – 658.
- Cheng, X., Su, S., Zhang, Z., Shuang, K., Yang, F., Luo, Y., and Wang, J. (2012). Virtual network embedding through topology awareness and optimization. *Computer Networks*, 56(6):1797 – 1813.
- Cheng, X., Su, S., Zhang, Z., Wang, H., Yang, F., Luo, Y., and Wang, J. (2011). Virtual network embedding through topology-aware node ranking. *SIGCOMM Computer Communication Review*, 41(2):38 – 47.
- Chowdhury, N., Rahman, M., and Boutaba, R. (2009). Virtual network embedding with coordinated node and link mapping. In *INFOCOM 2009, IEEE*, pages 783 – 791.
- Fajjari, I., Aitsaadi, N., Pujolle, G., and Zimmermann, H. (2011). Vne-ac: Virtual network embedding algorithm based on ant colony metaheuristic. In *Communications, 2011 IEEE International Conference on*, pages 1 – 6.
- Fernandes, N. C. and Duarte, O. C. M. B. (2011). Provendo isolamento e qualidade de serviço em redes virtuais. In *XXIX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pages 295 – 308.
- Haddadi, H., Rio, M., Iannaccone, G., Moore, A., and Mortier, R. (2008). Network topologies: inference, modeling, and generation. *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, 10(2):48 – 69.
- Houidi, I., Louati, W., Ameer, W. B., and Zeghlache, D. (2011). Virtual network provisioning across multiple substrate networks. *Computer Networks*, 55(4):1011 – 1023.
- Kamiyama, N., Kawahara, R., Mori, T., Harada, S., and Hasegawa, H. (2010). Impact of topology on parallel video streaming. In *Network Operations and Management Symposium (NOMS), 2010 IEEE*, pages 607 – 614.
- Yu, M., Yi, Y., Rexford, J., and Chiang, M. (2008). Rethinking virtual network embedding: substrate support for path splitting and migration. *SIGCOMM Computer Communication Review*, 38(2):17 – 29.

APÊNDICE B – ARTIGO PUBLICADO - CNSM 2013

- Título: Characterizing the Impact of Network Substrate Topologies on Virtual Network Embedding
- Conferência: 9th International Conference on Network and Service Management (CNSM 2013)
- URL: <http://www.cnsm-conf.org/2013/>
- Data: 14-18 de Outubro de 2013
- Local: Zurich, Switzerland

Characterizing the Impact of Network Substrate Topologies on Virtual Network Embedding

Marcelo Caggiani Luizelli, Leonardo Richter Bays, Luciana Saete Buriol,
Marinho Pilla Barcellos, Luciano Paschoal Gaspar
Institute of Informatics
Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS)
{mcluiuzelli,lrbaays,buriol,marinho,paschoal}@inf.ufrgs.br

Abstract—Network virtualization is a mechanism that allows the coexistence of multiple virtual networks on top of a single physical substrate. One of the research challenges addressed recently in the literature is the efficient mapping of virtual resources on physical infrastructures. Although this challenge has received considerable attention, state-of-the-art approaches present, in general, a high rejection rate, *i.e.*, the ratio between the number of denied virtual network requests and the total amount of requests is considerably high. In this work, we investigate the relationship between the quality of virtual network mappings and the topological structures of the underlying substrates. Exact solutions of an online embedding model are evaluated under different classes of network topologies. The obtained results demonstrate that the employment of physical topologies that contain regions with high connectivity significantly contributes to the reduction of rejection rates and, therefore, to improved resource usage.

I. INTRODUCTION

Network virtualization is a mechanism that allows the coexistence of multiple heterogeneous virtual networks (VNs) sharing resources of the same physical substrate. The architectures, protocols, and topologies used in these VNs are unconstrained by the substrate network on which they are instantiated. Through network virtualization, Infrastructure Providers (InPs) are able to easily allocate and deallocate virtual networks with proper resource isolation. In other words, this mechanism enables InPs to support the creation of custom networks on demand, meeting different requirements imposed by requesters.

One of the major research challenges in network virtualization is the efficient mapping of physical resources to virtual networks (VNE – *Virtual Network Embedding*). The resource mapping process must consider the capacities of physical network devices, as well as the demands of virtual networks (for instance, virtual link bandwidth and processing capacity of virtual routers). Although previous work explores the problem of online virtual network embedding [1]–[4], considerably high rejection rates are commonly observed (as high as 53%). We assume that a subset of these rejections is caused by temporary resource exhaustion, *i.e.*, periods in which the available resources in the infrastructure as a whole are not sufficient to meet the demand. We theorize, however, that most rejections occur in situations in which a significant amount of resources is available, but a few saturated devices and links, depending on connectivity features of the physical substrate, hinder the acceptance of new requests.

Despite efforts to solve the virtual network embedding problem, we are not aware of previous attempts to investigate

the influence of network topologies in the process of virtual network embedding. Moreover, previous work in this area has considered topologies that often do not reflect those observed in commercial networks [5]. Understanding the relationship between the employment of different network topologies and the mapping process is important to determine how certain topological features influence this process. For example, topologies with higher connectivity in strategic regions may favor a better utilization of physical resources, which in turn may lead to lower rejection rates. Such outcomes have the potential to raise the profit obtained by InPs and, at the same time, reduce costs for virtual network requesters.

In this paper, we characterize the impact of different classes of topologies typically employed in commercial infrastructures on the quality of the virtual network embedding process. More specifically, we formalize an optimal virtual network embedding model and evaluate it on substrates with different types of topologies – namely, *star*, *ladder*, and *hub & spoke*. In this evaluation, we consider different metrics such as rejection rate and resource consumption of physical network devices. In summary, the main relevant contributions of this paper are: (i) the formalization of an *online* embedding model considering location constraints; (ii) the characterization of networks that are typically employed by infrastructure providers, and (iii) the evaluation and discussion of the impact of different types of topologies in the virtual network embedding process.

The remainder of this paper is organized as follows. Section 2 presents a discussion of related work in the area of virtual network embedding, highlighting the topologies considered in each work and the rejection rates obtained. In Section 3 we characterize the types of network topologies considered in this work. In Section 4 we formalize the *online* virtual network embedding model. In Section 5 we present and evaluate the obtained results. Finally, in Section 6 we conclude this paper with final remarks and perspectives for future work.

II. RELATED WORK

In this section, we present related work in the area of virtual network embedding. We briefly summarize the proposed solutions, highlighting the types of physical and virtual topologies employed, as well as rejection rates obtained by embedding methods, when available.

Yu *et al.* [1] present an online virtual network embedding model supporting path splitting and migration. Path splitting improves the utilization of physical resources by embedding a higher number of virtual networks on the substrate, while

the migration of virtual network elements aims to reoptimize physical resource usage. Router and link mapping are performed in distinct steps. The experiments employ randomly generated topologies for physical and virtual networks, with fixed connectivity of 50%. No rejection rates are presented.

Another online model, formulated by Chowdhury *et al.* [2], also performs router and link mapping in distinct steps. However, location constraints are used to preselect physical routers on which virtual routers will be hosted. According to the authors, the preselection facilitates the subsequent stage of link mapping. This model also allows path splitting. Physical topologies used in the evaluation of this model have the same characteristics as those used by Yu *et al.* [1] (randomly generated with fixed connectivity of 50%). Experiments are performed with three types of VN topologies, namely *random*, *hub & spoke*, and *full mesh*. Rejection rates observed in experiments using *random* virtual topologies vary between 20% and 45%. *Hub & spoke* topologies led to a rejection rate of 35%, whereas the rejection rate of *full mesh* VNs varies between 40% and 45%.

Alkmim *et al.* [3] propose a model that focuses on minimizing the time needed to transfer binary images of virtual routers (stored in repositories connected to the network) to the physical routers that will host them. Their model considers requirements related to router and link capacity, as well as location constraints. The evaluation scenarios employ organic topologies created using the BA-2 model [6]. On average, rejection rates in experiments performed by the authors are approximately 53%.

Cheng *et al.* [4] perform the mapping of virtual network elements by ranking routers and links according to their own capacity as well as the capacity of their neighbors. Virtual routers and links are mapped to similarly ranked physical devices and paths. According to the authors, this strategy aims to avoid the formation of bottlenecks on the physical network. In the evaluated scenarios, physical and virtual topologies are randomly generated and rejection rates vary between 15% and 25%.

Davy *et al.* [7] present a model that builds virtual networks according to spanning trees and embeds them on a physical substrate. The model is able to prioritize either lower hosting costs or lower delay for embedded VNs. In contrast to the publications presented above, which use organic and randomly generated physical topologies, experiments are performed on a physical network created by the authors that is based on publicly available topologies used by Internet Service Providers (ISPs). However, it was out of the scope of this paper to compare different types of topologies used by ISPs. Additionally, no rejection rates are presented.

As previously stated, we are not aware of previous attempts to evaluate the results of virtual network embedding strategies considering different types of network topologies in a precise manner. Most publications in this area employ topologies that may not faithfully represent the topological properties of infrastructure provider networks, and to the best of our knowledge, there have been no attempts to evaluate the influence of different types of physical topologies. Moreover, as previously stated, considerably high rejection rates are often observed. For these reasons, this study aims to understand

how topologies that are typically employed in real physical substrates influence different aspects of virtual network embedding, such as the rejection of virtual network requests and physical resource usage.

III. INP NETWORK TOPOLOGIES

In the context of this paper, we assume, without loss of generality, that infrastructure providers (InPs) employ network topologies that are equivalent to those used by Internet Service Providers (ISPs). The most traditional ISP network topologies are known as: *ladder*, *star* and *hub & spoke*. Network topologies organized as *ladder* are characterized by the absence of hubs, *i.e.*, nodes with high connectivity and concentration of flows. Additionally, the infrastructure is formed by a set of loops. This type of topology tends to have lower cost regarding the deployment of links (due to its low connectivity) and the distance between nodes (in terms of number of hops) is typically high. *Star* networks have a low number of hubs connected to numerous nodes which, in turn, have low connectivity. In this type of network, the distance between nodes tends to be low, but traffic tends to become concentrated on the hubs. The *hub & spoke* class is characterized by a comparatively higher number of hubs, which tend to be interconnected. Additionally, a high number of nodes is connected to one or more hubs. Figure 1 illustrates examples of the three aforementioned topology classes.

Kamiyama *et al.* [8] conducted a study that formalizes the classification of ISP networks into the three previously described topology classes. In their study, the authors analyzed 23 commercial backbone networks (publicly available) with sizes ranging from 21 to 128 nodes. Through this analysis, the authors define a set of metrics that capture the main topological properties present in each infrastructure. Such metrics include, for example, the connectivity degree of the network and the presence of *hub* nodes. Thus, the authors map the relationship between these metrics and the type of network topology of the infrastructure, enabling the classification of ISP network topologies into one of the previously described classes.

Given the well accepted classification of ISP network topologies presented above and the systematic approach proposed by Kamiyama *et al.* [8] to characterize and, therefore, generate these topologies with high degree of fidelity (in relation to real networks), in this paper we consider these three classes as the basis of our investigation. Thus, we intend to analyze how the employment of these topological classes affects the mapping process in order to identify possible correlations between different topological factors, physical resource usage, and rejection rates.

