

# Revisitando o Problema de Alocação de Controladores SDN: Uma Análise sobre o Impacto do Custo de Recobrimento da Rede

Marcelo Santos<sup>1</sup>, Nazim Agoulmine<sup>2</sup>, Elie Rachkidy<sup>2</sup>, Stênio Fernandes<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal do Sertão Pernambucano (IF Sertão-PE)  
Salgueiro – PE – Brasil

<sup>2</sup>COSMO, IBISC Laboratory - University of Evry Val d'Essonne  
Evry, France

<sup>3</sup>Centro de Informática (CIn) – Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)  
Recife – PE – Brasil

marcelo.santos@ifsertao-pe.edu.br; {nazim.agoulmine,  
erachkidy}@ibisc.univ-evry.fr@ibisc.univ-evry.fr.br; sflf@cin.ufpe.br

**Abstract.** *Discovering a viable and optimum solution to the Software Defined Networking (SDN) Controller Placement Problem is a challenging task, as it must deal with a huge number of factors, such as cost, latency among network elements, and controllers' capacities. In this context, we formally modeled the SDN Controller Placement Problem as a set covering problem (NP-hard problem) to find the optimal solution that minimizes the placement cost through linear programming. We conducted experiments considering 112 real topologies. We identify features of real network topologies that affect the SDN controller placement cost. The results show a positive correlation between deployment cost and the number of nodes in a topology, on the other hand, there is no correlation between topology link delay and deployment cost of SDN controllers.*

**Resumo.** *Encontrar uma solução viável e ótima para o problema de alocação de controladores SDN é uma tarefa desafiadora dado a grande quantidade de fatores envolvidos no problema como custo, atraso entre os dispositivos da rede e capacidade dos controladores. Nesse contexto, este trabalho apresenta um modelo formal para o problema de alocação de controlares SDN (problema NP-Difícil) a fim de encontrar uma solução ótima que minimiza o custo de alocação através do uso de programação linear. Realizamos experimentos considerando 112 topologias reais. Identificando características que afetam o custo de alocação dos controladores SDN. Os resultados mostram, por exemplo, uma correlação positiva entre o custo de alocação e a quantidade de nós de uma topologia, por outro lado, não há uma correlação forte entre o atraso dos enlaces e o custo na alocação de controladores SDN.*

## 1. Introdução

Redes Definidas por Software (SDN) surgiram há alguns anos como uma alternativa para superar problemas enfrentados nos ambientes de redes de computadores. A grande inovação, se baseia na dissociação do plano de controle do plano de dados. Dessa forma, *switches* tem seu plano de dados gerenciado por um controlador SDN (entidade que age

como o plano de controle). Conseqüentemente, ao contrário das redes tradicionais, esses *switches* não implementam o plano de controle e as decisões de encaminhamento são baseadas em fluxos encaminhados do *switch* para o controlador. Além disso, SDN oferece uma camada de rede programável que permite que provedores de infraestrutura superem desafios como, por exemplo, o fenômeno conhecido como a ossificação da Internet (ESTEVEES; GRANVILLE; BOUTABA, 2013). Nesse cenário, um dos fatores importantes para que um provedor de infraestrutura migre para um paradigma SDN é o custo de capital (CAPEX) para adquirir novos equipamentos. Nesse contexto, é importante encontrar uma solução que distribuía os controladores sobre a rede com um custo mínimo, de forma balanceada, determinando a capacidade de cada controlador e seu posicionamento na rede. Dessa forma, pode-se tratar esse problema como um problema de otimização de recobrimento de redes (HOCK et al., 2014) (FARAHANI et al., 2012) (HELLER, SHERWOOD e MCKEOWN, 2012) (HAIDER; POTTER; NAKAO, 2009) cujo objetivo é minimizar o custo dos controladores que serão alocados para cobrir uma determinada topologia de rede. É importante destacar que esse problema é do tipo NP-Completo, conseqüentemente, pode exigir grande quantidade de recursos computacionais para encontrar uma solução ótima. Heller, Sherwood e MCKEOWN (2012) definem esse problema como o problema de alocação de controladores SDN (*Controller Placement Problem* - CPP).

Na resolução do problema de alocação de controladores SDN faz-se necessário definir a quantidade de controladores, o posicionamento de cada controlador, capacidade do controlador em gerenciar fluxos, e quais *switches* estarão em cada domínio. Além disso, outros atributos podem ser levados em consideração como o grau de programabilidade fornecido pelo controlador, protocolos de comunicação suportados entre o *switch* e controlador (e.g. OpenFlow<sup>1</sup> (MCKEOWN et al, 2008a), ForCES<sup>2</sup>) e restrição de atraso entre dispositivos. Dessa forma, a alocação de um controlador SDN pode ser visto como um ponto estratégico na rede. É importante salientar ainda que as decisões de mapeamento de controladores na rede influenciam aspectos relacionados ao desempenho da rede, tolerância a falhas, tempo de convergência entre dispositivos e a escalabilidade quando se discute questões de desempenho (ISHTAIQUE; JOURJON; GRAMOLI, 2015).

Assim, este artigo apresenta um modelo para o problema de recobrimento de redes adaptado ao problema de alocação de controladores SDN, considerando controladores com capacidades distintas. O modelo proposto é baseado em programação linear inteira utilizando o IBM's CPLEX<sup>3</sup> (software para resolução de problemas de otimização). A solução gerada determina como alocar controladores SDN em topologias de *backbone* reais provenientes da base de dados do Topology-Zoo<sup>4</sup>. Redes de *backbone* representam um cenário desafiador por estarem geograficamente distribuídas contendo enlaces com atrasos significativos quando comparado com redes de menor proporção. Nossos resultados mostram que apenas o fato de considerar controladores SDN com capacidades e custos diferentes é possível ter uma redução de até 40% no custo de recobrimento da rede quando comparado com uma solução onde todos os controladores possuem a mesma capacidade.

