

Caracterizando Estratégias de Domínio Espacial para Gerenciamento de Regras em Redes Definidas por Software

Gustavo de Araújo¹, Marcelo Marotta¹, Juliano Wickboldt¹,
Cristiano Both², Luciano Gasparly¹, Juergen Rochol¹, Lisandro Granville¹

¹Instituto de Informática – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

²Departamento de Matemática Aplicada e Ciências Sociais
Universidade Federal das Ciências da Saúde de Porto Alegre

{gustavo.araujo, mamarotta, jwickboldt}@inf.ufrgs.br

cbboth@ufcspa.edu.br, {paschoal, juergen, granville}@inf.ufrgs.br

Abstract. *Software-Defined Networks (SDN) based on Openflow protocol perform data forwarding through flow tables using match/action mechanisms. These tables have limited rules storage capacity, restricting network scalability and performance. Considering these restrictions, the main strategies for managing spatial domain rules, i.e., flow aggregation and multiple flow tables, are promising to use the available storage space of the tables. These strategies impact packet processing in different ways, influencing the performance of the forwarding devices and the network. In spite of the impact, the comparison between flow aggregation and multiple flow tables is poorly exploited, leaving open the definition of which strategy is more appropriate for a network considering its topology and workload. In this article a quantitative characterization is proposed, defining the gains brought by these spatial domain strategies for forwarding devices and in different topologies.*

Resumo. *As Redes Definidas por Software (SDN) baseadas no protocolo Openflow realizam o encaminhamento de dados por meio de tabelas de fluxos utilizando mecanismos de match/action. Tais tabelas possuem uma capacidade de armazenamento de regras limitada, restringindo a escalabilidade e o desempenho da rede. Considerando essas restrições, as principais estratégias de gerenciamento de regras de domínio espacial, i.e., agregação de regras e múltiplas tabelas, mostram-se promissoras na utilização do espaço de armazenamento disponível das tabelas. Essas estratégias impactam de diferentes maneiras no processamento dos pacotes influenciando o desempenho dos dispositivos de encaminhamento e, de forma mais geral, da rede. Apesar do impacto gerado, a comparação entre as estratégias de agregação de fluxos e múltiplas tabelas é fracamente explorada, deixando em aberto a definição de qual estratégia é mais adequada para uma rede, considerando sua topologia e carga de trabalho. Neste artigo realiza-se uma caracterização quantitativa definindo os ganhos trazidos por essas estratégias de domínio espacial para dispositivos de encaminhamento e em diferentes topologias.*

1. Introdução

Os conceitos inerentes às Redes Definidas por Software (SDN) mostram-se fundamentais na evolução das redes de computadores e continuam sendo investigados tanto pela indústria quanto pela academia [Wickboldt et al. 2015]. Entre os principais conceitos destacam-se: o encaminhamento de tráfego baseado em fluxos e a abstração da lógica de controle para uma entidade em software, chamada controlador. Através desses conceitos, um dispositivo de encaminhamento torna-se capaz de desempenhar diferentes funções, por exemplo, controlar o acesso a um servidor de aplicação ou balancear carga entre diferentes enlaces [Kreutz et al. 2015]. As funções de rede desempenhadas pelos dispositivos são definidas a partir de regras de encaminhamento que são armazenadas em tabelas de fluxos. Tais tabelas possuem uma capacidade de armazenamento de regras limitada, a qual é várias ordens de grandeza menor que o necessário para a operação de determinados tipos de rede como, por exemplo, *backbones* e redes de *datacenters* [Nguyen et al. 2016]. Portanto, o adequado gerenciamento de regras se torna um requisito para a escalabilidade das redes SDN.

Levando em consideração a escalabilidade das redes SDN, estratégias para gerenciamento de regras de encaminhamento foram propostas na literatura. Tais estratégias podem ser classificadas em dois grupos: (i) domínio temporal e (ii) domínio espacial. As estratégias de domínio temporal objetivam a deleção de regras da tabela de fluxos a partir de uma determinada política (*e.g.*, *Least Recently Used* e *timeouts* dinâmicos e estáticos) [Neves et al. 2016]. Para compor o estado dos fluxos e realizar a deleção, o controlador precisa consultar os dispositivos de encaminhamento de tempos em tempos (*polling*), a fim de obter em tempo real, as informações de utilização de cada fluxo (*e.g.*, duração e número de pacotes recebidos). Esse *polling* insere uma sobrecarga significativa no tráfego do canal de controle, no processamento do controlador e nos dispositivos de encaminhamento. A sobrecarga gerada torna as estratégias de domínio temporal não escaláveis, mesmo para pequenas redes de *datacenters* [Vishnoi et al. 2014].