IV. OPTIMAL MODEL FOR VN EMBEDDING

As our objective was to capture the impact of the underlying substrate topology in the network embedding problem, we formulated it as an Integer Linear Programming problem and solved it exactly by using an optimization software. The employment of such model means that the results are the best possible one would obtain when considering a substrate topology or another. Next, we describe the inputs, variables, and constraints of this model. Superscript letters are used to represent whether a set or variable is related to virtual (V) or

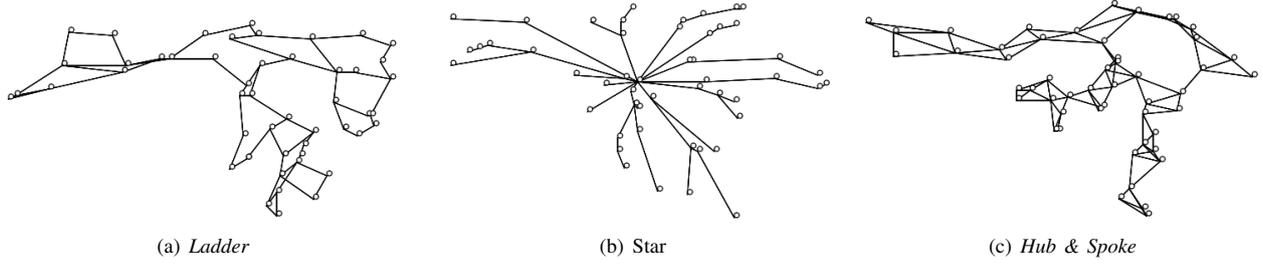


Fig. 1. Examples of InP topology classes.

physical (P) resources, or whether it is associated to routers (R) or links (L).

Both physical topologies and virtual network requests are represented by directed graphs $N = (R, L)$. Vertices R represent routers, while each edge L represents a unidirectional link. Bidirectional links are represented as a pair of edges in opposite directions (for instance, (a, b) and (b, a)). Thus, the model allows the representation of any type of physical and virtual topology.

Each physical router is associated with a location identifier stored in a set S^P . This enables virtual network requesters to indicate specific locations in which virtual routers must be instantiated (e.g., to ensure connectivity between two or more geographical locations). If a virtual router has a location requirement, it is stored in set S^V . Our approach of tagging routers with specific location identifiers differs from previous work [2], [9], which treat locations simply as regions defined by radius.

In real life, physical routers have limited CPU and memory capacities. In our model such capacities are represented, respectively, by C_i^P and M_i^P . Analogously, CPU and memory requirements of each virtual router on a network r are represented by $C_{r,i}^V$ and $M_{r,i}^V$. Likewise, physical links have limited bandwidth capacity, represented by $B_{i,j}^P$, while the bandwidth required by each virtual link is represented by $B_{r,i,j}^V$.

The model takes as input virtual network requests and embeds them in an online manner. Thus, it is necessary to consider virtual elements that were previously embedded on the substrate. Previously embedded virtual routers are stored in set $E_{i,r,j}^R$, while previously embedded links are stored in set $E_{i,j,r,k,l}^L$.

The variables are outputs of our model and represent the optimal solution of the virtual network embedding problem for the given set of inputs. These variables indicate in which location the requested virtual routers and links are allocated on the physical substrate. If a request is accepted, each of its virtual routers is mapped to a physical router, whereas each virtual link is mapped to one or more consecutive physical links (a path).

- $A_{i,r,j}^R \in \{0, 1\}$ – Router allocation, indicates whether physical router i is hosting virtual router j from virtual network r .
- $A_{i,j,r,k,l}^L \in \{0, 1\}$ – Link allocation, indicates whether physical link (i, j) is hosting virtual link (k, l) from virtual network r .

Based on the above inputs and outputs, we now present the

objective function and its constraints. The objective function of the model aims at minimizing the total bandwidth consumed by virtual networks embedded on the substrate. The purpose of each constraint is explained next.

Objective:

$$\min \sum_{(i,j) \in L^P} \sum_{r \in N^V, (k,l) \in L^V} A_{i,j,r,k,l}^L B_{r,k,l}^V$$

Subject to:

$$\sum_{r \in N^V, j \in R^V} C_{r,j}^V A_{i,r,j}^R \leq C_i^P \quad \forall i \in R^P \quad (C1)$$

$$\sum_{r \in N^V, j \in R^V} M_{r,j}^V A_{i,r,j}^R \leq M_i^P \quad \forall i \in R^P \quad (C2)$$

$$\sum_{r \in N^V, (k,l) \in L^V} B_{r,k,l}^V A_{i,j,r,k,l}^L \leq B_{i,j}^P \quad \forall (i, j) \in L^P \quad (C3)$$

$$\sum_{i \in R^P} A_{i,r,j}^R = 1 \quad \forall r \in N^V, j \in R^V \quad (C4)$$

$$\sum_{j \in R^V} A_{i,r,j}^R \leq 1 \quad \forall i \in R^P, r \in N^V \quad (C5)$$

$$\sum_{j \in R^P} A_{i,j,n,k,l}^L - \sum_{j \in R^P} A_{j,i,n,k,l}^L = A_{i,n,k}^R - A_{i,n,l}^R \quad \forall n \in N^V, (k, l) \in L^V, i \in R^P \quad (C6)$$

$$j A_{i,r,k}^R = l A_{i,r,k}^R \quad \forall (i, j) \in S^P, r \in N^V, (k, l) \in S^V \quad (C7)$$

$$A_{i,r,j}^R = E_{i,r,j}^R \quad \forall (i, r, j) \in E^R \quad (C8)$$

$$A_{i,j,r,k,l}^L = E_{i,j,r,k,l}^L \quad \forall (i, j, r, k, l) \in E^L \quad (C9)$$

Constraint C1 ensures that the CPU capacity of each physical router will not be exceeded, therefore assuring that the CPU requirement of each virtual router will be met. Constraint C2 applies the same restriction to the memory capacity of routers, and constraint C3, to link bandwidth. Constraint C4 ensures that all virtual routers will be mapped to a physical router. In turn, constraint C5 prevents multiple virtual routers that belong to a single virtual network from sharing the same physical router. As our objective function aims at minimizing bandwidth usage, the absence of this constraint would encourage a significant number of routers from a single virtual network to share the same physical router, which could lead to availability issues. Constraint C6 ensures that all virtual links will be mapped to a valid physical path. Thus, the physical path hosting a virtual link (a, b) is guaranteed to be a valid path between the physical router hosting virtual router a and the physical

router hosting virtual router b . Constraint C7 makes sure that all virtual routers with location requirements are mapped to physical routers at the required locations. Finally, constraints C8 and C9 ensure that all elements from previously embedded virtual networks remain hosted on the same physical elements. Router mappings are maintained by constraint C8, while link mappings are maintained by constraint C9.

V. EVALUATION OF THE IMPACT OF TOPOLOGIES ON VN EMBEDDING

In order to evaluate the impact of different network topologies in the process of virtual network embedding, the model formalized in the previous section was implemented and run in *CPLEX Optimization Studio*¹ version 12.3. All experiments were performed on a machine with four AMD Opteron 6276 processors and 64 GB of RAM, using the Operational System Ubuntu GNU/Linux Server 11.10 x86_64.

A. Workloads

To perform the experiments, we adopt a strategy in line with related work, such as the ones conducted by Yu *et al.* [1] and Houidi *et al.* [10]. Like them, we rely on time units and distribution models for the arrival and duration of requests.

We developed a virtual network request generator, which is run for a period of 500 time units for each experiment. Within each time unit, five requests are generated on average, according to a Poisson distribution. Each request has a limited duration, *i.e.*, after a number of time units, it is removed from the substrate. Requests have an average duration of five time units, following an exponential distribution.

Physical substrate topologies are created using the IGen² tool, as publicly available real substrate networks are not normalized in terms of network size. In order to generate networks with the topological features of the previously presented classes – *star*, *ladder* and *hub & spoke* – we use, respectively, the methods *Mentor*, *MultiTour* and *TwoTree*. In line with the topology characterization presented in Section III, *ladder* network nodes have an average degree of 3 and normalized maximum degree of 4. *Star* networks have a proportion of highly interconnected nodes (*hubs*) of less than 0.25, while in *hub & spoke* networks this proportion is greater or equal than 0.25. This ratio is defined as the number of nodes with connectivity degree greater than the average connectivity degree of the network, divided by the total number of network nodes. Besides these topological properties, physical networks have 50 routers, each with a total CPU capacity of 100% and 256 MB of memory. Routers are uniformly distributed among 16 locations, and the bandwidth of physical links is uniformly distributed between 1 and 10 Gbps.

The topology of each virtual network is generated using BRITE³ with the Barabasi-Albert (BA-2) [6] model. Each virtual network has between 2 and 5 routers. Virtual routers require between 10% and 50% of CPU and between 24 MB and 128 MB of memory. Both parameters follow a uniform distribution. Virtual link bandwidth is uniformly distributed

¹<http://www-01.ibm.com/software/integration/optimization/cplex-optimization-studio/>

²<http://igen.sourceforge.net/>

³<http://www.cs.bu.edu/brite/>

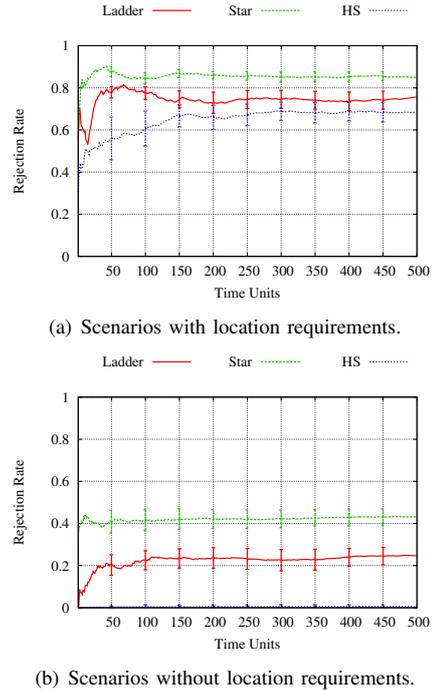


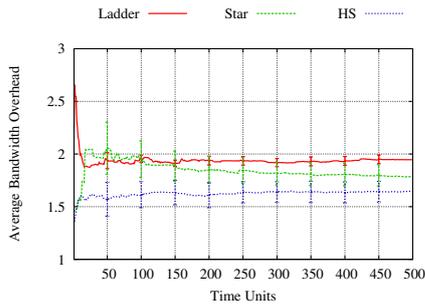
Fig. 2. Average percentage of rejected requests in all experiments.

between 1 and 5 Gbps. Two scenarios were evaluated on each physical topology. The distinctive feature of each scenario is the presence or absence of location requirements. In the first scenario, each virtual network has two routers (its end points) with location requirements, which are randomly selected among the 16 existing locations. In the second scenario, there are no such requirements. Each experiment was run 30 times, considering different instances for each type of network substrate.

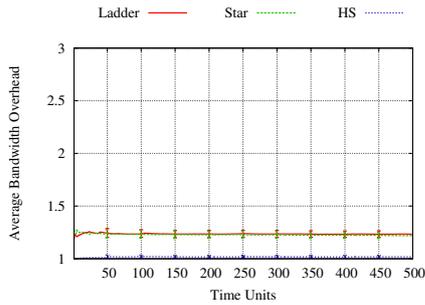
B. Results

First, we analyze the rejection rate of virtual networks requests in the previously described scenarios. Virtual network requests are only rejected if it is not possible to map all of its routers and links on the physical substrate. Figure 2 depicts the average rejection rate in each scenario. Each point on the graph represents the average rejection rate since the beginning of the experiment until the current time unit. It is clear that when location requirements are considered, rejection rates are substantially higher (ranging from 65.38% to 83.71%) in all three physical topologies, in comparison to scenarios with no such requirements (in which rejection rates range from 0% to 41.32%). This behavior is influenced by the reduction in the exploration space of feasible solutions caused by the presence of location constraints.

The graph depicted in Figure 2 also reveals that there is considerable difference in rejection rates when using different physical topologies. *Hub & spoke* networks lead to a lower rejection rate in comparison to other topologies in both evaluated scenarios (68.44% in the scenario with location requirements and 0.53% in the scenario without such requirements). In



(a) Scenarios with location requirements.

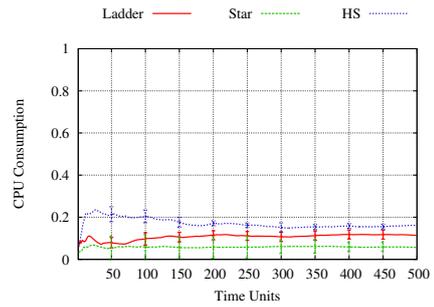


(b) Scenarios without location requirements.

