

# Mapeamento de Redes Virtuais em Substratos de Redes

Gustavo P. Alkmim<sup>1</sup>, Nelson L. S. da Fonseca<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Computação – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)  
Campinas - SP - Brazil

{alkmim,nelson}@ic.unicamp.br

**Resumo.** A virtualização de redes é uma tecnologia promissora para utilização na chamada “Internet do Futuro”. Uma das principais questões em virtualização é o mapeamento eficiente de redes virtuais em substratos de redes. Na dissertação [Alkmim 2012], propõem-se algoritmos baseados em programação linear inteira 0–1 que consideram diversas hipóteses realistas não consideradas nos algoritmos existentes na literatura. Os resultados mostram que os algoritmos desenvolvidos encontram soluções adequadas em tempo hábil.

**Abstract.** Network virtualization is a promising technology for the so called “Future Internet”. One of the main open-questions is the efficient virtual network mapping onto network substrates. This paper summarizes the thesis [Alkmim 2012], in which efficient algorithms for network mapping are proposed. These algorithms make realistic assumptions not considered in existing algorithms. Results show the efficacy of the proposed algorithms.

## 1. Introdução

O caráter minimalista da arquitetura da Internet possibilitou sua ampla disseminação. No entanto, a diversificação das aplicações e o intenso uso da Internet como infraestrutura global de comunicação levou à adição de vários protocolos e mecanismos a sua arquitetura. Contudo, muitas destas adições são incompatíveis entre si e ineficientes. Além disso, postula-se que a atual arquitetura deva evoluir e incorporar em sua estrutura novas funcionalidades. Chama-se, genericamente, esta mudança arquitetural de “Internet do Futuro”.

Uma das soluções mais promissoras para a Internet do Futuro é a virtualização de redes pois permite a coexistência de diversas redes virtuais sobre a mesma rede física (substratos de redes) sem a necessidade de modificação do núcleo da Internet. Uma das questões mais importantes em virtualização de redes é a definição de como as redes virtuais devem ser mapeadas na rede física, problema este denominado de mapeamento de redes. O mapeamento de redes é um problema NP-difícil pois pode ser reduzido ao Problema de Separação de Multi-caminhos que, também, é NP-difícil.

Soluções propostas na literatura assumem, invariavelmente, hipóteses restritivas para tornar o problema tratável, como por exemplo consideram que as requisições são conhecidas antecipadamente e assumem o substrato de rede com capacidade infinita e topologia específica. De uma maneira geral, consideram somente a capacidade dos enlaces e a capacidade de processamento dos roteadores como variáveis a serem alocadas.

Recentemente, o consumo de energia na operação das redes tornou-se uma grande preocupação devido ao fato das atividades de tecnologia de informação e comunicação

produzirem cerca de 2% da emissão global de carbono e o consumo de energia desse setor crescer a uma taxa mais alta do que a do poder de computação. Consequentemente, a alocação de recursos orientada ao menor consumo de energia passou a ser um dos objetivos mais importantes no projeto de mecanismos e protocolos.

A dissertação [Alkmim 2012] teve como objetivo o desenvolvimento de algoritmos eficientes baseados em hipóteses realistas para o problema de mapeamento de redes. Ao se comparar com os algoritmos existentes na literatura, pode-se destacar que os algoritmos propostos são os únicos que consideram: conjuntos de imagens com tamanhos diferentes, o tempo necessário para instanciar os roteadores virtuais, a localização dos repositórios de imagens, a memória disponível nos roteadores físicos, restrições sobre o uso de roteadores físicos por roteadores virtuais (restrição de localidade), atraso nos enlaces e o limite de tempo para instanciação das redes virtuais. A desconsideração dessas características leva a soluções que dificilmente atendem os níveis de qualidade de serviços exigidos em contratos de serviços. Por considerar uma quantidade maior de parâmetros, a complexidade da solução do problema cresce e, portanto, tem-se a necessidade de algoritmos eficientes.