---

<sup>1</sup> [www.opennetworking.org](http://www.opennetworking.org)

<sup>2</sup> <http://datatracker.ietf.org/wg/forces/documents/>

<sup>3</sup> <http://www.ibm.com/developerworks/br/downloads/ws/ilogcplex/>

<sup>4</sup> <http://www.topology-zoo.org>

As contribuições principais deste artigo são duas: (1) um modelo formal para o problema de alocação de controladores SDN que minimiza os custos de implantação; (2) Investigação de quais características de uma topologia afetam o custo de alocação de controladores SDN.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma: Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados. Seção 3 dá uma visão breve sobre SDN e apresenta o problema de alocação de controladores SDN. Seção 4 apresenta o modelo para solução do problema. Seção 5 apresenta a metodologia. Seção 6 exhibe os resultados e discussões. Por fim, a Seção 7 conclui este artigo.

## 2. Trabalhos Relacionados

HELLER, SHERWOOD e MCKEOWN (2012) investigaram o impacto da latência entre controladores SDN e *switches* de acordo com a posição dos controladores na rede. No entanto, este artigo não propõe nenhum algoritmo ou técnica de otimização aplicada ao mapeamento de controladores da SDN. Os autores testam exaustivamente todas as possíveis soluções, assumindo que precisam alocar um número fixo de controladores em uma topologia específica. Os resultados indicam que controladores bem distribuídos podem minimizar a latência entre os *switches* e controladores. Os autores não levam em conta características importantes, tais como a capacidade do controlador, balanceamento de carga e o custo de cada controlador.

BARI *et al.*, (2013) propõem um provisionamento dinâmico de controladores SDN através da aplicação de duas heurísticas. A solução proposta adapta o número de controladores e suas respectivas posições de acordo com as condições da rede a fim de minimizar a sobrecarga de comunicação e atraso entre controladores e *switches*. Os autores assumem que qualquer ponto da rede é apto para instanciar um controlador SDN através de uma infraestrutura de virtualização. A capacidade é a mesma para todos os controladores e o custo financeiro não é levado em consideração em tal solução. Tais características tornam o problema atacado diferente do problema tratado neste artigo.

XIAO *et al.*, (2014) propuseram um algoritmo de alocação baseado em clusterização a fim de determinar quantos controladores SDN são necessários para cobrir uma topologia e a posição de cada controlador. Neste trabalho, Xiao et al. não levam em consideração a heterogeneidade dos controladores com diferentes capacidades e os custos financeiros envolvidos. Além disso, a avaliação da solução proposta foi realizada em uma única topologia, limitando a validação da solução.

ISHTAIQUE, JOURJON e GRAMOLI (2015) propõem uma solução para o problema de alocação de controladores SDN chamada LiDy, na qual é baseada em dois algoritmos chamados: (1) *Independent Controller Module Placement Algorithm* e (2) *Dynamic Flow Management Algorithm*. O primeiro algoritmo decide o posicionamento de cada controlador e o segundo algoritmo atribui fluxos entre *switch* e controlador de forma dinâmica baseado na carga de cada controlador. O custo de cada controlador é estimado, mas não faz parte do problema de otimização tratado no artigo.

LANGE *et al.*, (2015) apresenta um framework chamado *Pareto-based Optimal Controller placement* (POCO). Os autores propõem uma heurística para avaliar problemas complexos onde não é possível avaliar todas as soluções possíveis devido a limitações no tempo de processamento. A solução proposta considera latência, resiliência, falhas de nós, falhas de enlaces e desempenho da rede através de uma solução

multicritério no contexto de rede de larga-escala. No entanto, custo não está incluído como uma das métricas consideradas.

WANG et al., (2016) argumenta que a sobrecarga em controladores SDN causa um alto tempo de resposta nos controladores. Dessa forma, a solução proposta é baseada no argumento de que isso ocorre pelo não balanceamento de carga entre os controladores alocados na rede. Assim, os autores assumem a possibilidade de criar controladores adicionais de forma dinâmica através de uma solução fundamentada na teoria dos jogos que balanceia a carga de controladores dentro de um data center. O objetivo é minimizar o tempo de resposta dos controladores. Os resultados mostram uma redução de até 86% no tempo de resposta de controladores.

Em resumo, temos uma contribuição diferente dos trabalhos relacionados citados anteriormente, pois a solução proposta aloca controladores SDN uma única vez na rede, provisionando o número de controladores de acordo com a quantidade de *switches* atribuído a cada controlador. Dessa forma, não é uma solução dinâmica, com base na carga da rede em tempo real. Consideramos que a alocação dinâmica não é adequada para uma rede de larga-escala, pois o tempo de migração ou criação de um novo controlador é um fator limitante (XIAO *et al.*, 2014). O objetivo é minimizar o custo de alocação de controladores em um cenário de migração de uma rede tradicional para o paradigma SDN considerando switches e controladores com capacidades heterogêneas para manipular fluxos. Além dos pontos citados acima, o trabalho se diferencia dos demais por realizar uma análise das características que implicam no custo de implantação de controladores SDN.

### 3. SDN: Problema de Alocação de Controladores

Uma solução simples para o problema de alocação de controladores SDN é alocar um único controlador na rede, onde há apenas uma visão global da rede, tornando o processo de gerenciamento mais simples.