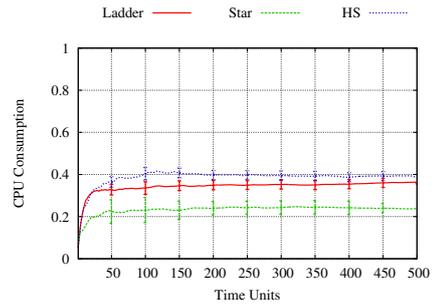
Fig. 3. Average bandwidth overhead needed to accommodate accepted requests.

contrast, *star* topology networks lead to the worst performance (rejection rate of 85.04% in the scenario with location requirements and 43.10% in the scenario without location requirements). *Ladder* topology networks present rejection rates of 75.63% and 24.66% for the scenarios with and without location requirements, respectively. *Hub & spoke* networks tend to cause the rejection of a lower number of requests because they have, on average, a greater number of highly interconnected nodes (hubs). The presence of multiple hubs lowers the probability that the depletion of the resources of one of these central nodes may cause a significant impact on the ability to embed future requests. In contrast, as *star* topology networks have a low number of central nodes, there is a high probability that these nodes may become a bottleneck in the process of virtual network embedding if their resources are depleted. In *ladder* networks, as there are no central nodes, the depletion of resources in some physical links may hinder the creation of virtual links that would use such physical links as “bridges” to interconnect certain points of the infrastructure.

Figure 3 illustrates the average overhead caused by virtual networks embedded in each experiment. This overhead is measured as the ratio between the effective bandwidth consumed by a virtual network hosted on the physical substrate and the bandwidth requested by such network. In general, the actual bandwidth consumption is greater than the total bandwidth required by virtual networks, due to the frequent need to map virtual links to paths composed of multiple physical links. The absence of overhead is only observed when each virtual link is mapped to a single physical link (ratio of 1.0). We emphasize that lower overhead rates directly favor



(a) Scenarios with location requirements.

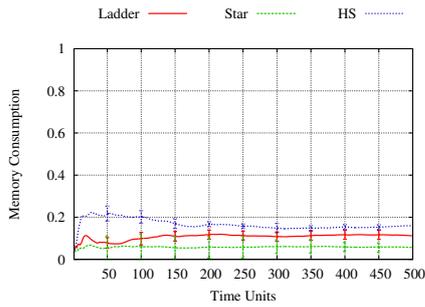


(b) Scenarios without location requirements.

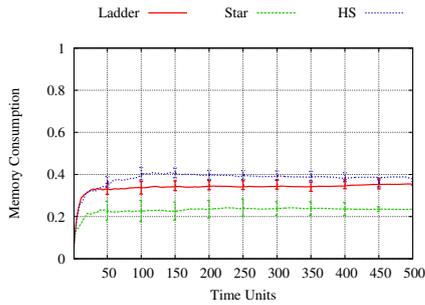
Fig. 4. Average CPU usage of physical routers.

the infrastructure provider, by sparing resources that may be used to embed future requests. Moreover, this lower resource consumption may lead to lower costs for virtual network requesters. *Ladder* topologies lead to higher average overheads in comparison to other topologies (94.59% in scenarios with locations requirements and 23.36% in scenarios without locations requirements), as the topological structure has, on average, longer distances (in terms of hops) between nodes, in addition to the absence of hubs. *Hub & spoke* networks achieve the lowest overhead rates (64.67% in the scenario with location requirements), as they have a higher number of hubs and interconnections between nodes. In the scenario without location requirements (Figure 3(b)), the average overhead rates observed in the *ladder* and *star* infrastructures are similar – 23.36% and 21.92%, respectively – whereas the overhead rate caused by the employment of the *hub & spoke* topology is only 1.89%. This demonstrates that, when location requirements are considered, virtual links tend to be mapped to longer paths in the substrate, due to a higher average distance between the locations where virtual routers are hosted. However, topologies that have a higher number of hubs tend to reduce the impact of these constraints.

Next, we evaluate the average consumption of physical resources – CPU and memory capacity of routers, as well as link bandwidth – in all experiments. Figure 4 shows the average CPU consumption of physical routers. Considering location requirements, we observe that the average CPU consumption when employing the *ladder* topology (11.49%) is approximately twice as high as the average CPU consumption in the experiment in which we use the *star* topology (5.36%). The *hub & spoke* topology led to an average CPU

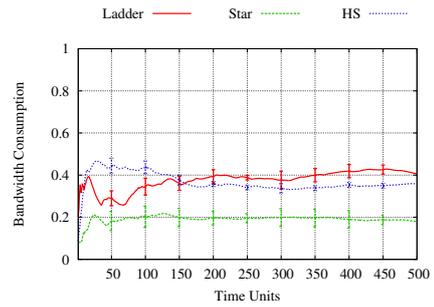


(a) Scenarios with location requirements.

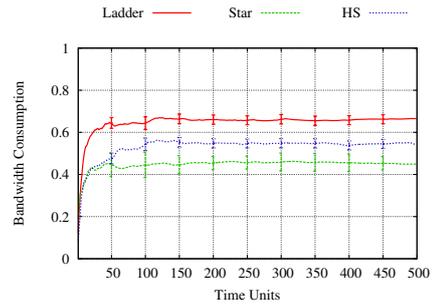


(b) Scenarios without location requirements.

Fig. 5. Average memory usage of physical routers.



(a) Scenarios with location requirements.



(b) Scenarios without location requirements.

Fig. 6. Average bandwidth usage of physical links.

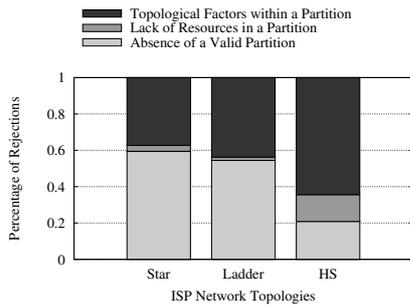
consumption of 16.82%. CPU consumption in experiments without location constraints (Figure 4(b)) is noticeably higher. The average CPU consumption in the *star* network is 23.80%, whereas in the *ladder* and *hub & spoke* networks, 35.32% and 38.60% of CPU resources are consumed, respectively. Increased consumption of CPU resources is influenced by the number of virtual networks embedded on the substrate. This explains the higher consumption in scenarios that do not consider location requirements, as in these cases rejection rates are lower. However, the relatively low CPU consumption, which does not exceed 40% in any experiment, reveals that the rejection of virtual network requests is not caused by the global exhaustion of CPU resources in the infrastructure.

In Figure 5 we present the average memory consumption of physical routers. The behavior of memory usage in physical routers is similar to that of CPU usage. In experiments that consider location requirements, the average memory usage is of 5.65% in the *star* topology, 11.21% in the *ladder* topology, and 15.93% in the *hub & spoke* topology. In contrast, experiments that do not consider such requirements lead to an average memory utilization of 23.49% in the *star* topology, 35.52% in the *ladder* topology, and 38.03% in the *hub & spoke* topology. Note that memory resources are not fully depleted in any of the experiments. Thus, we can state that this factor, similarly to CPU usage, is not the cause of the rejection rates observed in these scenarios.

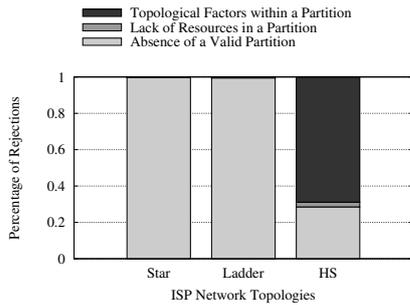
The average bandwidth consumption in physical links is shown in Figure 6. In experiments in which virtual networks have location requirements, average link utilization is of 18.01% in the *star* topology, 40.63% in the *ladder* topology, and 35.89% in the *hub & spoke* topology. In the experiments

without location requirements, the average consumption is 44.93% in the *star* topology, 66.50% in the *ladder* topology, and 54.08% in the *hub & spoke* topology. These results show that the overall bandwidth consumption in the physical network, in an analogous manner to CPU and memory usage, is not responsible for the rejection rates observed in the experiments. The saturation of specific points in the physical infrastructure makes it impossible to embed a higher number of virtual networks, even though a global view of the physical network reveals a considerable amount of available resources.

ISP network topologies may have different connectivity degrees and, due to the depletion of resources in specific parts of the substrate (*e.g.*, links connected to hubs or bridges), infrastructure partitioning occurs at different levels. In this context, a partition is defined as a strongly connected component (SCC) with residual bandwidth equal to or greater than the average link bandwidth requested by VNs. We observed that, in scenarios with location requirements, *star* topologies have, upon the embedding of a new VN, 13.60 partitions with an average of 3.63 routers per component, while *ladder* topologies have, on average, 12.30 partitions with 4.38 routers per component. In turn, *hub & spoke* topologies present lower levels of partitioning and a higher number of routers per component, *i.e.*, 7.22 partitions and 7.52 routers, respectively. In scenarios without location requirements, infrastructure partitioning levels are higher due to higher link bandwidth consumption. *Star* and *ladder* topologies have similar average partitioning levels; 19.20 and 19.67 partitions with 2.61 and 2.48 routers, respectively. *Hub & spoke* topologies have, on average, 12.65 partitions and 3.94 routers per component. Next, we analyze how this and other factors influence the



(a) Scenarios with location requirements.



(b) Scenarios without location requirements.

Fig. 7. Average percentage of rejection causes observed in all experiments.

rejection rates observed.

Figure 7 shows results regarding causes of rejection in the performed experiments. Three main causes of rejection have been observed: the absence of a valid partition, the lack of physical router resources within a partition, and other topological factors. The first cause is related to the unavailability of a proper partition on the infrastructure with size equal to or greater than the number of virtual routers requested. This means that it is not possible to map the VN request on the topology due to the lack of connectivity between physical routers. In other words, there is no SCC that has, for each pair (a,b) of routers, a path between “a” and “b” with bandwidth greater than or equal to the maximum bandwidth requested. In scenarios with location requirements, 59.45% of rejections on *star* topologies as well as 54.44% on *ladder* topologies are caused by this kind of connectivity problem. In scenarios without location requirements, 99.62% of rejections on *star* topologies and 99.47% of rejections on *ladder* topologies are associated with this cause. In *hub & spoke* topologies, rejections associated with this cause amount to 20.85% in scenarios with location requirements and 28.50% in scenarios without such requirements. These results point to a direct correlation between higher partitioning levels and higher rejection rates.

The second cause of rejection – the lack of physical router resources within a partition – occurs when there is an appropriate partition (*i.e.*, there is a SCC that contains enough physical routers to map all virtual routers in the VN request), but it is not possible to map the requested VN due to the depletion of physical router resources (CPU and memory) in this partition. In scenarios with location requirements, rejection rates caused

by insufficient router resources are 3.2%, 1.8% and 14.7% on *star*, *ladder* and *hub & spoke* topologies, respectively. In scenarios without such requirements, these rates are, respectively, 0.33%, 0.37% and 2.58%. *Star* and *ladder* topologies present similar percentages in both scenarios. In scenarios without location requirements, an insignificant number of VNs are rejected due to this cause, as the main cause of rejection is infrastructure partitioning. In *hub & spoke* topologies, when considering location requirements, the percentage of VN rejections associated with this cause is higher in contrast to other topologies. This behavior is related to lower rejection rates associated with the absence of valid partitions in this topology, which leads to greater resource usage in physical routers.