A contribuição da dissertação [Alkmim 2012] foi a formulação de duas modelagens matemáticas para o problema de mapeamento de redes virtuais capazes de obter resultados satisfatórios para substratos de até 400 nós em poucos segundos. Uma das modelagens reduz a utilização de recursos e a outra o consumo de energia do substrato. O aspecto original dessas modelagens é o desacoplamento do mapeamento de nós e enlaces da definição de rotas. Foram derivados seis algoritmos dessa modelagem que diferem pela eficiência e qualidade da solução. Os algoritmos avançam significativamente o estado da arte do problema de mapeamento de redes, uma vez que introduzem uma modelagem realista das redes operacionais. Além disso, foram os primeiros algoritmos publicados na literatura sobre mapeamento de redes a considerarem o consumo de energia. A relevância da contribuição da dissertação é permitir a efetivação da implementação de redes virtuais em ambientes dinâmicos. Postula-se que o impacto da contribuição é a facilitação da utilização da técnica de virtualização de redes para a realização da Internet do Futuro.

## **2. Trabalhos Relacionados**

Uma solução para o problema de mapeamento baseada na formulação de “multi-commodity flow” foi proposta em [Szeto et al. 2003] e tem como objetivo maximizar o número de redes virtuais que podem ser acomodadas em um substrato. Em [Yu et al. 2008], apresenta-se uma abordagem que permite o “Path Splitting” e a migração de caminhos. Em [Lu and Turner 2006], a rede mapeada é capaz de suportar o tráfego definido por um conjunto de restrições genéricas.

Em [Chowdhury et al. 2009], foram introduzidos algoritmos que fazem uma correlação entre as etapas de mapeamento de nós virtuais e de mapeamento de enlaces virtuais. Em [Houidi et al. 2008], foi proposto um algoritmo distribuído para realizar o mapeamento de redes virtuais, cujo objetivo é garantir o balanceamento de carga entre todos os nós do substrato. Em [Luizelli et al. 2013] utiliza-se uma modelagem semelhante a proposta em [Alkmim 2012] para avaliar o impacto de topologias típicas de backbones (star, ladder e hub and spoke) no mapeamento de redes virtuais. A tabela 1 mostra uma comparação entre as características do problema consideradas pelos trabalhos na liter-

atura e os algoritmos introduzidos na dissertação [Alkmim 2012]. Nota-se, facilmente, a completude da formulação proposta.

**Tabela 1. Comparação entre os algoritmos de mapeamento.**

Referência	Número de núcleos de processamento	Banda passante	Restrição de localidade	Imagens para roteadores virtuais
[Szeto et al. 2003]	não	sim	não	não
[Yu et al. 2008]	sim	sim	não	não
[Chowdhury et al. 2009]	sim	sim	sim	não
[Houidi et al. 2008]	sim	sim	não	não
[Lu and Turner 2006]	não	sim	não	não
[Botero et al. 2011]	sim	sim	não	não
Algoritmos propostos	sim	sim	sim	sim

Referência	Atraso nos enlaces	Memória disponível e tamanho das imagens	Localização dos repositórios de imagens	Tempo de instanciação
[Szeto et al. 2003]	não	não	não	não
[Yu et al. 2008]	não	não	não	não
[Chowdhury et al. 2009]	sim	não	não	não
[Houidi et al. 2008]	não	não	não	não
[Lu and Turner 2006]	não	não	não	não
[Botero et al. 2011]	não	não	não	não
Algoritmos propostos	sim	sim	sim	sim

### 3. Algoritmos e Modelagem Matemática

Os algoritmos utilizam duas formulações baseadas em Programação Linear Inteira (PLI), uma para mapear enlaces e roteadores e outra para definir rotas. Foram utilizadas duas formulações para reduzir a dimensão de variáveis que impediam a obtenção de soluções para substratos com mais de 30 roteadores. Para encontrar as soluções das formulações de PLI foi empregado o software *IBM ILOG CPLEX Optimizer*, que usa um algoritmo proprietário, baseado no método de enumeração *Branch & Cut*.