As estratégias de domínio espacial, por sua vez, objetivam a representação da maior quantidade de fluxos com o menor número de regras de encaminhamento na rede. Esta representação é processada pelo controlador considerando diferentes abordagens de gerenciamento, das quais destacam-se, (a) agregação de fluxos e (b) múltiplas tabelas. O gerenciamento por agregação de fluxos permite a representação de dois ou mais fluxos utilizando uma única regra, sem alterar a semântica de encaminhamento [Kamiyama et al. 2014]. Já, o gerenciamento por múltiplas tabelas permite que um grupo de fluxos tenha sua semântica dividida, sendo representada em poucas regras pertencentes a duas ou mais tabelas de acordo com as políticas empregadas (*e.g.*, uma tabela para encaminhamento de portas e outra para controle de acesso) [ONF 2015]. As estratégias de domínio espacial, mostram-se promissoras na utilização do espaço de armazenamento disponível nas tabelas de fluxos dos dispositivos de encaminhamento, pois necessitam de um monitoramento menor ou, em alguns casos, nenhum, quando comparadas as estratégias de domínio temporal.

O gerenciamento por agregação e múltiplas tabelas possuem seus próprios *modus operandi*, impactando no desempenho de cada dispositivo de encaminhamento e, de forma geral, da rede. Esse impacto pode ser mensurado a partir das métricas de desempenho, como o número de regras de encaminhamento, a quantidade de intervenções do controla-

dor, a latência e o *jitter* da rede. Entretanto, existem questionamentos sobre o impacto no emprego de cada uma dessas formas de gerenciamento, o que agrava-se para redes com diferentes topologias, cargas de trabalho e políticas empregadas. Por exemplo, gerenciamento por agregação de fluxos precisa adicionar e remover regras com maior frequência comparada ao gerenciamento por múltiplas tabelas, aumentando latência e *jitter*. Já, o gerenciamento por múltiplas tabelas precisa percorrer um número maior de tabelas na definição da ação a ser tomada comparada ao gerenciamento por agregação, também incorrendo latência ou *jitter*. Como pode ser visto, ambas as formas de gerenciamento apresentam impactos diferentes para as mesmas métricas. Logo, uma comparação entre gerenciamento por agregação e por múltiplas tabelas torna-se fundamental na definição de qual delas é a mais adequada para ser empregada em uma rede. No melhor conhecimento, não existe um trabalho comparativo que investigue ambas as formas de gerenciamento espacial, permanecendo uma questão de pesquisa em aberto.

Neste artigo é proposto uma comparação quantitativa entre os gerenciamentos por agregação e múltiplas tabelas em três diferentes topologias de rede. Primeiramente, busca-se analisar cada dispositivo individualmente, verificando a redução na quantidade de regras que cada forma de gerenciamento de domínio espacial obtêm. Em seguida, é analisada a quantidade de intervenções que o controlador realiza para cada forma de gerenciamento. Para uma comparação completa das formas de gerenciamento, utiliza-se como linha base a operação padrão para encaminhamento de camada 2 em SDN baseada em OpenFlow. Além disso, para avaliar a influência que o gerenciamento traz para diferentes redes, utilizou-se um ambiente de redes de topologia variadas: único salto, anel e árvore. Os resultados mostram que um gerenciamento por agregação de fluxos pode reduzir drasticamente (aproximadamente 95%) a quantidade regras de encaminhamento independente da topologia de rede. Entretanto, a quantidade de intervenções com o controlador mantém-se extremamente alta (acima de 370%), bem como o *jitter*, onde o mesmo apresenta um valor duas vezes superior a linha base, para uma topologia de anel. O gerenciamento por múltiplas tabelas possui o melhor custo-benefício, levando-se em consideração a quantidade de regras instaladas e a quantidade de intervenções necessárias do controlador, apresentando baixa latência e *jitter*, em qualquer topologia de rede.