Por outro lado, um controlador único é um potencial ponto de falha sujeito a sobrecargas e problemas de escalabilidade. Ao contrário de alocar um único controlador, ter múltiplos controladores para a rede é benéfico do ponto de vista de confiabilidade da rede, escalabilidade e desempenho. No entanto, um número maior de controladores pode ocasionar um custo mais elevado devido ao custo de distribuir mais máquinas sobre a rede, gastos com licenças de software, eletricidade e manutenção. Nesse contexto, um correto mapeamento de controladores SDN num processo de migração para esse paradigma é fundamental para evitar custos e problemas adicionais no futuro.

#### 3.1. Quanto custa um controlador SDN?

Grandes fornecedores de dispositivos de rede, como HP<sup>5</sup>, Alcatel<sup>6</sup>, Juniper<sup>7</sup> e VMware<sup>8</sup> entraram forte no mercado de SDN fornecendo *switches* OpenFlow, controladores SDN ou soluções completas de SDN. O custo atrelado a uma migração de uma rede tradicional para uma rede SDN exige um investimento considerável (CAPEX - despesas de capital)

---

<sup>5</sup> <http://h17007.www1.hp.com/us/en/networking/solutions/technology/sdn/>

<sup>6</sup> <http://www.alcatel-lucent.com/solutions/software-defined-networking>

<sup>7</sup> <https://www.juniper.net/us/en/dm/sdn/>

<sup>8</sup> <http://www.vmware.com/software-defined-datacenter/networking-security>

devido à grande mudança realizada na rede. Incidindo sobre esse custo, do ponto de vista apenas do controlador SDN, podemos destacar duas categorias importantes: (1) *hardware* e (2) *software*.

Há diversas opções de software gratuitos para controladores SDN tais como NOX, POX, Floodlight e OpenDayLight, bem como soluções proprietárias como o controlador HP VAN SDN. O problema relacionado a controladores gratuitos é a falta de suporte e atualizações. Por outro lado, uma solução proprietária como a oferecida pela HP pode ter um custo adicional de até 5.999,00 dólares por um módulo<sup>9</sup>. Ou seja, à medida que aumenta o tamanho da rede, o custo também poderá subir. A HP recomenda ainda que os requisitos mínimos do sistema sejam: 8 GB de RAM; 64 GB de HD; adaptador de rede Ethernet Gigabit (custos de *hardware*). Dessa forma, o custo de um controlador SDN depende de sua capacidade e de quantos *switches* ele irá controlar.

O desempenho do controlador SDN depende da capacidade do *hardware* subjacente que está sendo utilizado. Assim, é razoável estimar que o controlador SDN custa alguns milhares de reais (custo de *hardware* e *software*). Como mencionado anteriormente, um controlador SDN é um ponto estratégico importante de controle na rede. Decidir onde alocar os controladores SDN, quais *switches* são controlados por cada controlador SDN (estimando sua capacidade) e quantos controladores são necessários são questões importantes a fim de minimizar o custo e melhorar o desempenho da rede.

Por fim, a disposição dos controladores SDN afeta o tempo de configuração de um fluxo entre o controlador e o *switch*. Portanto, devido a restrições de tempo de comunicação mínimo entre controlador e *switch*, em alguns casos, torna-se impossível cobrir toda a rede com um único controlador, mesmo que um controlador possua capacidade suficiente para controlar toda a rede.

#### **4. Modelo para minimização do custo de controladores SDN através do uso de Programação Linear (PL)**

A programação linear permite obter soluções ótimas, geralmente com um alto custo computacional, principalmente quando temos um problema NP-difícil com muitas variáveis envolvidas. Assim, é encontrada uma solução de cobertura da rede que determina quantos controladores são necessários, suas posições, capacidades e quais *switches* são atribuídos a cada controlador. Assim, o problema é modelado através de equações lineares cuja função objetivo é minimizar o custo de implantação de todos os controladores encontrando uma solução ótima para o problema.

Consideramos o número máximo de controladores a serem alocados igual ao número de *switches* na rede. Neste caso, na pior alocação possível, teríamos um controlador para cada *switch*. A solução proposta considera o delay entre controladores para a realização da alocação, mas a carga gerada pela comunicação entre controladores não é levada em consideração. A fim de mostrar os benefícios de considerar um controlador SDN com capacidade variável em vez de considerar todos os controladores SDN com a mesma capacidade, consideramos dois cenários: (1) controladores com custo e capacidade fixos e (2) controladores com custos e capacidade variáveis. Os nós da

---

<sup>9</sup>[https://marketplace.hpe.com/pdp?catId=18964&reqCatId=427972&catlevelmulti=18964\\_427972\\_1009931441\\_5272458&prodNum=JG489AAE&country=US&locale=en&resellers=PCM](https://marketplace.hpe.com/pdp?catId=18964&reqCatId=427972&catlevelmulti=18964_427972_1009931441_5272458&prodNum=JG489AAE&country=US&locale=en&resellers=PCM)

topologia da rede são tratados como um possível local que pode alocar um controlador SDN.

#### 4.1. Parâmetros e constantes

Em certas circunstâncias em um modelo linear é necessário expressar casos condicionais. Nessas situações é possível usar artifícios para que expressar através de equações lineares uma condição. Para isso, no modelo apresentado abaixo, foi utilizada uma constante que representa um número muito grande denominado  $M$ .