#### 3.1. Minimização do Consumo de Recursos

Tem-se como um dos objetivos a minimização da banda alocada por requisição a fim de se aumentar a disponibilidade de banda passante para as solicitações futuras. A primeira formulação (*ILP-Mapping*) realiza o mapeamento dos roteadores e enlaces da rede virtual em roteadores e enlaces do substrato. Após a obtenção do mapeamento, determinam-se as rotas utilizadas para transferir as imagens dos repositórios para os roteadores do substrato que irão hospedar os roteadores virtuais (*ILP-Image*). Devido a restrição de espaço, a modelagem do problema será descrita aqui de forma textual e as formulações matemáticas podem ser encontradas no capítulo 3 da dissertação [Alkmim 2012]. A descrição textual do ILP-Mapping é: Com base nesta modelagem, foram elaborados 6 algoritmos:

---

**Minimizar** Banda Passante Alocada

**Sujeito a:**

- C1 - Cada nó virtual seja mapeado em apenas um nó físico, utilizando apenas uma imagem
  - C2 - Apenas um nó virtual pode ser alocado por nó físico em uma requisição
  - C3 - A capacidade de processamento dos nós seja respeitada
  - C4 - Cada roteador virtual seja instanciado usando uma imagem que satisfaça a todos os requisitos de software, bem como respeite qualquer restrição de localização geográfica definida pelo cliente ao requisitar uma rede virtual.
  - C5 - O limite de banda passante dos enlaces seja respeitada
  - C6 - O atraso máximo permitido pelos enlaces virtuais seja respeitado
  - C7 - A capacidade de memória dos roteadores seja respeitada
  - C8 - Um enlace físico deve ser utilizado somente se ele existir no grafo da rede física
  - C9 - A restrição de fluxo seja respeitada
- 

- **Algoritmo Ótimo:** percorre toda a árvore de busca de soluções.
- **Algoritmo Root:** visita somente a raiz da árvore de busca.
- **Algoritmos Randômico (RAA) e Determinístico (DAA):** algoritmos aproximativos que relaxam as variáveis inteiras. Após resolver a formulação, as variáveis

relaxadas são transformadas em inteiras através de arredondamentos. No RAA, o maior valor real para um nó virtual é arredondado para 1, enquanto no DAA, um número aleatório é sorteado e se este for inferior ao valor da variável real, o valor real é arredondado para 1.

- **Algoritmos Randômico Iterativo (IRAA) e Determinístico Iterativo (IDAA):** São semelhantes aos algoritmos RAA e DAA. Após uma execução das PLI's, apenas um valor de um grupo de variáveis é aproximado, sendo necessárias mais execuções das PLI's para que todas as variáveis sejam aproximadas.

### 3.2. Minimização do Consumo de Energia

Para contabilizar o consumo de energia da alocação de recursos para uma rede virtual, contabilizam-se o consumo energético da transmissão nos enlaces, das interfaces de redes, dos núcleos dos roteadores e dos chassis. As soluções podem indicar que roteadores e enlaces não utilizados devem ser “ligados” para acomodar novas requisições. A formulação para minimização do consumo de energia adiciona restrições à formulação anteriormente apresentada e é descrita textualmente a seguir:

---

Minimizar: Número de roteadores e enlaces ligados

Sujeito a

**C1-C9** - Iguais ao ILP-Mapping

**C10** - Nenhum núcleo seja alocado em um roteador que esteja previamente desligado

**C11** - Caso o roteador esteja ligado, deve existir pelo menos um núcleo alocado nele.

**C12** - Um enlace virtual pode ser alocado em um enlace físico caso este esteja ligado

**C13** - Caso o enlace físico esteja ligado, deve existir pelo menos um enlace virtual alocado nele

---

A formulação matemática pode ser vista no capítulo 5 de [Alkmim 2012]

## 4. Avaliação de Desempenho dos Algoritmos

Esta seção descreve, de forma geral, os resultados obtidos na avaliação dos algoritmos propostos. O Capítulo 4 e a Seção 5.4 da dissertação [Alkmim 2012] mostram todos os cenários executados e todos resultados obtidos.