O restante do artigo está organizado da seguinte maneira. A Seção 2 discute os trabalhos relacionados. A Seção 3 explora e exemplifica as estratégias de gerência de domínio espacial. A Seção 4, apresenta os resultados obtidos. Finalmente, a Seção 5 expõe as principais conclusões do estudo e perspectivas de trabalhos futuros.

2. Background e Trabalhos Relacionados

A limitada capacidade de armazenamento dos dispositivos de encaminhamento das SDNs motivou o avanço na área de gerenciamento de regras das tabelas de fluxos. Nessa área, destacam-se as diferentes formas de gerenciamento sendo classificadas em dois grupos: aquelas pertencentes ao domínio temporal e espacial. Desta forma, na Subseção 2.1, descreve-se o gerenciamento de domínio temporal e suas limitações. Já, na Subseção 2.2, as diferentes formas de se utilizar o gerenciamento de domínio espacial são apresentadas.

2.1. Gerenciamento de Domínio Temporal

O gerenciamento de domínio temporal consiste em remover uma regra da tabela de fluxos, após um determinado período de tempo. Essa remoção de regras pode ser realizada

por algoritmos como *Least Recently Used* (LRU), *First In First Out* (FIFO) ou remoção randômica. A escolha do algoritmo de remoção é determinante para o desempenho da rede [Lee et al. 2013]. Por exemplo, a utilização de um algoritmo FIFO removerá as regras que foram instaladas a mais tempo na tabela de fluxos. Esta remoção pode ser realizada de maneira pro-ativa, com o próprio dispositivo de encaminhamento removendo as regras, depois de um período determinado de tempo (*hard timeout*), ou de um período de inatividade do fluxo (*idle timeout*). Entretanto, os fluxos possuem durações variadas que podem tanto ser instantâneas ou maiores que o *hard timeout*, levando a remoção tardia ou indevida das regras. Essas remoções implicam na utilização ineficiente da capacidade disponível de armazenamento [Benson et al. 2010].

Um estudo caracteriza e compara diferentes propostas de gerenciamento de regras de domínio temporal [Neves et al. 2016]. Nessa comparação, as formas de gerenciamento temporal, *i.e.*, *idle timeouts* incrementais adaptativos, remoção probabilística de regras, *hard timeouts* adaptativos, apresentaram, no melhor dos casos, uma utilização da capacidade de armazenamento de regras 15% maior que o caso ótimo e degradando-se (aumentando) gradualmente para os demais casos. Adicionalmente, foi constatado que pequenas mudanças nas características do tráfego (*e.g.*, tempo de duração dos fluxos) afetam consideravelmente o desempenho do gerenciamento de domínio temporal. Em síntese, o gerenciamento de domínio temporal mostra-se não escalável às diferentes redes e resiliente às mudanças nas características das mesmas. Nas redes onde o gerenciamento de domínio temporal mostra-se inadequado, o gerenciamento de domínio espacial pode ser uma potencial solução, sendo o tema deste trabalho e da próxima subseção.

2.2. Gerenciamento de Domínio Espacial

As formas de gerenciamento de domínio espacial podem ser classificadas em dois grupos: (i) *inter-switch* e (ii) *intra-switch*. No primeiro grupo, o gerenciamento é considerado *inter-switch*, pois as regras são gerenciadas considerando o encaminhamento e a semântica dos fluxos dentro de um conjunto de dispositivos da rede. No segundo grupo, o gerenciamento é considerado *intra-switch*, pois as regras são gerenciadas considerando apenas um dispositivo de encaminhamento e os fluxos que passam por ele.

O gerenciamento *inter-switch*, também denominado como posicionamento de regras, consiste em dividir um conjunto de regras de encaminhamento e distribuí-los entre os dispositivos da rede. Esse tipo de gerenciamento espacial é normalmente modelado como um problema de otimização que deve decidir quais regras devem ser instaladas em cada dispositivo. A função objetivo de otimização depende da aplicação que pretende-se implementar, por exemplo, minimizar a quantidade total de regras instaladas na rede [Kanizo et al. 2013] ou minimizar a energia consumida [Giroire et al. 2014]. Esse gerenciamento pode ocasionar duplicação de regras e sobrecarga no processamento para execução do algoritmo de otimização [Nguyen et al. 2016]. Além disso, este gerenciamento precisa de um monitoramento de fluxos frequente, levando aos mesmos contrapontos do domínio temporal. Assim, o gerenciamento *inter-switch* não é foco deste trabalho.