$M$  = um número significativamente grande

$N$  = quantidade de nós da rede (switches)

$S_i$  = taxa de fluxos gerados pelo switch  $i$  por unidade de tempo

$A$  = conjunto de arcos  $(i, j)$  entre nós da topologia

$D_{ij}$  = atraso em ms do enlace entre os nós  $(i, j)$

$K$  = tipos de controladores SDN (cada tipo possui uma capacidade e custo)

$F_k$  = custo de um controlador SDN do tipo  $k$

$C_k$  = capacidade do controlador do tipo  $k$  manipular fluxos

$\beta$  = restrição de atraso máximo (ms) entre um controlador e switch

$\delta$  = restrição de atraso máximo (ms) entre quaisquer controladores

#### 4.2. Variáveis de Decisão

As variáveis de decisão são ambas binárias:

$$x_{kj} = \begin{cases} 1, & \text{se um controlador do tipo } k \text{ é alocado na posição } j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se um nó (switch) } i \text{ é atribuído a um controlador na posição } j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

#### 4.3. Função Objetivo

A função objetivo apresentada abaixo visa minimizar o custo de alocação dos controladores SDN considerando diferentes capacidades para os controladores.

$$\text{Min} \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N x_{kj} F_k \quad (1)$$

#### 4.4. Restrições condicionais

A Equação (2) garante que cada *switch* seja associado a um controlador SDN.

$$\sum_{j=1}^N y_{ij} = 1, \quad \forall i \quad (2)$$

A Equação (3) garante que o número de controladores SDN alocados em  $j$  seja igual ou menor que um.

$$\sum_{k=1}^K x_{kj} \leq 1, \quad \forall j \quad (3)$$

Cada *switch*  $i$  gera um número de fluxos  $S_i$ . Desta forma, o controlador SDN deve suportar a soma de fluxos de todos os *switches* atribuídos a ele. A Equação (4) garante que essa restrição seja satisfeita.

$$\sum_{j=1}^N y_{ij} S_i \leq \sum_{k=1}^K x_{kj} C_k, \quad \forall j \quad (4)$$

Para garantir um atraso máximo entre um *switch*  $i$  e um controlador  $j$  temos a restrição abaixo:

$$y_{ij} D_{ij} \leq \beta, \quad \forall (i, j) \in A \quad (5)$$

A variável  $D_{ij}$  é uma matriz de atrasos entre todos os nós da topologia e é uma entrada do modelo. A Equação (6) garante um atraso máximo entre quaisquer dois controladores alocados em uma mesma topologia. Nesta restrição foi utilizada uma técnica de modelagem que possibilita expressar uma expressão condicional (SARKER, 2007) para caso exista um controlador de qualquer tipo em  $i$  e outro controlador em  $j$  a restrição de atraso seja satisfeita, caso contrário seja ignorada. Um alto atraso entre controladores pode resultar em um alto tempo para sincronização entre controladores, o que pode ser não aceitável em alguns cenários (LANGE et al., 2015).

$$\sum_{k=1}^K x_{kj} D_{ij} \leq \delta + \left(1 - \sum_{k=1}^K x_{ki}\right) M, \quad \forall (i, j) \in A \quad (6)$$

Para garantir valores válidos:

$$x_{kj} \in \{0,1\}, \quad \forall k, j \quad (7)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall i, j \quad (8)$$

## 5. Metodologia

Foram analisadas 112 topologias do Topology-Zoo (KNIGHT et al., 2011). Utilizando o modelo descrito na Seção 4 nós removemos anomalias em algumas topologias como, por exemplo, os nós sem nenhum enlace. Algumas das topologias disponíveis têm mais de uma versão, nós usamos somente as versões mais recentes para não mascarar os resultados.

Através da localização geográfica dos nós (latitude e longitude) foram estimados os atrasos entre os diferentes nós da topologia. As Equações de 9 e 10 foram usadas para calcular este atraso (JIN; JIN, 2009).

$$D = R * \arccos \left( \frac{\sin(a) \sin(c) + \cos(a) * \cos(c) * \cos(b - d)}{\cos(a) * \cos(c) * \cos(b - d)} \right) \quad (9)$$

$D$  é a distância em Km;  $R$  é igual a 6371 (raio médio da terra);  $(a, b)$  é a latitude e a longitude do *switch*  $i$  e  $(c, d)$  é a latitude e a longitude do *switch*  $j$ . Assim, o atraso é estimado através da seguinte equação (JIN; JIN, 2009):

$$RTT = P * D \quad (10)$$

Segundo JIN e JIN, através da análise do atraso entre diversos nós na Internet, foi estimada a variável  $P$ . Tais testes foram realizados utilizando a rede de pesquisa Planetlab<sup>10</sup>.  $P$  é uma métrica relacionada à condição de rede, segundo (JIN; JIN, 2009),  $P = 20$  us/km. Quando a latitude e longitude não estão disponíveis em alguns nós das topologias do Topology-zoo, assumimos que o atraso do enlace é de 15 ms. A matriz de caminho mais curta entre todos os nós é obtida usando a biblioteca JGraphT<sup>11</sup> e o algoritmo de Dijkstra. Esta matriz é usada para determinar o atraso mínimo entre cada controlador SDN e *switch*.

Os experimentos foram executados de acordo com as diferentes características e parâmetros apresentados na Tabela 1 e Tabela 2.

Tabela 1. Fatores e Níveis

Fatores	Unidade	Níveis	Valores
Restrição de atraso entre controlador e <i>switch</i>	ms	8	25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200
Topologia	-----	112	112 topologias do Topology-Zoo
Capacidade do controlador manipular fluxos	Fluxos	3	1M, 2M ou 4M (dependente do custo)
Custo	Boleano	2	Fixo ou variável
Custo por Controlador	Reais	3	R\$ 10.000, R\$ 15.000 ou R\$ 20.000

O custo de controlador SDN pode ser composto por vários atributos, como quantidade de memória, capacidade de CPU, licenças de software e requisitos de disponibilidade. Neste contexto, é possível afirmar que o desempenho do controlador está atrelado à combinação de *hardware* e software. O artigo “*On controller performance in software-defined networks*” (TOOTOONCHIAN et al., 2012), demonstra que diferentes softwares de controladores apresentam desempenhos diferentes sob o mesmo *hardware*. Consequentemente, para representar o custo de controlador, é utilizada uma única variável chamada de custo que sumariza tais características. Note que esse valor é uma entrada no modelo proposto e que, no futuro, pode ser realizado um estudo apenas sobre a estimativa do custo de um controlador envolvendo atributos de *hardware* e software específicos.