The third cause of rejection refers to VN requests that are denied despite the existence of an adequate partition and available resources on its routers. In this case, rejections are a result of topological factors within a partition that make it impossible to map an incoming VN request. This occurs either when location constraints can not be met or when VNs have a significantly different topology in relation to the topology available in the partition. In the latter situation, a greater amount of resources will be required to embed these VNs, which may not be available. When considering location requirements, *star* and *ladder* topologies have, respectively, 37.30% and 43.71% of rejection rates associated with topological properties. In scenarios without location requirements, these percentages are 0.04% and 0.15%, respectively. Rejections related to topological factors in *hub & spoke* networks amount to 64.39% in scenarios with location requirements, and 68.90% in scenarios with no such requirements. When analyzing rejections associated with this cause, *star* and *ladder* topologies present a similar behavior, as partitioning levels and overall rejection rates are similar in both topologies. Nevertheless, minimal differences exist, which can be explained by topological factors such as the absence of hub nodes in *ladder* networks. In *hub & spoke* networks, however, topological factors are the most significant cause of rejection rates. Although this type of topology presents higher connectivity, the rejection of a lower number of VNs leads to higher bandwidth usage in physical links, which leads to reduced connectivity within network partitions.

Last, in Figure 8 we present the average time needed to find the optimal mapping of each accepted request. We emphasize that, in this graph, the vertical axis is shown in logarithmic scale, as results differ significantly among results. In all scenarios with location requirements, the time needed to optimally embed virtual network requests remains under 1 second. The use of *star* topology leads to an average solution time of 0.055 seconds, the *ladder* topology to an average time of 0.20 seconds, and the *hub & spoke* topology, to an average time of 0.44 seconds. In the remaining scenarios, which do not consider location requirements, all averages remain under 3 seconds. The *star* topology leads to an average solution time of 0.13 seconds, the *ladder* topology to an average time of 0.92 seconds, and the *hub & spoke* topology, to an average time of 2.41 seconds.

The relatively high solution times observed in scenarios that employ the *hub & spoke* topology are explained by the

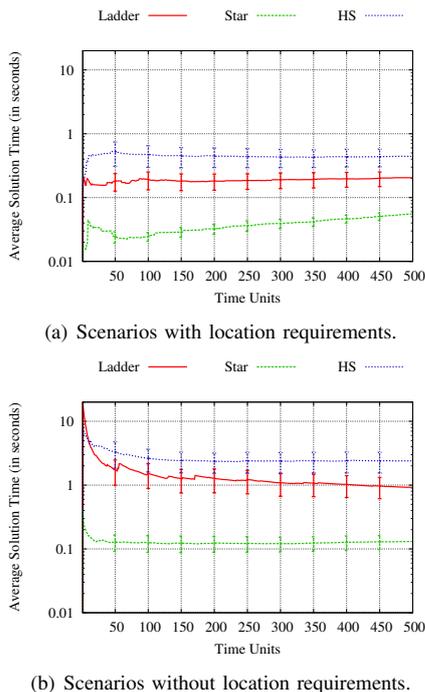


Fig. 8. Average time needed to find the optimal solution.

presence of a higher number of links in this topology. This characteristic leads to a larger set of possible mappings for each virtual network request, which tends to increase the time needed to find the optimal mapping. Similarly, the removal of location requirements also leads to a larger space of feasible solutions, which explains the higher average time observed in such scenarios. Furthermore, a number of peaks are observed near the beginning of the experiments, reaching a maximum of 24.81 seconds in the scenario that employs the *ladder* topology and 9.99 seconds in the scenario in which the *hub & spoke* topology is employed. This behavior can be explained by the larger amount of unused resources in the beginning of these experiments (when the availability of resources on physical networks is substantially high), which also increases the number of possible mappings for virtual networks on the substrates.

The results presented in this section show that the employment of different types of physical network topologies in network virtualization environments causes a significant impact on rejection rates and physical resource usage. This impact is even more pronounced when location requirements of virtual networks are considered. Such experiments reveal that the rejection of virtual network requests is not caused by the overall depletion of resources in the infrastructure. Instead, it is caused by factors related to certain topological features.

The main factor that influences the rejection of virtual networks is resource depletion in specific regions of the substrate, which leads to higher partitioning levels in the infrastructure. For example, in *star* and *hub & spoke* topologies, the exhaustion of resources in physical hubs, as well as links connected to them, tends to be the main cause that

makes it impossible to map new virtual network requests even when there are partitions with sufficient size and connectivity. In *ladder* topologies, in which there are no hubs, the main cause for the increase in rejected requests is the depletion of resources in specific connections between nodes. Links used as “bridges” to interconnect different points of the infrastructure can become bottlenecks and, if the bandwidth of one of these links is sufficiently depleted, the infrastructure is partitioned into two groups of routers with no connectivity between them. Moreover, in all studied topologies, partitioning may lead to the existence of segments that, despite having adequate size and sufficient resources, are unable to accommodate certain VNs due to topological incompatibilities.

In summary, mapping virtual network in *star* topologies leads to low solution times but also high rejection rates, and consequently, to low physical resource usage. In *ladder* topologies, rejection rates and solution times have intermediate values in relation to other topology classes, but embedded virtual networks tend to consume a greater amount of bandwidth. Finally, *hub & spoke* topologies lead to low rejection rates and average bandwidth overhead, but the time needed to find the optimal solution is comparatively higher.

VI. CONCLUSION

Network virtualization is a topic that has received considerable attention both from the scientific community and the Industry, resulting in a series of studies involving, predominantly, issues related to virtual network embedding. However, as far as we are aware, there have been no previous attempts to evaluate the result of mapping strategies considering different network topologies in a precise manner. Previous work, in general, use organic or generic topologies, which do not faithfully represent the topological properties present in real InP networks.

After formalizing an optimal *online* virtual network embedding model and applying it on substrates with different topological features that are typically present in InP networks, we characterized the impact of different types of topologies regarding rejection rates and physical resource usage. The obtained results evidence the significant impact caused by embedding virtual networks on physical substrates with different topological features. The ability to embed virtual networks is hindered by resource depletion in some specific points of the physical infrastructure, although a global view of the network reveals that there are still resources available in the remainder of the substrate. This impact is even more expressive when the embedding model considers location requirements of virtual networks.

As future work, we intend to investigate strategies for reducing rejection rates observed in typical InP networks. More specifically, we intend to investigate ways to expand or scale specific points of physical substrates in order to reduce the rejection of virtual networks, considering the necessary costs to make such changes in the infrastructure. The main idea is to identify problematic regions of the substrate based on the size and total number of SCCs and, through specific adjustments in the infrastructure, to increase the acceptance of future virtual network requests in a consistent manner.

REFERENCES

- [1] M. Yu, Y. Yi, J. Rexford, and M. Chiang, "Rethinking virtual network embedding: substrate support for path splitting and migration," *SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 38, no. 2, pp. 17 – 29, Mar. 2008. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/1355734.1355737>
- [2] M. Chowdhury, M. Rahman, and R. Boutaba, "Vineyard: Virtual network embedding algorithms with coordinated node and link mapping," *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, vol. 20, no. 1, pp. 206–219, 2012.
- [3] G. Alkmim, D. Batista, and N. da Fonseca, "Mapping virtual networks onto substrate networks," *Journal of Internet Services and Applications*, vol. 4, no. 1, p. 3, 2013.
- [4] X. Cheng, S. Su, Z. Zhang, H. Wang, F. Yang, Y. Luo, and J. Wang, "Virtual network embedding through topology-aware node ranking," *SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 41, no. 2, pp. 38 – 47, Apr. 2011. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/1971162.1971168>
- [5] H. Haddadi, M. Rio, G. Iannaccone, A. Moore, and R. Mortier, "Network topologies: inference, modeling, and generation," *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, vol. 10, no. 2, pp. 48 – 69, quarter 2008.
- [6] R. Albert and A.-L. Barabási, "Topology of evolving networks: Local events and universality," *Physical Review Letters*, vol. 85, pp. 5234 – 5237, Dec 2000.
- [7] S. Davy, J. Serrat, A. Astorga, B. Jennings, and J. Rubio-Loyola, "Policy-assisted planning and deployment of virtual networks," in *Proceedings of the 7th International Conference on Network and Service Management (CNSM)*, Paris, France, oct. 2011, pp. 1–8.
- [8] N. Kamiyama, R. Kawahara, T. Mori, S. Harada, and H. Hasegawa, "Impact of topology on parallel video streaming," in *Network Operations and Management Symposium (NOMS), 2010 IEEE*, april 2010, pp. 607 – 614.
- [9] I. Fajjari, N. Aitsaadi, G. Pujolle, and H. Zimmermann, "Vne-ac: Virtual network embedding algorithm based on ant colony metaheuristic," in *Communications (ICC), 2011 IEEE International Conference on*, 2011, pp. 1–6.
- [10] I. Houidi, W. Louati, W. B. Ameer, and D. Zeghlache, "Virtual network provisioning across multiple substrate networks," *Computer Networks*, vol. 55, no. 4, pp. 1011 – 1023, 2011. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128610003786>

APÊNDICE C – ARTIGO PUBLICADO - SBRC 2014

- Título: Reconnectando Partições de Infraestruturas Físicas: Uma Estratégia de Expansão para o Mapeamento Eficiente de Redes Virtuais
- Conferência: 32º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC 2014)
- URL: <http://www.sbrc2014.ufsc.br/>
- Data: 5-9 de Maio de 2014
- Local: Florianópolis, SC, Brasil

Reconectando Partições de Infraestruturas Físicas: Uma Estratégia de Expansão para o Mapeamento Eficiente de Redes Virtuais

Marcelo Caggiani Luizelli¹, Leonardo Richter Bays¹, Luciana Salete Buriol¹,
Marinho Pilla Barcellos¹, Luciano Paschoal Gaspar¹

¹Instituto de Informática – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)
Caixa Postal 15.064 – 91.501-970 – Porto Alegre – RS – Brazil
{mcluzelli,lrbays,buriol,marinho,paschoal}@inf.ufrgs.br

Abstract. *One of the research challenges approached in recent literature is the efficient mapping of virtual networks on top of physical infrastructures. Although there have been efforts to solve it, we observe that a number of virtual network requests are rejected due to the exhaustion of resources only in key points of the infrastructure. In this paper, we propose an expansion strategy based on the reconnection of strongly connected components (partitions) of the infrastructure in order to suggest adjustments that lead to higher virtual network acceptance and, in consequence, to improved physical resource utilization. The obtained results evidence that an expansion of 10% to 20% of the infrastructure resources using the proposed strategy leads to a sustained increase of up to 30% in the number of accepted virtual networks and of up to 45% in resource usage compared to the original network.*

Resumo. *Um dos desafios de pesquisa abordados recentemente na literatura é o mapeamento eficiente de redes virtuais em infraestruturas físicas. Embora tenha-se empreendido esforços para resolvê-lo, observa-se que parte das requisições de redes virtuais é rejeitada devido ao esgotamento de recursos apenas em pontos-chave da infraestrutura. Neste artigo, propõe-se uma estratégia de expansão baseada na reconexão de componentes fortemente conexos (partições) da infraestrutura para sugerir ajustes que levem a uma maior aceitação de redes virtuais e, em consequência, a um melhor aproveitamento da infraestrutura física. Os resultados obtidos evidenciam que a expansão de 10% a 20% dos recursos da infraestrutura utilizando a estratégia proposta contribui para um aumento sustentado de até 30% no número de redes virtuais aceitas e de até 45% no aproveitamento dos recursos em comparação com a rede original.*

1. Introdução

A virtualização de redes é um mecanismo que permite a coexistência de múltiplas redes virtuais (VNs – *Virtual Networks*) compartilhando recursos de um mesmo substrato físico. Essas VNs podem apresentar arquiteturas, protocolos e topologias independentes das do substrato de rede na qual serão instanciadas. Provedores de Infraestruturas (InPs – *Infrastructure Providers*), lançando mão das facilidades de alocação e desalocação de redes virtuais e do isolamento de recursos que as tecnologias de virtualização provêm, passam, assim, a poder oferecer suporte à criação, sob demanda, de redes personalizadas, atendendo a diferentes requisitos impostos pelos contratantes.