As principais formas de gerenciamento de domínio espacial *intra-switch* são: (i) agregação de fluxos e (ii) múltiplas tabelas. Na primeira, o gerenciamento por agregação de fluxos opera a partir da identificação das regras que possuem a mesma ação (*e.g.*, encaminhar pacote para uma determinada porta). Em seguida, identifica-se os campos de correspondência (*match*) das regras que possuem similaridades (*e.g.*, IPs de origem que

pertencem a mesma subrede), para serem agregadas sob uma nova regra única (*e.g.*, todos os IPs origem de uma subrede serão encaminhados para uma mesma porta). Desta forma, uma regra pode representar diversos fluxos, reduzindo, assim, a quantidade de regras da tabela. Agregação de fluxos é uma estratégia tradicional para reduzir a quantidade de regras em tabelas de roteamento das atuais redes IP e motivado pelo bom desempenho obtido, veem sendo aplicada em redes SDN/Openflow [Nguyen et al. 2016].

Na segunda forma, o gerenciamento por múltiplas tabelas opera a partir da identificação da semântica de um fluxo (*e.g.*, fluxo com destino a uma interface virtual a ser encaminhado por uma determinada porta), processando sua divisão para duas ou mais regras. A partir dessa divisão, uma nova regra é criada com uma semântica simplificada e armazenada em uma tabela que a represente. Dessa forma, novos fluxos com semânticas compostas são representados por regras já instaladas com semânticas mais simples, utilizando um número menor de regras armazenadas no dispositivo. Gerenciamento por múltiplas tabelas é previsto desde a versão 1.1 do protocolo OpenFlow, sendo a atual forma de gerenciamento incentivada pela *Open Network Foundation* (ONF) [ONF 2015]. Sua utilização adiciona mais complexidade ao processo de busca na tabela de fluxos (*lookup*) para dispositivos OpenFlow que implementam tabelas de fluxos em hardware. Gerenciamento por múltiplas tabelas é pouco explorada pela literatura, embora apresente grande potencial para reduzir a quantidade de regras utilizadas.

As diferentes formas de gerenciamento espacial *intra-switch*, mostram-se promissoras, por não possuírem a necessidade de um frequente monitoramento do estado atual das tabelas de fluxos. Entretanto, a comparação entre essas formas de gerenciamento é fracamente explorada na literatura, impossibilitando a definição de qual forma de gerenciamento *intra-switch* é a mais adequada para uma determinada rede. Na próxima seção, explora-se como cada uma das formas de gerenciamento de domínio espacial *intra-switch* podem ser aplicadas, para posteriormente serem comparadas em uma rede OpenFlow.

3. Explorando as estratégias de domínio espacial

As formas de gerenciamento de domínio espacial *intra-switch* podem ser comparadas quando aplicadas a uma rede baseada em OpenFlow, onde políticas definem a semântica do encaminhamento de fluxos para a correta operação de uma aplicação de rede. Dessa forma, utiliza-se como exemplo, a implementação de políticas de controle de acesso a servidores de aplicação.

Regras de controle de acesso definem quais fluxos são autorizados a acessar determinados serviços ou nodos da rede. Essas regras são implementadas associando endereços IP aos serviços disponíveis. Idealmente, todas as regras que implementam controle de acesso devem estar presentes no último salto antes do serviço que pretende-se acessar. Desta maneira, evita-se o processamento de regras desnecessárias em dispositivos que possuem a função exclusiva de encaminhamento de pacotes. Entretanto, com a limitação de memória existente em dispositivos de encaminhamento baseado em OpenFlow, posicionar todas as regras em um único dispositivo é impraticável para redes com muitos usuários [Nguyen et al. 2016]. Além disso, conforme a quantidade de regras na tabela de fluxos aumenta, mais processamento é exigido por parte do dispositivo de encaminhamento para realizar o *lookup*. Esse processamento afeta negativamente o desempenho da rede fazendo com que a latência e o *jitter* aumentem. Portanto, o gerenciamento de regras, principalmente, de domínio espacial *intra-switch* torna-se uma exigência.