Tabela 2. Parâmetros

Parâmetro	Valor
Fluxos Gerados por <i>switch</i>	70K (flows)/s
Atraso nos enlaces	Definido pelas Equações (9) e (10)
Restrição de atraso entre controladores SDN	200ms

Além do custo, há o atributo capacidade. A capacidade do controlador é a quantidade de fluxos que um controlador pode manipular por segundo. Por conseguinte, o custo de um controlador é diretamente proporcional à capacidade com que o controlador pode lidar com fluxos oriundos dos *switches* que controla. SHAH et al, (2013) argumentam que um controlador SDN pode lidar com 1 a 4 milhões de fluxos por segundo, valor que foi considerado em nossos experimentos.

<sup>10</sup> [www.planet-lab.org](http://www.planet-lab.org)

<sup>11</sup> <https://github.com/jgraph/jgraph>

BENSON, AKELLA e MALTZ, (2010) argumentam que um conjunto de *switches* podem gerar mais que 10 milhões de fluxos por segundo e até 100 mil fluxos por segundo, no pior caso, dentro do data center analisado. KANDULA *et al.*, (2009) destacam dados que mostram que 1500 servidores podem gerar 100 mil fluxos por segundo. Baseado nesses dados, assumimos em nossos experimentos que cada *switch* gera em torno de 70 mil fluxos por segundo. Esse valor é utilizado para provisionar a capacidade do controlador.

Consideramos 70 mil como um valor intermediário baseado nos trabalhos citados anteriormente. Assim, assumimos que todos os *switches* nos experimentos realizados vão gerar 70 mil fluxos/segundo. Esse valor pode ser posteriormente ajustado no modelo. Além disso, foi assumida uma restrição máxima de 200ms entre todos os controladores da rede para que o tempo de sincronização entre os controladores não seja excessivamente alto (BARI *et al.*, 2013). Este valor foi definido pelos autores por ser considerado alto para uma rede de *backbone*, no entanto, pode ser facilmente modificado no modelo proposto.

A fim de executar todas as simulações, alguns passos são necessários: (1) leitura de todas as topologias do *Topology-Zoo*; (2) estimar o atraso entre nós baseado em suas posições geográficas; (3) selecionar as redes classificadas como redes de *backbone*; (4) definir parâmetros e níveis; (5) definir e executar o modelo linear no software CPLEX; (6) analisar a saída e gerar tabelas e gráficos. A entrada para o modelo inclui uma topologia de rede (infraestrutura de rede composta de nós e links) e os valores que definem as restrições, parâmetros e constantes (por exemplo: custo do controlador e atraso máximo permitido entre controladores e *switches*). A solução gerada define onde e qual tipo de controlador deve ser alocado, bem como o conjunto de *switches* atribuídos para cada controlador. O modelo de programação linear foi codificado em Java e processado pelo CPLEX versão 12.61.

Os experimentos foram realizados em uma máquina com as seguintes configurações: Intel® Core™ i7-4500U CPU @1.8GHz; 8GB RAM; 1TB HD e Sistema Operacional Windows 10 Professional 64bits. Aproximadamente 3.500 experimentos foram executados.

## **6. Avaliação e Discussão**

### **6.1. Como a restrição entre Switches e Controladores afeta o custo de alocação?**

Inicialmente consideramos um cenário com controladores de capacidade heterogênea e custo variável. Assim, pode-se alocar um controlador que pode lidar com 1, 2 ou 4 milhões de fluxos/segundo. O tipo de controlador a ser alocado está relacionado com a minimização do custo para cobrir a rede. A restrição de atraso entre o controlador e seus respectivos *switches* foi variada de 25ms a 200ms. Dessa forma, o objetivo do experimento é avaliar o impacto desta restrição no número de controladores necessários para cobrir a rede em relação ao custo.

Nesse cenário, a Figura 1 mostra uma variação maior do número de controladores necessários para cobrir uma rede quando a restrição de atraso entre *switches* e controlador varia entre 25ms e 75ms. Era esperado que uma restrição de atraso baixa exigiria um maior número de controladores para cobrir uma rede. O resultado mostra uma

estabilização deste número quando a restrição de atraso é superior a 75ms. Esse comportamento pode ser explicado devido ao baixo atraso nos enlaces das topologias analisadas. Observe que cada ponto na Figura 1 representa uma média das topologias com diferentes tamanhos (número de nós). As barras indicam o número de controladores, e a linha representa o custo de alocação com base no número de controladores e tipo. Um intervalo de 95% de confiança é calculado e exibido na figura.

Com base na Figura 1, uma importante questão que pode surgir é: quais são as capacidades de cada controlador alocado? Algumas topologias possuem enlaces com um elevado atraso entre nós. Consequentemente, uma restrição de atraso rígida exige mais controladores SDN. Da mesma forma, topologias compostas por muitos nós que possuem um baixo atraso entre si podem demandar um alto número de controladores devido à impossibilidade de um único controlador lidar com todos os fluxos de *switches* que excedem sua capacidade. Assim, a Figura 2 retrata a porcentagem de controladores SDN alocados agrupados por sua capacidade.