Um dos maiores desafios de pesquisa em virtualização de redes é a alocação eficiente de recursos de infraestruturas físicas para requisições de redes virtuais (VNE – *Virtual Network Embedding*). Essa alocação de recursos físicos deve ser ciente das

capacidades dos equipamentos de rede, bem como das demandas requeridas pelas redes virtuais (por exemplo, largura de banda dos enlaces virtuais e capacidade de processamento dos roteadores virtuais). Apesar de haver um número considerável de trabalhos recentes que exploram o problema *online* de mapeamento de redes virtuais [Yu et al. 2008, Chowdhury et al. 2009, Alkmim et al. 2011, Cheng et al. 2012, Bays et al. 2012, Alkmim et al. 2013], constata-se que as taxas de rejeição para o conjunto de requisições entrantes são, normalmente, altas. Em uma avaliação previamente realizada [Luizelli et al. 2013], verificou-se que um subconjunto dessas rejeições é causado por insuficiências temporárias de recursos, ou seja, períodos em que os recursos disponíveis na infraestrutura como um todo não são capazes de suprir a demanda. Observou-se, contudo, que grande parte das rejeições ocorre em situações em que há grande disponibilidade de recursos, mas alguns poucos já saturados acabam inviabilizando, em função de características de conectividade do substrato, o atendimento de novas requisições.

Como mencionado, embora tenha-se empreendido esforços para resolver o problema do mapeamento de redes virtuais, desconhecem-se trabalhos que investiguem como a rede física de um provedor de infraestrutura pode ser expandida para acomodar uma maior quantidade de redes virtuais. Ao mesmo tempo, abordagens clássicas para o planejamento da expansão de infraestruturas físicas [Mukherjee et al. 1996, Ramaswami and Sivarajan 1996, Krishnaswamy and Sivarajan 2001] não são adequadas para ambientes de virtualização de redes. No caso dessas abordagens tradicionais (e consolidadas), conhece-se *a priori* quais pares de dispositivos requerem uma maior quantidade de recursos, e a expansão é realizada com base em uma matriz de demanda (que indica onde se encontram os gargalos da rede). No entanto, a matriz de demanda observada como resultado da criação de *slices* em redes de InPs¹ tende a apresentar uma distribuição comparativamente mais homogênea de recursos entre pares de dispositivos físicos. Tal advém do fato de que elementos de redes virtuais, em geral, podem ser hospedados em (praticamente) qualquer dispositivo físico com recursos suficientes disponíveis. Visto que a localidade de dispositivos físicos possui pouca influência no processo de mapeamento de redes virtuais, não é possível identificar gargalos de forma tão clara. Essas características tornam um desafio a identificação de regiões do substrato que precisam ser replanejadas para aumentar a probabilidade de acomodar com sucesso novas requisições de redes virtuais.

Neste artigo, propõe-se uma estratégia embasada na reconexão de componentes fortemente conexos (partições) para sugerir ajustes na infraestrutura que levem a um aumento nas taxas de aceitação. Tal estratégia tem como objetivo promover a reconexão de partições recorrentes, favorecendo a acomodação de um maior número de redes virtuais a longo prazo. Para provar o conceito e a viabilidade técnica da estratégia proposta, conduziu-se um conjunto extensivo de experimentos a fim de observar aspectos como ganhos em taxa de aceitação e no aproveitamento dos recursos físicos. As principais contribuições deste artigo se desdobram em duas: (i) definição pioneira do problema de expansão de infraestruturas físicas no contexto da virtualização de redes; e (ii) avaliação detalhada da estratégia proposta, demonstrando como o fortalecimento de partes-chave de uma infraestrutura pode levar a sua ocupação de forma muito mais satisfatória.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta uma discussão dos trabalhos relacionados ao problema de expansão de redes. Na Seção 3 é formalizado o problema de expansão de infraestruturas de InPs e apresentada uma solução algorítmica para o referido problema. Na Seção 4 são apresentados e avaliados os resultados obtidos. Por fim, a Seção 5 conclui o artigo com considerações finais e

¹Neste texto as expressões *substrato físico*, *rede física*, *infraestrutura física* e *rede de InP* são usadas como sinônimos.

perspectivas de trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

Nesta seção apresenta-se alguns dos principais trabalhos relacionados ao problema de planejamento e expansão de redes de computadores. Faz-se um breve resumo dos principais trabalhos, destacando os contextos em que foram aplicados e as metodologias adotadas. Inicialmente, são apresentados trabalhos clássicos de planejamento e expansão de redes e, posteriormente, trabalhos mais recentes.

Mukherjee et al. [Mukherjee et al. 1996] propõem um modelo de expansão para redes ópticas cujos objetivos são minimizar o atraso médio entre os nós da infraestrutura e maximizar a capacidade dos enlaces, visando a favorecer o atendimento de demandas futuras. A solução proposta é baseada na metaheurística *Simulated Annealing* e no algoritmo de desvio de fluxos. As expansões são realizadas tendo como base uma matriz de tráfego estática, a qual representa a média de tráfego entre os pares origem-destino da infraestrutura.

Ramaswami et al. [Ramaswami and Sivarajan 1996] apresentam uma formulação para o problema de expansão considerando a minimização global do congestionamento da infraestrutura. As expansões são realizadas considerando limites máximos de atraso permitidos e demandas existentes entre pares origem-destino. Os autores apresentam inicialmente um modelo de otimização e, posteriormente, por questões de escalabilidade, uma abordagem heurística que realiza a expansão da capacidade de caminhos físicos entre pares de roteadores com alta demanda, priorizando caminhos mais curtos.

Krishnaswamy et al. [Krishnaswamy and Sivarajan 2001] também abordam o problema de expansão de redes ópticas com o objetivo de minimizar o congestionamento entre nós da infraestrutura. No entanto, consideram que não é permitida a adição de repetidores na topologia física e, por isso, a inserção de novas fibras é restrita a um comprimento máximo. Os autores apresentam resultados numéricos para o modelo proposto aplicando-o em redes pequenas. Para instâncias que representam redes maiores, os autores realizam a relaxação de variáveis inteiras do modelo e, posteriormente, aplicam uma técnica de integralização nas mesmas.

Passa-se, agora, a uma breve revisão dos trabalhos recentes da área. Curtis et al. [Curtis and Lopez-Ortiz 2009] apresentam um modelo que possui como objetivo otimizar a utilização da capacidade dos elementos da infraestrutura considerando aspectos de balanceamento de carga e resiliência. O modelo visa a garantir que o planejamento da infraestrutura é capaz de satisfazer um conjunto de requisitos referente à qualidade de serviço. De forma similar aos trabalhos clássicos apresentados anteriormente, os autores empregam uma estimativa baseada em matrizes de tráfego para realizar o planejamento da capacidade dos enlaces da infraestrutura.

Johnston et al. [Johnston et al. 2011] apresentam um esquema no qual uma rede de *backup* é planejada para prover proteção contra múltiplas falhas em enlaces. Os autores propõem um modelo de expansão que determina quais elementos precisam ser adicionados à infraestrutura física, além de definir a capacidade adequada de cada um. Por razões de escalabilidade, os autores propõem, ainda, uma metaheurística baseada em *Simulated Annealing* para viabilizar a resolução do problema considerando redes de grande porte.

Gangxiang et al. [Shen and Tucker 2009], por sua vez, propõem um modelo de planejamento de infraestruturas que busca a redução do consumo de energia de redes de *backbone*. O modelo considera o consumo energético dos componentes da rede para definir em quais regiões da infraestrutura novos recursos devem ser adicionados. Assim como os demais trabalhos da área, os autores utilizam matrizes de demanda para realizar

a expansão dos recursos. Os autores também desenvolvem heurísticas, visando a garantir a escalabilidade da solução proposta.

O ponto comum dos trabalhos descritos até então reside no emprego de matrizes de demanda para planejar a expansão de redes físicas. No entanto, no contexto de virtualização de redes, um estudo preliminar realizado em antecipação a esse trabalho revelou que as matrizes de demanda observadas em redes de InPs tendem a apresentar uma utilização comparativamente mais homogênea de recursos entre pares de dispositivos físicos. Como consequência de tal homogeneidade, as características topológicas da infraestrutura, desconsideradas nos trabalhos anteriores, passam a apresentar uma importância consideravelmente superior no processo de expansão do que as matrizes de demanda observadas.

Além dos trabalhos mencionados anteriormente, cujo foco é a expansão da capacidade de enlaces em redes de *backbone*, há também soluções recentes que focam no planejamento de redes de *datacenters*. Dentre esses trabalhos, destacam-se as publicações de Curtis et al. [Curtis et al. 2012] e Gao et al. [Gao et al. 2012], que introduzem modelos de otimização e heurísticas aplicados à expansão de tais redes. De forma similar aos trabalhos que focam na expansão de redes de *backbone*, consideram-se a inclusão de equipamentos e/ou o aumento da capacidade de equipamentos já existentes de forma a satisfazer a demanda requerida nas infraestruturas.

Os trabalhos focados no planejamento/expansão de redes de *datacenters* objetivam, em geral, maximizar a capacidade de transmissão de dados simultânea sem interferência entre pares de dispositivos da infraestrutura (largura de banda biseccional). Os algoritmos desenvolvidos para a expansão de tais redes são, em geral, projetados para topologias específicas (como, por exemplo, topologias baseadas em árvores), o que dificulta (ou mesmo, inviabiliza) a adaptação destes para redes de *backbone*. Ainda que a adaptação fosse possível, a aplicação de tais soluções no contexto de redes de *backbone* traria ineficiência (desperdício) na alocação de recursos, haja visto que existem diferenças entre os objetivos dos modelos de expansão. Diante dessa nova realidade, torna-se um desafio a identificação de regiões do substrato que precisam ser replanejadas para aumentar a probabilidade de acomodar com sucesso novas requisições de redes virtuais, sendo esse alvo de estudo deste trabalho.

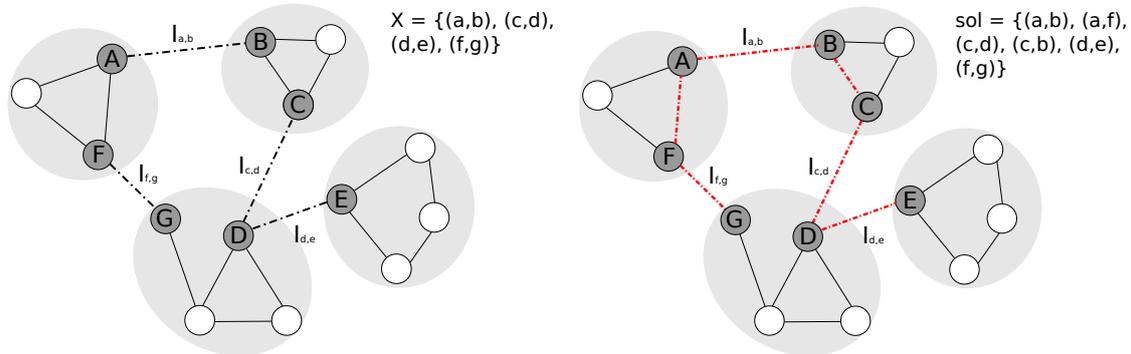
3. Expansão de Redes de InP para o Mapeamento de Redes Virtuais

Nesta seção, descreve-se o problema de expansão de redes de InP e formaliza-se um modelo baseado em Programação Linear Inteira. Após, apresenta-se uma solução algorítmica para o modelo.

3.1. Visão Geral do Problema

Uma das principais causas de rejeições de redes virtuais no contexto do problema de mapeamento de redes virtuais é a ausência de uma partição adequada na infraestrutura física [Luizelli et al. 2013]. As partições podem ser entendidas como conjuntos isolados entre si de roteadores. A sua ocorrência está diretamente relacionada ao esgotamento total (ou quase total) dos recursos disponíveis em dispositivos específicos (*e.g.*, pontes ou *hubs*) da infraestrutura no processo de mapeamento. Com a variação na utilização (alocação/reserva) dos recursos físicos, há também variações no conjunto de partições e, consequentemente, nos dispositivos que pertencem a cada partição. Dessa forma, faz-se necessário identificar os elementos que mais impactam nos particionamentos, isto é, elementos que em situação de consumo total passam a particionar a infraestrutura. A Figura 1(a) ilustra o estado de uma infraestrutura física com, momentaneamente, quatro partições, representadas pelos círculos em tom claro. Na Figura, enlaces que foram

identificados como elementos particionadores ao longo de consecutivos mapeamentos de redes virtuais – (a, b) , (c, d) , (d, e) e (f, g) – são representados por linhas hachuradas.