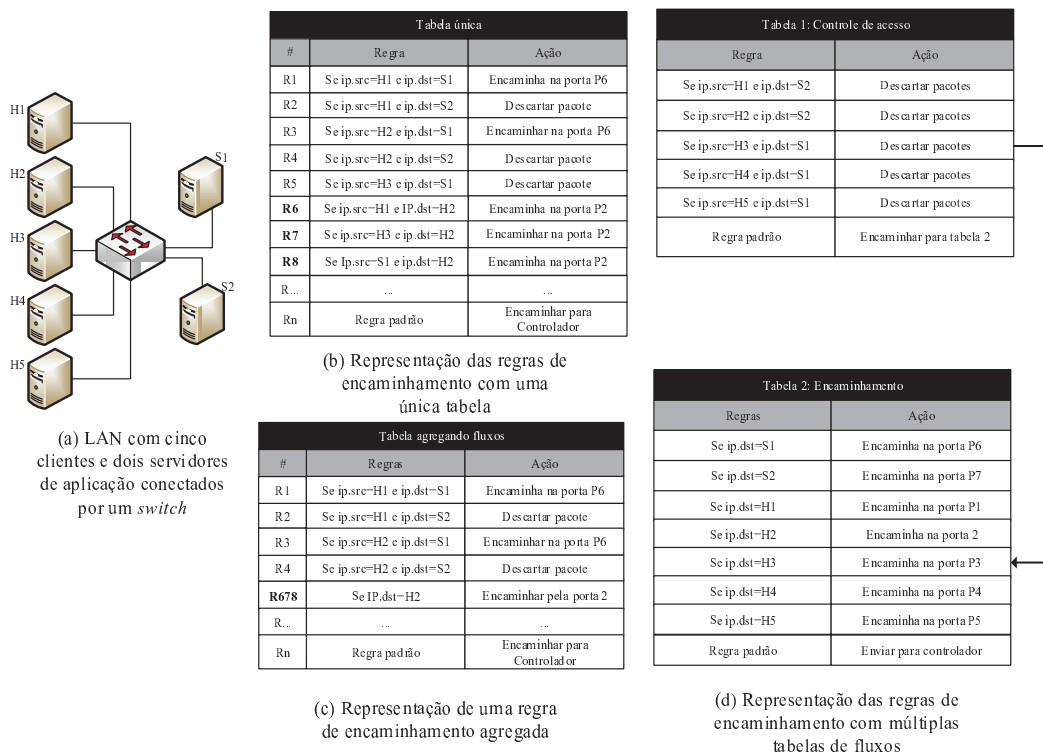


Figura 1. Exemplo de regras de encaminhamento

Para exemplificação, apresenta-se o cenário na Figura 1(a), uma pequena LAN com um único dispositivo de encaminhamento conectando cinco clientes (H1, H2, H3, H4 e H5) a dois servidores de aplicação (S1 e S2). O dispositivo de encaminhamento possui as funções de: (i) realizar o controle de acesso aos servidores e (ii) encaminhar os pacotes entre os nodos da rede. Em termos de controle de acesso, o dispositivo de encaminhamento autoriza ou rejeita os fluxos dentro da rede de acordo com as seguintes políticas: (a) os clientes H1 e H2 têm acesso apenas ao servidor S1, (b) os clientes H3 e H4 têm acesso apenas ao servidor S2, (c) o cliente H5 possui acesso a ambos os servidores e, finalmente, (d) os clientes possuem acesso um ao outro. Em termos de encaminhamento, cada um dos fluxos identificados pode ser redirecionado para uma das portas, onde um determinado nodo final se encontra (i.e., H1:P1, H2:P2, H3:P3 ... S1:P6, S2:P7).