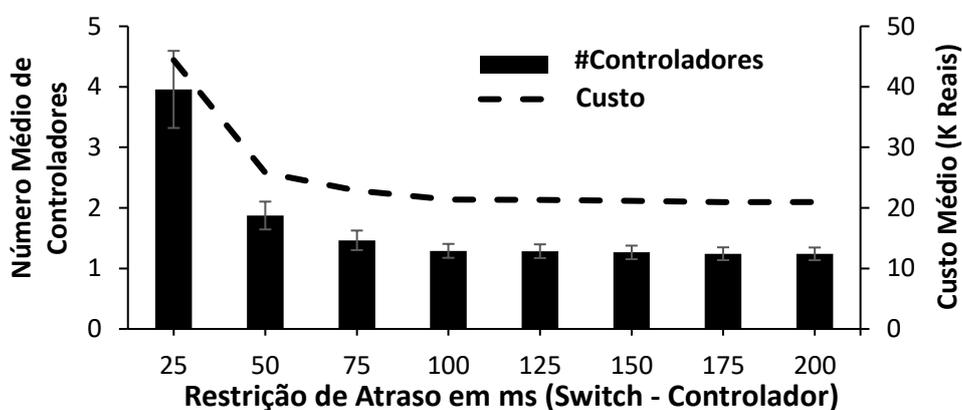


Figura 1. Média da quantidade de controladores e média do custo de alocação

Quando a restrição de atraso é menos rígida, é possível cobrir mais *switches* com um único controlador mais robusto (mais caro) ao mesmo tempo que são respeitadas todas as restrições de atraso. Desta forma, podemos observar na Figura 1 e Figura 2 que quando a restrição de atraso é superior a 100ms o número de controladores alocados, o tipo dos controladores, e custo são próximos independentemente da restrição de atraso.

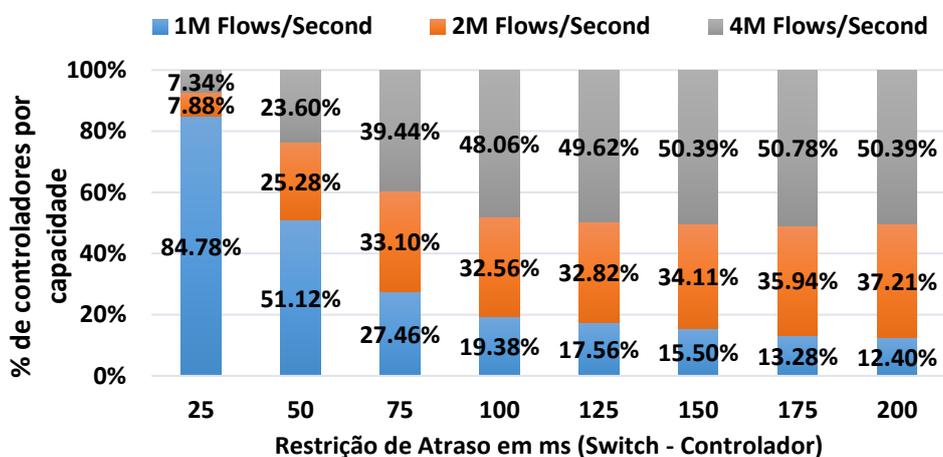


Figura 2. Proporção de controladores alocados por capacidade

## 6.2. Qual é a correlação entre o atraso médio dos enlaces e o custo?

Outra questão que surge no contexto do problema de alocação de controladores SDN é como o atraso entre nós afeta o custo de alocação. Assim, o coeficiente de correlação de Pearson foi calculado para avaliar a relação entre o atraso médio de todos os enlaces que compõem uma topologia e o custo de alocação. Podemos observar uma correlação negativa entre as duas variáveis analisadas para todos os casos avaliados. A Tabela 3 mostra todos os resultados. O coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) varia entre 0,09 e 0,6 quando as restrições de atraso variam entre 25ms e 200ms. Sendo  $p$  o  $p$ -value e  $N$  o número de topologias com solução dado a restrição de atraso.

Tabela 3. Correlação entre custo e atraso médio dos enlaces

	Restrição de Atraso entre Controlador e Switch							
	25ms	50ms	75ms	100ms	125ms	150ms	175ms	200ms
$r$	0,600	0,408	0,207	0,039	0,014	0,045	0,120	0,090
$p$	<0,001	<0,001	0,041	0,696	0,886	0,652	0,220	0,361
$N$	93	95	97	100	102	102	103	104

A correlação tende a ser mais alta quando a restrição de atraso é baixa devido à dificuldade em encontrar uma solução viável neste cenário. Por exemplo, quando a restrição de atraso for igual a 25ms, um controlador pode cobrir uma área muito restrita em uma rede. Por conseguinte, para cobrir a rede, será necessário adicionar mais de dois controladores que implica um maior custo de implantação. É importante destacar que algumas topologias não têm uma solução válida, considerando a restrição de atraso entre o *switch* e controlador e a restrição de atraso entre os próprios controladores. Assim, é possível cobrir a rede com um conjunto de controladores SDN, mas o atraso entre esses controladores é superior a 200ms. Portanto, o número de soluções encontradas também varia quando a restrição de atraso entre o controlador e o *switch* são mais restritivas, por exemplo, no caso da restrição de 25ms.

## 6.3. Qual a correlação entre o tamanho das topologias e o custo?

O coeficiente de correlação de Pearson foi calculado para avaliar a relação entre o número de nós em uma topologia e o custo para cobrir essa topologia com controladores SDN. Em alguns casos, um controlador SDN pode controlar muitos *switches*, desde que respeite a restrição de atraso máximo para um *switch*. No entanto, este controlador pode ser sobrecarregado devido ao número elevado de *switches* atribuído a ele. Dessa forma, existem duas soluções: (1) adicionar outro controlador, ou (2) aumentar a capacidade do controlador. Em ambos os casos, isso implica um custo adicional.