(a) Identificação dos enlaces de corte, armazenados em X . (b) Solução baseada no conceito de reconexão dos enlaces de corte. Em destaque, os elementos a serem expandidos.

Figura 1. Aplicação da estratégia proposta na infraestrutura física.

Partindo-se da constatação de que o particionamento é uma das grandes causas de rejeições de redes virtuais e observando que a infraestrutura física, por uma perspectiva global, apresenta uma grande quantidade de recursos disponíveis, propomos, como estratégia de expansão de redes de InPs, a reconexão de partições recorrentes. Dessa forma, os elementos antes considerados para a expansão de infraestruturas (matrizes de demanda) deixam de ser considerados e os fatores topológicos passam a ser empregados no processo de decisão. O processo de expansão de redes é sujeito a algumas restrições dos provedores como, por exemplo, o número de elementos a serem expandidos e o capital disponível. Nesse contexto, busca-se investigar quais elementos físicos de redes de InPs (priorizados de acordo com características topológicas relevantes como, por exemplo, enlaces de corte) precisam ser replanejados objetivando a reconexão das partições mais recorrentes. A Figura 1(b) ilustra a solução baseada na reconexão de partições, revisena qual é possível perceber o fortalecimento estrutural (*i.e.*, onde os investimentos de expansão serão feitos) do caminho composto por múltiplos enlaces – (g, f) , (f, a) , (a, b) , (b, c) , (c, d) e (d, e) – e roteadores – (a, b, c, d, e, f, g) – interconectando as principais regiões da infraestrutura. Espera-se que a estratégia proposta seja utilizada com uma certa periodicidade (*e.g.*, a cada seis meses ou a cada ano), dependendo da política de investimentos dos InPs, e que a cada vez possam ser feitas expansões em porções diferentes da rede física, fortalecendo-a de forma orgânica.

3.2. Definições e Modelagem

A seguir, são detalhadas as entradas, as variáveis e as restrições desse modelo. Letras sobrescritas são usadas para representar se um conjunto ou variável refere-se a recursos virtuais (V) ou físicos (P), ou se está associado a roteadores (R) ou enlaces (L).

Substrato e redes virtuais. A topologia da rede física, bem como a de cada rede virtual requisitada, é representada por um grafo direcionado $N = (R, L)$. Os vértices R representam roteadores, enquanto que cada aresta L representa um enlace unidirecional. Enlaces bidirecionais são representados como um par de arestas em direções opostas (por exemplo, (a, b) e (b, a)). Dessa forma, o modelo permite a representação de quaisquer tipos de topologias físicas e virtuais.

Em ambientes reais, roteadores físicos tem capacidade limitada de recursos, além de um limite físico para a expansão de suas capacidades. No modelo, as capacidades de

CPU e memória são representadas, respectivamente, por C_i^P e M_i^P , enquanto que o limite máximo de expansão, por EC_i^P e EM_i^P . Da mesma forma, enlaces físicos possuem uma capacidade, representada por $B_{i,j}^P$, e um limite físico de expansão representado por $EB_{i,j}^P$.

Para considerar o consumo de recursos físicos da infraestrutura, faz-se necessário considerar as redes virtuais previamente alocadas no substrato. Os roteadores virtuais previamente alocados são representados pelo conjunto $A_{i,r,j}^R$, o qual indica se o roteador virtual j da rede virtual r está hospedado no roteador físico i . Já os enlaces virtuais previamente alocados são representados pelo conjunto $A_{i,j,r,k,l}^L$, o qual indica se o enlace virtual (k, l) da rede virtual r está hospedado no enlace físico (i, j) . Os requisitos de CPU e memória de cada roteador i da rede virtual r são representados por $C_{r,i}^V$ e $M_{r,i}^V$, enquanto que $B_{r,k,l}^V$ representa os requisitos de largura de banda para cada enlace virtual.

Particionamento do Substrato. Infraestruturas físicas podem ter diferentes graus de conectividade e topologias. Como consequência do esgotamento dos recursos físicos em regiões específicas do substrato (*e.g.*, pontes ou enlaces conectados a *hubs*), o particionamento da infraestrutura ocorre em diferentes níveis. Nesse contexto, uma partição é definida como um Componente Fortemente Conexo (CFC), cujos enlaces possuem largura de banda livre igual ou superior à média requisitada pelas redes virtuais. Os enlaces de corte identificados na infraestrutura são representados pelo conjunto X e, para cada $(i, j) \in X$, existe um valor correspondente no conjunto I , o qual representa a importância de cada enlace de corte no contexto do mapeamento de redes virtuais. A forma de valorar esses enlaces será explicada na Subseção 3.3.

Custos da Expansão. A expansão das capacidades dos dispositivos incorre em custos para os provedores de redes (InPs). Além disso, os custos monetários para aumentar as capacidades (*e.g.*, memória ou largura de banda) dos dispositivos físicos – roteadores e enlaces – são heterogêneos. Tais custos são modelados como $costCpu_i^P$ e $costMem_i^P$, relacionados à expansão de CPU e memória do roteador i , e $costBw_{i,j}^P$ relacionado à expansão da largura de banda do enlace físico (i, j) . Neste artigo, trabalha-se com a ideia de que a unidade mínima acrescida é modelada em megabits por segundo para enlaces, megabytes para memória e módulos de processamento para CPU. Dessa forma, é possível generalizar o modelo de expansão. A Equação 1 apresenta uma estimativa dos custos totais para expandir a infraestrutura. As variáveis xb_e , xm_i e xc_i representam, respectivamente, a quantidade acrescida de recursos de largura de banda, memória e CPU nos dispositivos da infraestrutura.

$$\begin{aligned} CustoExp = & \sum_{e \in L^P} xb_e \cdot costBw^P e \\ & + \sum_{i \in R^P} (xc_i \cdot costCPU^P i + xm_i \cdot costMem^P i) \end{aligned} \quad (1)$$

Variáveis. As variáveis do modelo representam a solução ótima do problema de expansão. As variáveis z_e indicam quais são os enlaces de corte (armazenados em X) selecionados para compor um novo *core* para a infraestrutura. Além disso, as variáveis x_e indicam se o enlace e faz parte do caminho construído entre os enlaces de corte selecionados por z_e . As variáveis auxiliares q_u indicam se o roteador u do enlace de corte e pertence ao novo *core*. Todas as variáveis pertencem ao domínio binário.

Restrições. Além dos custos de expansão, trabalha-se com uma quantidade limitada de recursos. Por esse motivo, o modelo possui um conjunto de restrições, descrito a seguir.

As Equações 2, 3 e 4 garantem que a capacidade expandida nos enlaces (largura

de banda) e nos roteadores físicos (CPU e memória) não excederá o limite máximo de expansão dos recursos da infraestrutura. Ressalta-se que as Equações 3 e 4 são válidas para ambos os índices (i e j) da variável x . Porém, por questões de espaço, apenas as equações relativas ao índice i são mostradas.

$$x_e \cdot (B_{i,j}^P + \frac{CapitalDisp \cdot Cobertura}{costBw_{i,j}^P}) \leq EB_{i,j}^P \quad \forall e \in L^P \quad (2)$$

$$x_{i,j} \cdot (C_i^P + \frac{CapitalDisp \cdot Cobertura}{costCpu_i^P}) \leq EC_i^P \quad \forall (i,j) \in L^P \quad (3)$$

$$x_{i,j} \cdot (M_i^P + \frac{CapitalDisp \cdot Cobertura}{costMem_i^P}) \leq EM_i^P \quad \forall (i,j) \in L^P \quad (4)$$

A Equação 5 garante que o montante a ser investido na infraestrutura física pelo InP não exceda o montante de capital de que o mesmo dispõe.

$$CustoExp \leq CapitalDisp \quad (5)$$

As Equações 6 e 7 definem um subconjunto de dispositivos físicos para compor um novo *core*, que atua como um reforço estrutural para a rede. O novo *core* é definido a partir de um subconjunto de roteadores físicos (R^C), o qual é definido por todos os roteadores que tem um ou mais enlaces em X . Constrói-se um caminho entre os enlaces de corte mais relevantes selecionados pela função objetivo (Equação 9). O símbolo $\delta^+(u)$ representa os enlaces de saída do roteador u , enquanto que $\delta^-(u)$ representa os enlaces de entrada do roteador u .

$$\sum_{a \in \delta^+(u)} x_a^k - \sum_{a \in \delta^-(u)} x_a^k = \begin{cases} 1 \cdot q_u & \text{se } u = s \\ -1 \cdot q_u & \text{se } u = k \\ 0 & u \in R^P / \{s, k\} \end{cases} \quad \forall u \in R^P, \forall k \in R^C \quad (6)$$

$$q_u \geq \frac{\sum_{a \in \delta^+(u)} z_a}{|\delta^+(u)|} \quad \forall u \in R^P \quad (7)$$

Na prática, um InP dificilmente desejará expandir a capacidade de todos os dispositivos da rede física. Portanto, a Equação 8 garante que somente um subconjunto dos dispositivos físicos da infraestrutura será afetado pelo procedimento de expansão. Em outras palavras, essa equação define os limites de cobertura para a expansão dos enlaces. O lado esquerdo da equação define o percentual de enlaces afetados pela expansão.

$$\frac{\sum_{\forall e \in L^P} x_e}{|L^P|} \leq Cobertura \quad (8)$$

Objetivo. O objetivo do modelo, exibido na Equação 9, é maximizar a reconexão entre os enlaces de corte considerados mais importantes. Como consequência, a taxa de aceitação deve ser maximizada e a taxa de utilização dos recursos ociosos deve ser aprimorada.

$$Maximize \sum_{e \in X} I_e \cdot z_e \quad (9)$$

3.3. Estratégia de Expansão Proposta

Nesta subsecção é apresentada a estratégia proposta para o problema de expansão de redes de InPs. É detalhado cada procedimento específico utilizado para construir uma solução factível, e apresentada uma visão geral do procedimento algorítmico. A estratégia proposta é composta por duas etapas. A primeira etapa consiste em identificar quais elementos serão replanejados, enquanto que a segunda define uma estratégia para a distribuição de recursos entre os dispositivos já selecionados. Ressalta-se que uma estratégia heurística foi adotada devido à similaridade do problema sendo tratado com o problema da árvore de Steiner mínima [Goemans and Myung 1993], o qual é conhecidamente NP-Difícil.

O Algoritmo 1 apresenta uma versão simplificada da estratégia proposta de reconexão de partições recorrentes em pseudocódigo, e seus detalhes são explicados a seguir. Como descrito anteriormente, uma partição é definida em termos da utilização dos recursos físicos. Assim, em um determinado intervalo de tempo (o que pode ser, por exemplo, um dia ou uma semana), aplica-se um procedimento para identificar o conjunto de partições da infraestrutura, bem como os enlaces de corte (isto é, enlaces que causam particionamentos devido ao esgotamento dos seus recursos). Nas linhas 5 e 6, calcula-se os particionamentos e os enlaces de corte observados em cada um desses intervalos. Existem algoritmos polinomiais para encontrar Componentes Fortemente Conexas (CFC) em grafos (e, por conseguinte, os enlaces de corte) como o algoritmo de Tarjan [Sleator and Tarjan 1983], o qual pode ser computado com complexidade linear de $O(|R| + |L|)$.