Para se avaliar os algoritmos propostos, desenvolveu-se um simulador que gera requisições de três tipos ao longo do tempo, que diferem no número de roteadores, número de núcleos e na banda passante por enlace virtual. Todos os valores de parâmetros utilizados nas simulações foram baseados em valores de equipamentos reais. As requisições possuem tempo máximo para serem atendidas, refletindo a provisão dinâmica de serviços bem como requisições de imagens específicas e de localidade.

A topologia do substrato e das redes virtuais foram geradas aleatoriamente usando o gerador de topologias *BRITE*, com o algoritmo *BA-2*, um método que gera topologias de rede semelhantes às encontradas na Internet. O método de replicações independente foi empregado para gerar intervalos com níveis de 95% de confiança.

### 4.1. Minimização da Banda Passante

A Tabela 2 resume os resultados obtidos em cenário dinâmico para os algoritmos Ótimo e *Root*. Embora o algoritmo *Root* aloque mais banda passante por solicitação do que o algoritmo *Opt*, essas diferenças não têm impacto significativo na probabilidade de bloqueio. Além de possuírem a mesma probabilidade de bloqueio, o algoritmo *Root* reduziu o tempo de execução médio em até 99%. Esses resultados reforçam a vantagem da adoção do algoritmo *Root* para obtenção de solução com qualidade e em curto intervalo de tempo.

**Tabela 2. Resumo – cenários dinâmicos.**

Opt			
Tipo	Tempo de execução médio (s)	Banda passante média alocada (Mbps)	Taxa de bloqueio média
1	4.48	1282.73	17.43%
2	245.80	4311.06	55.15%
3	71.77	6052.83	88.08%
Root			
Tipo	Tempo de execução médio (s)	Banda passante média alocada (Mbps)	Taxa de bloqueio média
1	0.30	1491.63	17.43%
2	6.46	5775.64	55.10%
3	9.84	6387.78	88.08%

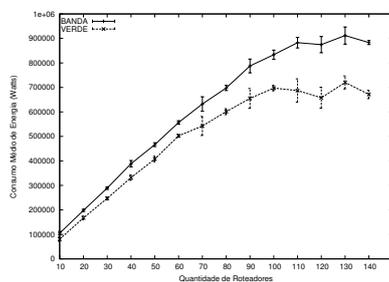
Os resultados produzidos pelos algoritmos aproximativos foram comparados com os gerados pelo algoritmo *Root* em cenário dinâmico. Variou-se o número de nós do substrato até 400, a fim de se avaliar o crescimento da demanda computacional e a qualidade da solução. A Tabela 3 resume os resultados encontrados que deixam claro que o algoritmo *Root* possui o melhor desempenho.

**Tabela 3. Comparações Numéricas (Valores Médios)**

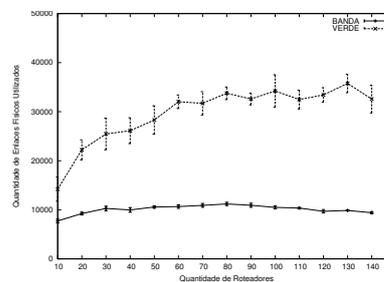
Tipo 1			
Algoritmo	Tempo de execução (s)	Banda passante (Mbps)	Requisições bloqueadas
<i>Root</i>	3.57	1314.57	10.40%
RAA	7.27	1816.10	15.79%
DAA	6.75	1706.33	15.97%
IRAA	54.82	1898.53	19.33%
IDAA	54.94	1827.07	17.86%

## 4.2. Minimização do Consumo de Energia

Para avaliar a capacidade dos algoritmos de sugerir soluções que reduzam o consumo de energia, foram comparadas as versões *Root* da formulação que reduz energia (*VERDE*) e da formulação que reduz banda passante (*BANDA*). Os resultados confirmam que a economia de energia sugerida pelo algoritmo *VERDE* implica em um maior consumo em banda passante. Apesar disto, não houve aumento significativo na probabilidade de bloqueio produzida pelo algoritmo *VERDE*.