Observando todos os cenários na Tabela 4 percebe-se uma correlação positiva entre as duas variáveis analisadas quando a restrição de atraso é superior a 75ms. O coeficiente de correlação varia entre 0,388 e 0,972 quando a restrição de atraso varia entre 25ms e 200ms. Note que para restrições de atraso inferior a 75ms, mais controladores são necessários para cobrir a rede e possuem menor capacidade do que cenários com restrição de atraso superior a 75ms (Figura 2).

Como mencionado anteriormente, o objetivo é minimizar o custo de cobertura da rede. Desta forma, uma restrição de atraso menos restritiva entre os *switches* e controlador tende a ter uma correlação positiva por oferecer liberdade de alocar controladores de acordo com a demanda de *switches* da topologia.

Tabela 4. Correlação entre custo e tamanho da topologia

	Restrição de Atraso entre Controlador e Switch							
	25ms	50ms	75ms	100ms	125ms	150ms	175ms	200ms
r	0,388	0,687	0,810	0,907	0,952	0,958	0,972	0,971
p	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
N	93	95	97	100	102	102	103	104

#### 6.4. Considerar que controladores SDN têm sempre a mesma capacidade tem algum efeito no custo?

Outra questão a examinar é se é possível reduzir o custo de cobertura de rede, considerando controladores SDN heterogêneos ou considerando uma capacidade única para todos os controladores SDN. Partimos da hipótese que considerar controladores heterogêneos torna possível obter um melhor provisionamento em comparação com um cenário onde todos os controladores SDN têm a mesma capacidade. Para testar se a hipótese é verdadeira e mensurar a diferença de custo entre ambas as abordagens executamos simulações com preços e capacidades fixos para os controladores comparando com um cenário onde a capacidade e custo são variáveis. A Figura 3 mostra que um cenário que considera controladores heterogêneos com uma restrição de atraso restritiva atinge uma redução de custo de mais de 40% quando comparado a um cenário com capacidade fixa do controlador.

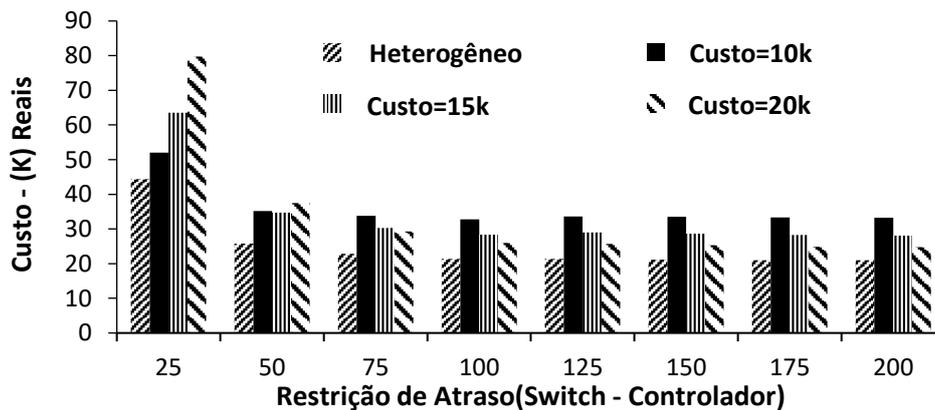


Figura 3. Custo médio de alocação de controladores SDN

Em qualquer caso avaliado, considerar a capacidade de controlador heterogênea produz uma solução menos custosa devido à flexibilidade para atribuir um controlador adequado de acordo com a demanda de uma determinada região na rede.

Nesse mesmo cenário, um controlador mais caro tem capacidade mais elevada do que um controlador mais barato. O custo para o controlador que pode lidar com 1M, 2M e 4M de fluxos/segundo são R\$10.000,00 R\$15.000,00 e R\$20.000,00, respectivamente. A Figura 3 indica que um controlador mais robusto (mais caro) pode ser uma alternativa econômica em comparação a cenários em que as capacidades dos controladores são as mesmas. Por outro lado, dependendo da restrição de atraso entre controlador e *switch* é mais apropriado ter um controlador menos robusto e, conseqüentemente mais barato, em uma topologia com alto atraso entre os nós da rede. Vemos na Figura 3 que para a restrição de 25ms o controlador com custo fixo de R\$ 10 mil é o que mais se aproxima da solução heterogênea, mas isso não é verdade quando consideramos restrições maiores que 25ms. Considerando uma restrição de atraso pequena, um controlador SDN mais robusto será

subutilizado devido ao pequeno número de *switches* que fazem parte de seu domínio. Por outro lado, alocar diversos controladores para cobrir toda a rede pode ser mais caro do que a atribuição de um único controlador com maior capacidade. Podemos ver como a restrição entre controlador e *switch* afeta a quantidade de controladores alocados na Figura 4.