Um histórico dos enlaces de corte (computados anteriormente) é armazenado no conjunto X como uma informação para guiar o algoritmo na seleção dos principais dispositivos físicos. Como os enlaces de corte variam ao longo do tempo (o que ocorre devido à variação da utilização dos recursos físicos), mantém-se um conjunto I que contém, para cada enlace (i, j) pertencente a X , informações sobre a relevância de tal enlace. O valor armazenado para cada enlace de corte é uma combinação da frequência e da cobertura, os quais vão sendo acumulados a cada intervalo em que os particionamentos e os enlaces de corte são determinados (linhas 7-8). Para a frequência, realiza-se a contagem de quantas vezes o enlace (i, j) foi a causa de um particionamento da infraestrutura. O valor é então normalizado em relação ao montante total. A cobertura, por sua vez, mede a percentagem de roteadores que ficaram desconectados da infraestrutura a partir de tal particionamento.

No momento em que é realizada a expansão da infraestrutura física (o que pode acontecer, por exemplo, semestralmente ou anualmente), analisa-se o histórico de enlaces de corte armazenados até o momento em X e a importância I de cada um. Quanto maiores os valores para $I_{i,j}$, maiores serão as chances de que o enlace em questão esteja frequentemente causando o particionamento de um grande conjunto de roteadores físicos na infraestrutura. O valor de $I_{i,j}$ é calculado pela multiplicação dos valores acumulados para a frequência e a cobertura. O procedimento é realizado na linha 11 do Algoritmo 1. A estratégia proposta leva em consideração a importância dos elementos topológicos da infraestrutura física, ao contrário das estratégias aplicadas em trabalhos clássicos, as quais são fundamentadas unicamente na utilização de matrizes de demanda para selecionar os dispositivos a serem expandidos. Primeiramente, ordena-se os enlaces físicos (i, j) armazenados em X em relação ao valor correspondente em $I_{i,j}$ (linha 14). Então, um subgrafo $N^c = (R^c, L^c)$ é construído, onde R^c é um subconjunto de roteadores, (cujo tamanho é igual ao percentual de cobertura) contido no conjunto X e L^c é representado por todos os enlaces que compõem os menores caminhos (ou caminhos de menor custo) entre os roteadores de R^c (linhas 15-18). Aplica-se no subgrafo N^c um algoritmo de *Minimum Spanning Tree (MST)* para construir um novo *core* para a infraestrutura, o qual irá atuar como um reforço estrutural evitando o particionamento de regiões críticas (linha

Input: Capital disponível, Percentual de cobertura, Periodicidade da expansão, Infraestrutura física do InP N , Mapeamento das redes virtuais $A_{i,r,j}^R$ and $A_{i,j,r,k,l}^L$

Output: Conjunto de dispositivos físicos a serem expandidos

```

1  $X \leftarrow \emptyset$ 
2  $F \leftarrow \emptyset$ 
3  $C \leftarrow \emptyset$ 
4 foreach  $UnidadeTempo$  do
5    $particoes \leftarrow obterConjuntoParticoes(N, E^R, E^L)$ 
6    $X \leftarrow atualizarEnlacesCorte(particoes)$ 
7    $F \leftarrow atualizarFrequencia(X)$ 
8    $C \leftarrow atualizarCobertura(X, particoes)$ 
9   if  $PeriodicidadeDaExpansao$  then
10    foreach  $(i, j) \in X$  do
11       $I_{i,j} \leftarrow \frac{F_{i,j}}{\sum_{\forall(i,j)} F_{i,j}} \cdot C_{i,j}$ 
12    end
13    while  $true$  do
14       $ordenaDesc(X, I)$ 
15       $list \leftarrow seleciona \% dos enlaces de X (\% igual ao percentual de cobertura)$ 
16       $R^c \leftarrow roteadores de list$ 
17       $L^c \leftarrow enlaces dos caminhos de custo mínimo entre cada par de roteador  $(a, b) \in R^c$$ 
18       $N^c = (R^c, L^c)$ 
19       $sol^c \leftarrow mst(N^c)$ 
20      if  $numeroRoteadores(sol^c) > Cobertura$  ou  $numeroEnlaces(sol^c) > Cobertura$  then
21         $X.removeItem()$ 
22      else
23         $parar$ 
24      end
25    end
26     $sugiraExpansaoEnlaces(CapitalDisponivel)$ 
27     $sugiraExpansaoRoteadores(CapitalDisponivel)$ 
28     $X \leftarrow \emptyset$ 
29 end

```

Algoritmo 1: Visão geral da solução proposta para o problema de expansão de redes de InPs.

19). Como existem algoritmos polinomiais para realizar esse procedimento, tal como o algoritmo de Prim, o procedimento pode ser calculado em $O(|L^c| + |R^c| \log |R^c|)$ passos. É importante mencionar que a solução resultante da $mst(N^c)$ pode conter mais elementos que a cobertura mínima (restrição 7). Isso acontece porque L^c é composto por um conjunto de caminhos que interligam todos os roteadores de R^c . Por esse motivo, podem existir roteadores intermediários na solução que não pertençam inicialmente a R^c . Quando isso acontece, repete-se iterativamente o processo de reconstrução do grafo N^c , eliminando o enlace de corte menos relevante (linhas 20-24).

Por fim, após a criação da estrutura de reforço, é sugerida a expansão da capacidade dos enlaces e roteadores (linhas 22-23). A expansão dos dispositivos físicos pode seguir diferentes estratégias. Por exemplo, todo o capital disponível para a expansão pode ser investido uniformemente entre os roteadores e enlaces selecionados ou definir uma distribuição probabilística baseada na importância de cada elemento. Por questões de espaço, neste artigo a solução de expansão não utiliza uma estratégia de priorização para a distribuição do investimento entre os dispositivos selecionados na etapa anterior (ou seja, os recursos são distribuídos uniformemente).

4. Avaliação do Impacto da Expansão no Mapeamento de Redes Virtuais

Para mensurar o impacto de expansões sugeridas pela estratégia proposta no processo de mapeamento de redes virtuais, a mesma foi implementada e submetida a um processo sistemático de avaliação. Os experimentos foram realizados em uma máquina com quatro processadores AMD Opteron 6276 e 64 GB de memória RAM, usando o sistema operacional Ubuntu GNU/Linux Server 11.10 x86_64.

4.1. Carga de Trabalho e Modelo de Mapeamento

Para realizar os experimentos, desenvolveu-se um gerador de requisições de redes virtuais. Esse gerador é executado por um período de 360 unidades de tempo (nesta avaliação trabalhamos com a ideia de que cada unidade de tempo corresponde a um dia, perfazendo o período de 360 dias). Em cada unidade de tempo, três requisições de redes virtuais são geradas. Cada requisição gerada possui uma duração limitada, ou seja, após um determinado número de unidades de tempo, a mesma é removida. Ressalta-se que essa forma de instanciação, baseada no emprego de unidades de tempo e com uso de parâmetros fixos para a chegada de requisições, tem como objetivo proporcionar um maior controle sobre os experimentos, evitando que os resultados sejam afetados de forma imprevisível pela variação simultânea de múltiplos fatores.

As redes utilizadas como substrato físico foram geradas por meio da ferramenta IGen². A topologia dessas redes segue o padrão *hub & spoke*, conforme caracterização realizada por Luizelli et al. [Luizelli et al. 2013]. Essa classe de topologia foi escolhida como uma aproximação de redes encontradas em ambientes reais. As redes físicas instanciadas possuem 50 roteadores, cada um com capacidade total de CPU definida como 100% e 256 MB de memória, enquanto que a largura de banda dos enlaces físicos é de 10 Gbps. Além disso, as capacidades de expansão de roteadores e enlaces físicos são definidas como o dobro de suas capacidades iniciais.

A topologia de cada rede virtual segue a forma de anel. Acredita-se que tal topologia é capaz de representar requisições de redes virtuais de forma adequada, devido a características como a resiliência a falhas individuais em enlaces. Além disso, ressalta-se que o emprego de classes de topologias típicas de provedores (como, por exemplo, *hub & spoke*), nesse caso, poderia levar a uma redução artificial nas taxas de rejeição devido à similaridade entre as redes virtuais e a rede física. As redes virtuais possuem 5 roteadores cada. Roteadores virtuais requerem 20% de CPU e 48 MB de memória, enquanto que a largura de banda requisitada é de 2.5 Gbps. Ressalta-se que tal escolha de parâmetros tem como objetivo reproduzir, por meio de uma carga de trabalho homogênea, os mesmos fenômenos observados em avaliações prévias [Luizelli et al. 2013]. Tais fenômenos incluem uma alta taxa de rejeição de redes virtuais e uma quantidade significativa de recursos disponíveis na infraestrutura de maneira global. Na avaliação recém referida, observou-se que a carga de trabalho descrita leva a uma taxa de aceitação de 66,60% e a uma utilização global de recursos de 60,03% para largura de banda, 52,43% para CPU e 55,93% para memória. Ou seja, apesar do consumo de recursos ficar abaixo de 60%, ainda se observa em [Luizelli et al. 2013] taxas de rejeição da ordem de 30%. Vale frisar que realidade semelhante é observada em outros trabalhos relacionados a VNE, tais como os citados na Introdução. Com a expansão criteriosa da infraestrutura física, cujos resultados são apresentados em Subseção a seguir, espera-se alcançar patamares bem superiores de aceitação e, mais importante, a um melhor aproveitamento sustentado dessa grande quantidade de recursos ociosos.

Durante a avaliação, realiza-se uma única expansão, na 180^a unidade de tempo (*i.e.*, passado um semestre). Os custos de expansão também são definidos de maneira homogênea, isto é, considera-se que os dispositivos são iguais e, portanto, os custos de expansão são os mesmos. Os experimentos possuem, ainda, dois parâmetros variáveis: a cobertura de expansão e o percentual de crescimento. Foram executadas 30 repetições de cada experimento, considerando como base diferentes instâncias de substrato físico.

Como o modelo de expansão proposto está intrinsecamente relacionado com o problema de mapeamento de redes virtuais, considera-se o problema *online* proposto por

²<http://igen.sourceforge.net/>

Luizelli et al. [Luizelli et al. 2013]. Naquele modelo, os autores consideram as principais restrições relatadas na literatura recente. Em contraste, neste trabalho considera-se uma versão simplificada na qual não são consideradas restrições de localidade, uma vez que o objetivo é avaliar, inicialmente, o impacto da aplicação do modelo de expansão em uma versão genérica do problema de mapeamento de redes virtuais.

4.2. Resultados

Primeiramente, analisa-se o ganho médio em termos de requisições de redes virtuais aceitas após a expansão dos recursos da infraestrutura física. Ressalta-se que requisições de redes virtuais somente são aceitas caso seja possível mapear todos os seus roteadores e enlaces virtuais no substrato. A Figura 2 ilustra os ganhos médios de redes virtuais *adicionais* aceitas considerando variações no percentual de recursos físicos expandidos (expansão) e na quantidade de dispositivos afetados pela expansão (cobertura). Quanto maior é o percentual da cobertura, mais o investimento é multiplexado entre os dispositivos da infraestrutura. O gráfico revela que o ideal é haver um equilíbrio entre o investimento e a cobertura da expansão. Se a cobertura da expansão for demasiadamente alta ou baixa, os benefícios obtidos são menos significativos. As médias observadas apontam que, para maximizar a aceitação adicional de redes virtuais, a cobertura da expansão deve ser entre 20% e 30%. Considerando esses percentuais de cobertura, observa-se, respectivamente, um aumento de 31,06% e 31,76% na aceitação adicional de redes virtuais para um aumento (investimento) de 20% de novos recursos em relação à rede original. Para um investimento de 10%, os ganhos observados são de, respectivamente, 14,48% e 12,87%.

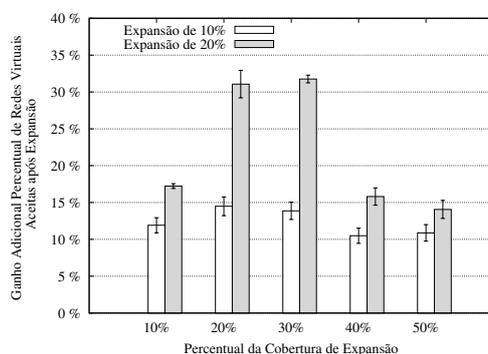


Figura 2. Média adicional de redes virtuais aceitas após a aplicação do procedimento de expansão.