**Figura 1. Consumo de energia médio por requisição**



**Figura 2. Banda alocada média por requisição**

## 5. Publicações

Os resultados obtidos na dissertação foram reportados em 7 artigos: um artigo em periódico internacional [Alkmim et al. 2013], um artigo no periódico nacional Revista

Brasileira de Redes de Computadores, ambos editados pela SBC; três artigos completos em conferências internacionais: no IEEE Globecom (Qualis A1) e no IEEE ICC (Qualis A2) e dois artigos completos nos anais do SBRC (Qualis B2), sendo um destes premiado como um dos cinco melhores do SBRC 2011 (não houve seleção do melhor artigo).

## 6. Conclusão

Neste artigo, foram apresentadas as contribuições da dissertação [Alkmim 2012], na qual foram propostos seis algoritmos para minimizar a banda passante alocada pelas redes virtuais e dois algoritmos para minimizar o consumo de energia da rede virtual. Os algoritmos apresentados são baseados em formulações do tipo PLI. A eficiência destes algoritmos permitem a viabilização do mapeamento de redes para a provisão de serviços em ambientes dinâmicos bem como a facilitação do emprego de virtualização como técnica para implementação da Internet do Futuro. Os resultados mostram que o algoritmo Root produz resultados de boa qualidade e encontra soluções em tempo hábil para ser utilizado em ambientes reais.

## Referências

- [Alkmim 2012] Alkmim, G. P. (2012). Mapeamento de redes virtuais em substratos de redes. MSc thesis. Universidade Estadual de Campinas – Instituto de Computação. <http://www.lrc.ic.unicamp.br/~alkmim/diss.pdf>.
- [Alkmim et al. 2013] Alkmim, G. P., Batista, D. M., and da Fonseca, N. L. S. (2013). Mapping virtual networks onto substrate networks. *Journal of Internet Services and Applications*, 4(1):3.
- [Botero et al. 2011] Botero, J., Hesselbach, X., Fischer, A., and de Meer, H. (2011). Optimal mapping of virtual networks with hidden hops. *Telecommunication Systems*, pages 1–10.
- [Chowdhury et al. 2009] Chowdhury, N., Rahman, M., and Boutaba, R. (2009). Virtual Network Embedding with Coordinated Node and Link Mapping. In *Proceedings of the IEEE INFOCOM*, pages 783–791.
- [Houidi et al. 2008] Houidi, I., Louati, W., and Zeghlache, D. (2008). A Distributed and Autonomic Virtual Network Mapping Framework. In *ICAS '08: In Proceedings of the 4th International Conference on Autonomic and Autonomous Systems*, pages 241–247.
- [Lu and Turner 2006] Lu, J. and Turner, J. (2006). Efficient Mapping of Virtual Networks onto a Shared Substrate. Technical Report WUCSE-2006-35, Washington University.
- [Luizelli et al. 2013] Luizelli, M. C., Bays, L. R., Buriol, L. S., Barcellos, M. P., and Gaspar, L. P. (2013). Caracterizando o Impacto de Topologias no Mapeamento de Redes Virtuais. In *in Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, 2013*, pages 75 – 88.
- [Szeto et al. 2003] Szeto, W., Iraqi, Y., and Boutaba, R. (2003). A multi-commodity flow based approach to virtual network resource allocation. In *Global Telecommunications Conference, 2003. GLOBECOM '03. IEEE*, volume 6, pages 3004–3008.
- [Yu et al. 2008] Yu, M., Yi, Y., Rexford, J., and Chiang, M. (2008). Rethinking Virtual Network Embedding: Substrate Support for Path Splitting and Migration. *ACM SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 38(2):17–29.