

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

{mcluiuzelli, 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

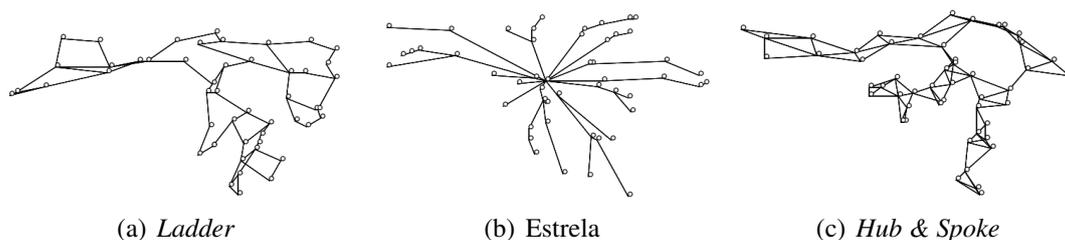


Figura 1. Exemplos de classes de topologias de provedores de rede.

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 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).

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.

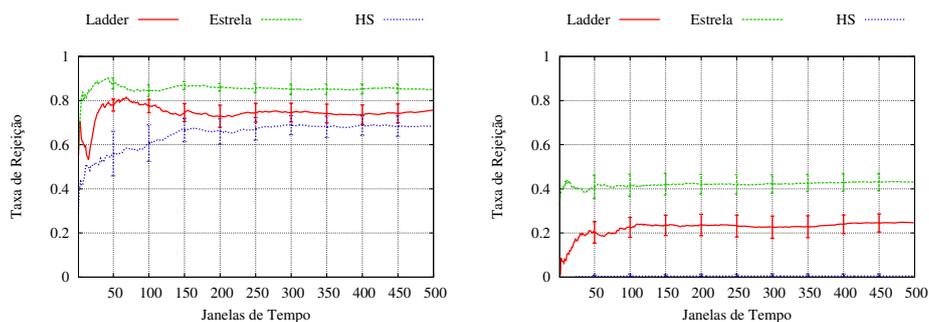
¹<http://www-01.ibm.com/software/integration/optimization/cplex-optimization-studio/>

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.

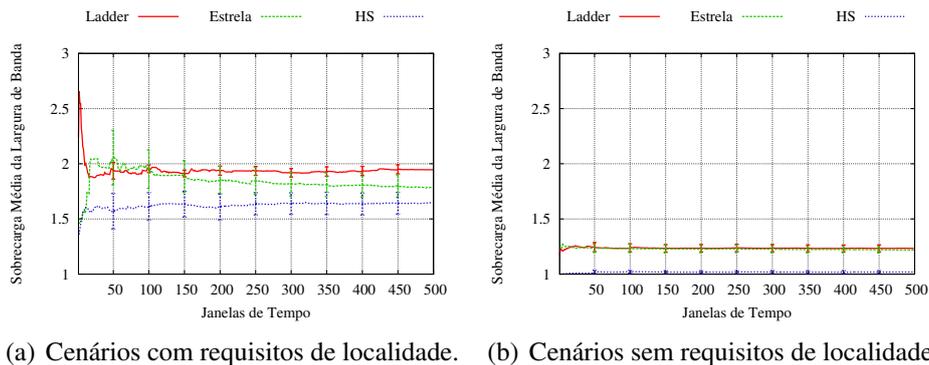
Ainda observando o gráfico ilustrado na Figura 2, percebe-se uma diferença nas taxas de rejeição ao se utilizar diferentes topologias físicas. A topologia do tipo *hub & spoke* apresenta uma taxa de rejeição inferior às demais em ambos cenários avaliados (68,44% no cenário com restrições de localidade 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.

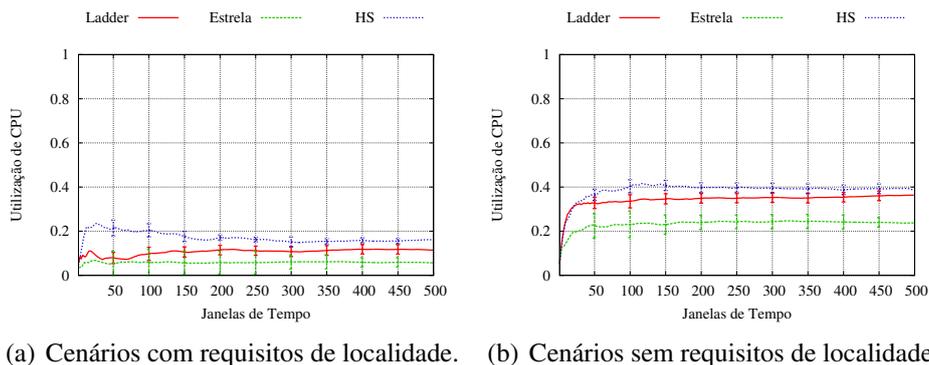
A seguir, avalia-se o consumo médio dos recursos físicos – CPU e memória dos roteadores e largura de banda dos enlaces – nos experimentos realizados. A Figura 4 apresenta o consumo médio de CPU dos roteadores físicos da infraestrutura. Considerando requisitos de localidade, nota-se que o consumo médio 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.