A Figura 1(b) apresenta uma tabela de fluxos com regras de encaminhamento compostas por dois campos de cabeçalho para realizar o processo de *lookup*: IP origem e IP destino. As ações que podem ser associadas a cada regra são: descartar pacotes caso um fluxo não pertença a lista de clientes autorizados ou encaminhar os pacotes dos fluxos para o destino, caso seja permitido. Para implementar o controle de acesso em apenas uma única tabela de fluxos, é necessária uma quantidade de regras que representem todas as combinações possíveis para a comunicação entre clientes e clientes e servidores de aplicação. Portanto, a quantidade de regras necessárias é de $O(n^2)$, sendo n a quantidade total de nodos na rede. Essa quantidade de regras pode ser maior que a capacidade de boa parte dos dispositivos de encaminhamento disponíveis no mercado [Costa et al. 2016].

A Figura 1(c) ilustra um exemplo de como pode ser realizada o gerenciamento por

agregação de fluxos. Nessa forma de gerenciamento, pretende-se mesclar duas ou mais regras de encaminhamento, a fim de representar vários fluxos em uma única regra. Por exemplo: H1, H3 e S1 desejam comunicar-se com H2. Nesse gerenciamento, as regras R6, R7 e R8 que possuem o mesmo destino e a mesma ação associada são mescladas em uma única regra. Assim, com uma única regra é possível representar três fluxos agregados. O gerenciamento por agregação pode reduzir drasticamente a quantidade de regras necessárias para representar fluxos em uma tabela OpenFlow. Por outro lado, esse gerenciamento mescla os fluxos impossibilitando que os mesmos sejam monitorados individualmente de uma forma precisa [Nguyen et al. 2015]. Outro aspecto a ser considerado é a carga de trabalho adicional que um algoritmo de agregação insere no processamento do controlador. Para agregar as regras de encaminhamento, o controlador deve ler o estado atual da tabela de fluxos do dispositivo, realizar a agregação e substituir o conjunto de regras originais pelo conjunto de regras agregadas. Esse processamento pode ocasionar perdas de pacotes, *loops* de encaminhamento e atrasos na rede [Luo et al. 2014].

Na Figura 1(d) pode-se observar o gerenciamento das regras por múltiplas tabelas de fluxos. Nessa forma de gerenciamento, subdivide-se uma tabela de fluxos em duas ou mais tabelas. Cada uma dessas sub-tabelas agrupa um conjunto de regras pertencentes a uma semântica, normalmente, determinada por uma política. A distribuição de regras e sequência pela qual os pacotes são analisados depende da aplicação que se pretende implementar. Seguindo o exemplo de controle de acesso do cenário apresentado, a primeira tabela armazena as regras referentes ao controle de acesso aos servidores. Essas regras são implementadas na forma de uma lista negra, *i.e.*, caso o fluxo pertença a lista, seus pacotes são descartados. Caso contrário, a tabela possui uma regra padrão que é aplicada aos pacotes que não encontrarem nenhuma entrada na lista correspondente. Nesse exemplo, a regra padrão é encaminhar os pacotes para a próxima tabela que armazena as regras de encaminhamento. Nessa segunda tabela, os pacotes pertencentes a cada um dos fluxos são encaminhados para portas de destino do dispositivo de encaminhamento.

As formas de gerenciamento de domínio espacial *intra-switch* propõem diferentes maneiras de se melhorar a utilização da capacidade de armazenamento limitado de entradas nas tabelas de fluxos, através da redução do conjunto de regras utilizadas pelos dispositivos de encaminhamento. Uma comparação entre estas formas de gerenciamento permite a identificação de qual forma de gerenciamento espacial é a mais indicada para uma rede com diferentes características, por exemplo, sua topologia, sendo o enfoque da próxima seção.

4. Comparação entre formas de gerenciamento de domínio espacial

Nessa seção apresenta-se a metodologia necessária para a realização da comparação entre as diferentes formas de gerenciamento (Subseção 4.1). Baseado nessa metodologia, na Subseção 4.2, discute-se os resultados obtidos.