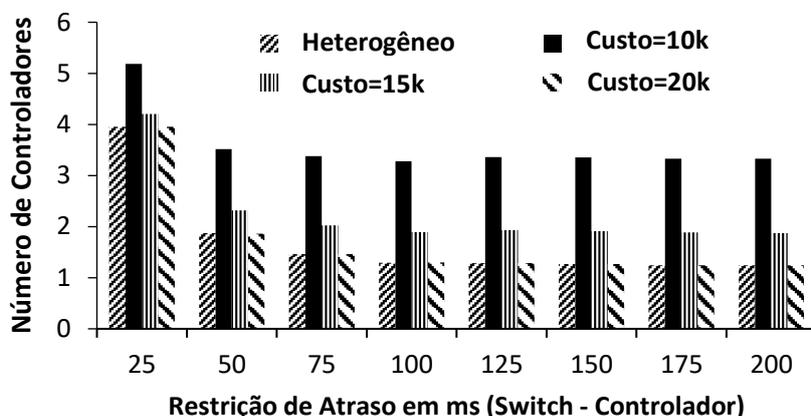


Figura 4. Quantidade de Controladores alocados

Corroborando o que foi dito anteriormente, na Figura 4 vemos que um controlador com menor capacidade e custo (R\$ 10 mil) demanda uma maior quantidade média de controladores em todos os casos, mas nem sempre possui o maior custo (Figura 3).

## 7. Conclusão

Apresentamos uma solução para o problema de alocação de controladores SDN (problema NP-Difícil) onde o objetivo é minimizar o custo financeiro de alocação de controladores SDN com diferentes capacidades. Analisamos a abordagem proposta em 112 topologias reais, investigando quais características das topologias afetam o custo final de alocação.

Nossos resultados mostram que é possível reduzir em 40% o custo de alocação de controladores SDN quando comparamos cenários que consideram controladores com capacidade fixa e heterogênea. O coeficiente de correlação de Pearson foi calculado para avaliar a correlação entre o custo de alocação e média de atraso dos enlaces das topologias e a correlação entre custo e o tamanho das topologias. Os resultados mostram uma correlação positiva apenas para a análise entre custo e tamanho da topologia. Além disso, os resultados mostram que há um total de 2,8% de casos sem solução devido à restrição de atraso entre controladores que impossibilita a existência de uma solução válida em redes que possuem uma restrição próxima ao valor do atraso da comunicação entre os nós da topologia. Por fim, os resultados indicam que dependendo da restrição de atraso entre controlador e *switch*, em geral, a média tende entre 2 a 3 controladores necessários para cobrir toda a rede.

O modelo proposto<sup>12</sup> pode ainda ser estendido para considerar novas restrições ou apenas ter alguns parâmetros modificados para se adequar a outros cenários. Sendo possível atender diferentes demandas. Por fim, como trabalho futuro pretende-se atacar o problema inteiro através do uso de uma meta-heurística.

<sup>12</sup> Código disponível em: <https://github.com/marceloanderson88/SDN-CPP-MinCost>

## Referências

- BARI, M. F. et al. Dynamic Controller Provisioning in Software Defined Networks. Proceedings of the 9th International Conference on Network and Service Management (CNSM 2013).
- BENSON, T.; AKELLA, A.; MALTZ, D. A. Network traffic characteristics of data centers in the wild. Proceedings of the 10th annual conference on Internet measurement - IMC '10. New York, USA: ACM Press, 1 nov. 2010.
- ESTEVES, R. P.; GRANVILLE, L. Z.; BOUTABA, R. On the management of virtual networks. IEEE Communications Magazine, v. 51, n. 7, p. 80–88, 1 jul. 2013.
- FARAHANI, R. Z. et al. Covering problems in facility location: A review. Computers & Industrial Engineering, v. 62, n. 1, p. 368–407, fev. 2012.
- HAIDER, A.; POTTER, R.; NAKAO, A. Challenges in Resource Allocation in Network Virtualization. In: 20th ITC Specialist Seminar. 2009.
- HELLER, B.; SHERWOOD, R.; MCKEOWN, N. The controller placement problem. In: Proceedings of the first workshop on Hot topics in software defined networks. ACM, 2012.
- HOCK, D. et al. POCO-framework for Pareto-optimal resilient controller placement in SDN-based core networks. IEEE/IFIP NOMS 2014 - IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium: Management in a Software Defined World, 2014.
- ISHTAIQUE, T.; JOURJON, G.; GRAMOLI, V. Revisiting the Controller Placement Problem. In: Local Computer Networks (LCN), 2015 IEEE 40th Conference on. IEEE, 2015. p. 450-453.
- JIN, T.; JIN, H. Network Delay Model for Overlay Network Application. International Journal of Communications, Network and System Sciences, v. 2, n. 5, p. 400–406, 21 ago. 2009.
- KANDULA, S. et al. The Nature of Datacenter Traffic : Measurements & Analysis. In: Proceedings of the 9th ACM SIGCOMM conference on Internet measurement conference. ACM, 2009. p. 202-208.
- KNIGHT, S. et al. The internet topology zoo. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, v. 29, n. 9, p. 1765–1775, 2011.
- LANGHE, S. et al. Heuristic Approaches to the Controller Placement Problem in Large Scale SDN Networks. IEEE Transactions on Network and Service Management, v. 12, n. 1, p. 4–17, 1 mar. 2015.
- MCKEOWN, N. et al. OpenFlow: Enabling Innovation in Campus Networks. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, v. 38, n. 2, p. 69–74, 2008.
- SARKER, R. A., & Newton, C. S. Optimization modelling: a practical approach. CRC Press. 2007, p. 132.
- SHAH, S. A. et al. An architectural evaluation of SDN controllers. IEEE International Conference on Communications (ICC), 2013.
- TOOTOONCHIAN, A. et al. On controller performance in software-defined networks. Proceeding Hot-ICE'12 Proceedings of the 2nd USENIX conference on Hot Topics in Management of Internet, Cloud, and Enterprise Networks and Services, p. 10–10, 2012.
- WANG, T. et al. Dynamic SDN controller assignment in data center networks: Stable matching with transfers. IEEE INFOCOM 2016 - The 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications, 2016
- XIAO, P. et al. The SDN controller placement problem for WAN. 2014 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC), 2014.