A Figura 3 ilustra a utilização média dos enlaces físicos após a expansão. Cada ponto no gráfico representa a utilização média alcançada desde o início do experimento até a unidade de tempo em questão. A linha horizontal em preto em cada gráfico representa a expansão de recursos realizada. Valores acima dessa linha indicam que o provedor está utilizando, além dos recursos expandidos (10% na Figura 3(a) e 20% na Figura 3(b), como explicado a seguir), uma parcela de recursos não utilizados (ou pouco utilizados) antes do processo de expansão. Nos casos em que a média é inferior à linha horizontal, ocorre a subutilização dos recursos expandidos. A Figura 3(a) apresenta a média de utilização dos recursos para uma expansão de 10% dos recursos da rede física. Nesse caso, nota-se que a utilização dos recursos é melhor aproveitada quando a cobertura é menor. Para uma cobertura de até 20%, é possível obter um ganho sustentado de utilização de recursos de até 21% em relação ao cenário sem expansão. Nos demais casos, com cobertura igual ou superior a 30%, o benefício obtido em termos de utilização de recursos mantém-se abaixo dos 10% investidos. Isso está diretamente relacionado à multiplexação de poucos

recursos em muitos dispositivos, o que leva a um aumento bem pouco significativo das capacidades dos recursos expandidos. A Figura 3(b) apresenta a média de utilização de largura de banda para uma expansão de 20% dos recursos. Nota-se que, para coberturas de 20% e 30%, tem-se um ganho de utilização de recursos de até 45% em relação ao cenário sem expansão. Os ganhos observados em termos de utilização de recursos devem-se, principalmente, ao reforço estrutural realizado em certas regiões da infraestrutura, o que leva a um menor nível de particionamento e favorece diretamente a uma menor fragmentação dos recursos ociosos. Ressalta-se que tais benefícios podem levar a custos mais baixos para os solicitantes, uma vez que o provedor consegue melhor aproveitar recursos antes não utilizados. Assim como na avaliação anterior, o gráfico revela que existe uma relação entre o percentual investido, a cobertura da expansão e o percentual de ganho na utilização dos recursos físicos.

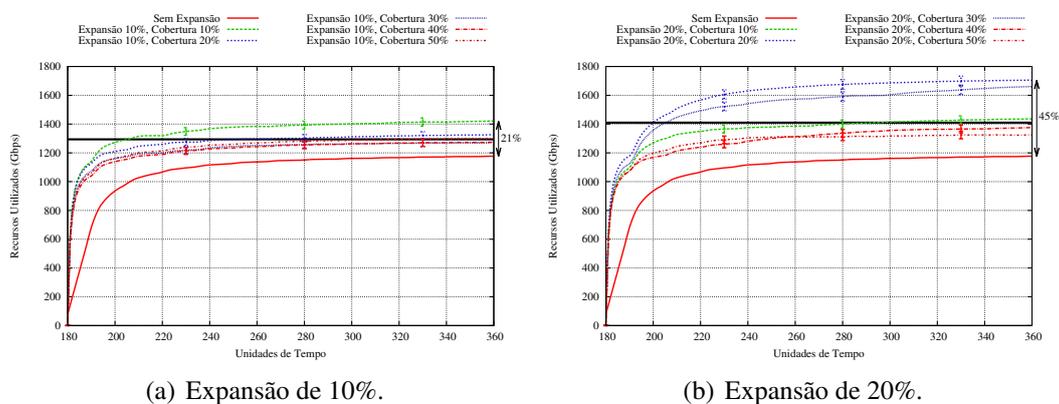


Figura 3. Utilização global de largura de banda dos enlaces físicos após a expansão.

A seguir, a Figura 4 apresenta uma visão qualitativa da estratégia proposta por meio de uma representação gráfica da utilização média dos recursos de uma infraestrutura física antes e depois da aplicação do procedimento de expansão. Nota-se, primeiramente, que a utilização dos recursos dos enlaces físicos e roteadores antes da expansão está concentrada em certas regiões da infraestrutura. Devido à superutilização dos recursos de certos dispositivos físicos (principalmente de nós *hubs* e enlaces de corte), os recursos da infraestrutura, de modo geral, acabam sendo subutilizados. Após a aplicação da estratégia de expansão, a qual cria uma estrutura de reforço baseada na reconexão das partições recorrentes, nota-se que a distribuição do consumo de recursos físicos é, de maneira geral, significativamente mais homogênea. Ademais, a estratégia de expansão proporciona uma maior utilização de recursos previamente subutilizados na infraestrutura.

Por fim, discute-se o tempo médio necessário para encontrar uma solução factível para o problema de expansão. Em todos os experimentos, o tempo médio necessário para a resolução do algoritmo proposto permanece abaixo de 1 segundo, já que a estratégia de expansão proposta apresenta complexidade polinomial. Tais resultados indicam que a solução pode ser aplicada em infraestruturas com escalas maiores, ainda assim sendo capaz de gerar soluções em um tempo hábil.

5. Conclusão

A virtualização de redes é um tema que vem recebendo considerável atenção da comunidade científica e da indústria, resultando em uma série de trabalhos que envolvem principalmente questões de mapeamento de redes virtuais. Embora tenha-se empreendido

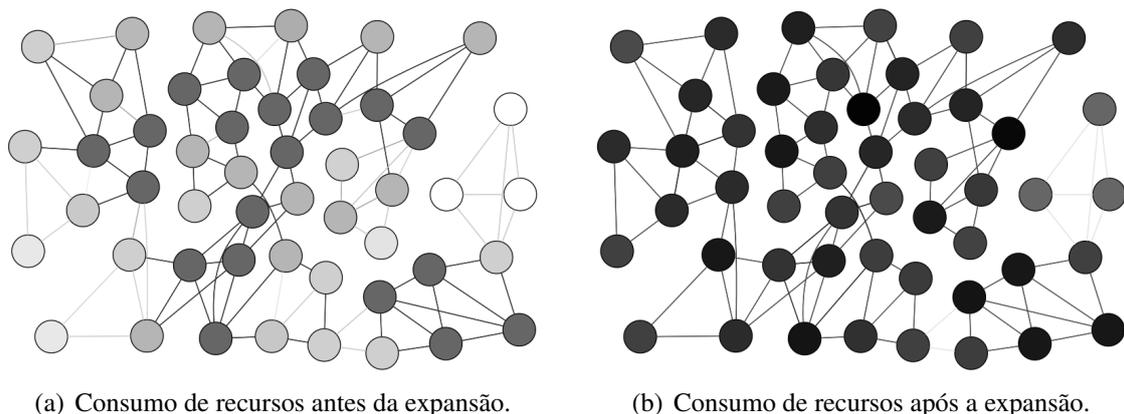


Figura 4. Representação gráfica do consumo médio de recursos da infraestrutura antes (a) e depois (b) de uma expansão de 20% dos recursos com cobertura de 20%. Tons mais escuros representam maior utilização de recursos físicos.

esforços para resolver tal problema, observa-se que grande parte das requisições de redes virtuais são rejeitadas devido ao esgotamento de recursos apenas em pontos-chave da mesma. Além disso, desconhecia-se trabalhos que investigassem como a rede física de um provedor de infraestrutura pode ser expandida para acomodar uma fração significativamente maior de redes virtuais em comparação ao alcançado com a rede física original. Neste artigo propôs-se uma estratégia de expansão baseada na reconexão de partições recorrentes para suprir as necessidades que a virtualização impõe em redes de InPs. A principal inovação da estratégia consiste em considerar fatores topológicos no processo de expansão ao invés de matrizes de demanda.

Após formalizar uma estratégia de expansão para infraestruturas físicas de InPs no contexto do problema de mapeamento de redes virtuais e aplicá-la sobre substratos com topologias observadas em redes de provedores, avaliou-se a mesma no que diz respeito a melhorias em relação à taxa de aceitação e utilização de recursos da infraestrutura. Os resultados obtidos evidenciam que a expansão dos recursos da infraestrutura utilizando a estratégia proposta contribuiu significativamente para um aumento sustentado de até 30% no número de redes virtuais aceitas e de até 45% no aproveitamento dos recursos em comparação com a rede original.

Como perspectivas de trabalhos futuros, pretende-se estender a avaliação da estratégia de expansão aplicando-a em outras topologias de *backbone*, bem como aprofundar a compreensão do inter-relacionamento dos parâmetros do modelo. Além disso, pretende-se propor e avaliar novas estratégias de distribuição de recursos entre os dispositivos da infraestrutura a serem expandidos.

Referências

- Alkmim, G. P., Batista, D. M., and Fonseca, N. L. S. (2011). Mapeamento de redes virtuais em substratos de rede. In *XXIX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pages 45–58, Campo Grande, MS, Brazil.
- Alkmim, G. P., Batista, D. M., and Fonseca, N. L. S. (2013). Mapping virtual networks onto substrate networks. *Journal of Internet Services and Applications*, 3(4):1–15.
- Bays, L. R., Oliveira, R. R., Buriol, L. S., Barcellos, M. P., and Gasparly, L. P. (2012). Security-aware optimal resource allocation for virtual network embedding. In *Procee-*

- dings of the 8th International Conference on Network and Service Management*, pages 378–384, Las Vegas, USA.
- Cheng, X., Su, S., Zhang, Z., Shuang, K., Yang, F., Luo, Y., and Wang, J. (2012). Virtual network embedding through topology awareness and optimization. *Computer Networks*, 56(6):1797 – 1813.
- Chowdhury, N., Rahman, M., and Boutaba, R. (2009). Virtual network embedding with coordinated node and link mapping. In *Proceedings of the 28th IEEE Conference on Computer Communications*, pages 783 –791, Rio de Janeiro, Brasil.
- Curtis, A., Carpenter, T., Elsheikh, M., Lopez-Ortiz, A., and Keshav, S. (2012). Rewire: An optimization-based framework for unstructured data center network design. In *Proceedings of the 31st IEEE Conference on Computer Communications*, pages 1116–1124, Orlando, USA.
- Curtis, A. and Lopez-Ortiz, A. (2009). Capacity provisioning a valiant load-balanced network. In *Proceedings of the 28th IEEE Conference on Computer Communications*, pages 3006–3010, Rio de Janeiro, Brazil.
- Gao, P. X., Curtis, A. R., Wong, B., and Keshav, S. (2012). It’s not easy being green. *SIGCOMM Computer Communication Review*, 42(4):211–222.
- Goemans, M. X. and Myung, Y.-S. (1993). A catalog of steiner tree formulations. *Networks*, 23(1):19–28.
- Johnston, M., Lee, H.-W., and Modiano, E. (2011). A robust optimization approach to backup network design with random failures. In *Proceedings of the 30th IEEE Conference on Computer Communications*, pages 1512–1520, Shanghai, China.
- Krishnaswamy, R. M. and Sivarajan, K. N. (2001). Design of logical topologies: a linear formulation for wavelength-routed optical networks with no wavelength changers. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 9(2):186–198.
- Luizelli, M., Bays, L., Buriol, L., Barcellos, M., and Gaspar, L. (2013). Characterizing the impact of network substrate topologies on virtual network embedding. In *9th International Conference on Network and Service Management*, pages 42–50, Zurich, Switzerland.
- Mukherjee, B., Banerjee, D., Ramamurthy, S., and Mukherjee, B. (1996). Some principles for designing a wide-area wdm optical network. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 4(5):684–696.
- Ramaswami, R. and Sivarajan, K. (1996). Design of logical topologies for wavelength-routed optical networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 14(5):840–851.
- Shen, G. and Tucker, R. (2009). Energy-minimized design for ip over wdm networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 1(1):176–186.
- Sleator, D. D. and Tarjan, R. E. (1983). A data structure for dynamic trees. *Journal of Computer and System Sciences*, 26(3):362 – 391.
- Yu, M., Yi, Y., Rexford, J., and Chiang, M. (2008). Rethinking virtual network embedding: substrate support for path splitting and migration. *SIGCOMM Computer Communication Review*, 38(2):17–29.