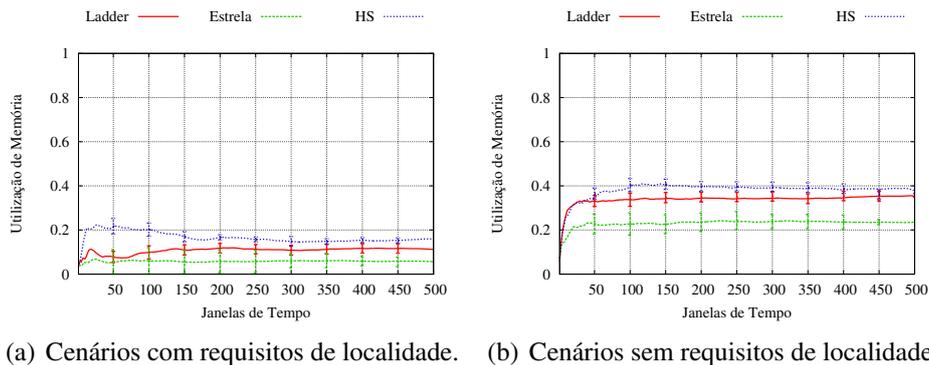


(a) Cenários com requisitos de localidade. (b) Cenários sem requisitos de localidade.

Figura 4. Utilização média de CPU dos roteadores físicos.

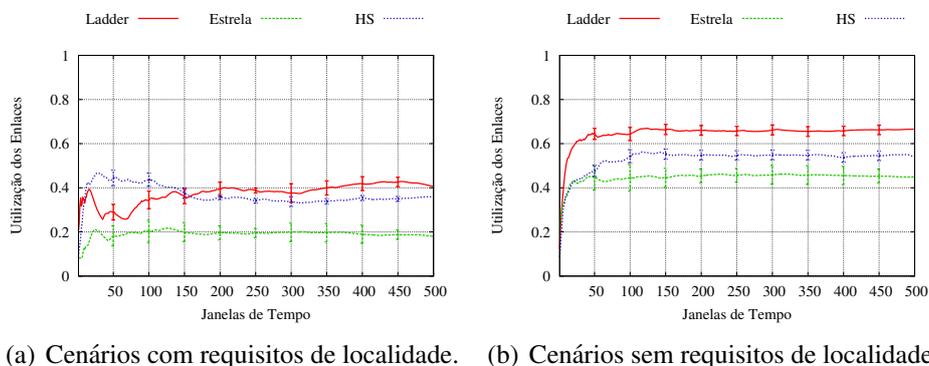
A Figura 5 apresenta o consumo médio de memória nos roteadores físicos. Percebe-se que o comportamento da utilização de memória dos roteadores é similar ao da utilização de CPU. Nos experimentos que consideram requisitos de localidade, a utilização média de memória é de 5,65% na topologia *estrela*, 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-

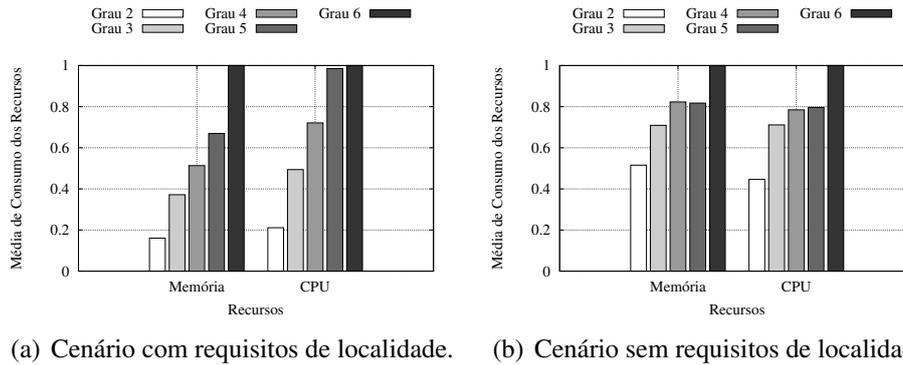


Figura 7. Consumo médio dos recursos de roteadores físicos com diferentes graus de conectividade nos cenários que empregam a topologia *hub & spoke*.

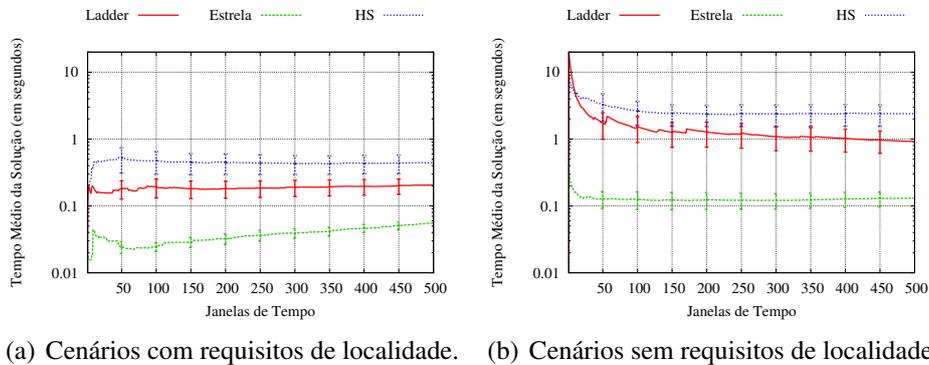


Figura 8. Tempo médio necessário para encontrar a alocação ótima.

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.