4.1. Metodologia

Cenário. Para se comparar as diferentes formas de gerenciamento, três topologias são propostas: (i) estrela, (ii) árvore e (iii) anel. Na topologia de estrela, um único dispositivo de encaminhamento é utilizado para comunicar 30 nodos finais com o intuito de avaliar o impacto das formas de gerenciamento nesse dispositivo individualmente, como apresentado na Figura 2(a). Já, para realizar uma análise do impacto da utilização das diferentes

formas de gerenciamento de domínio espacial em um escopo mais amplo de rede, as duas topologias de árvore e anel são utilizadas, contendo 30 nodos finais conectados em 15 dispositivos de encaminhamento, como apresentadas nas Figuras 2(b) e 2(c). Sobre cada uma dessas redes com topologias diferenciadas, um controlador instala todas as regras de encaminhamento de maneira reativa, ou seja, quando um novo fluxo que não possui uma regra correspondente é identificado pelo dispositivo de encaminhamento, o controlador deve gerar uma nova regra que é instalada na tabela de fluxos.

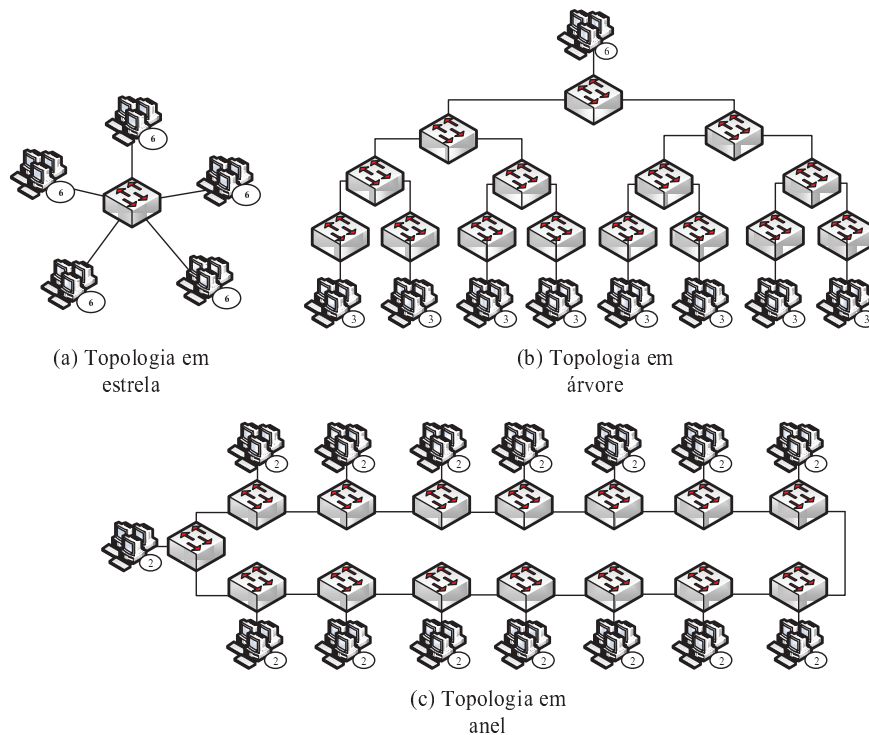


Figura 2. Topologias utilizadas nos experimentos

Carga de trabalho. Para realizar a comparação, é necessário a criação dos fluxos que são trafegados dentro das diferentes topologias de rede propostas. Primeiramente, um par de nodos finais é escolhido aleatoriamente (um cliente e um servidor). Os fluxos são gerados com base em dois parâmetros: duração do fluxo e intervalo entre rajadas. A duração de cada fluxo segue uma distribuição de log-normal com média $\mu = 4s$ e desvio padrão $\lambda = 1s$. O intervalo entre as rajadas de dados é um processo Poisson com média $\lambda = 1s$ [Neves et al. 2016] [Benson et al. 2010]. Fixa-se uma quantidade de 500 fluxos ativos na rede. Esta carga de trabalho representa um cenário realista, onde a maioria dos fluxos possui um ciclo de vida curto, enquanto apenas uma pequena parcela é constituída por fluxos com ciclos de vida longos. Dessa forma, cada experimento realizado, precisa ser executado por no mínimo 12 minutos, pois é o período de tempo necessário para que 500 fluxos sejam iniciados e concluídos.

Métricas. O desempenho de cada forma de gerenciamento espacial é comparado de acordo com quatro métricas: (i) quantidade de regras instaladas, (ii) quantidade de

intervenções do controlador, (iii) latência e (iv) *jitter*. Por quantidade de regras instaladas, considera-se a soma das regras presentes nos dispositivos de encaminhamento ao final de cada experimento, sendo a principal métrica que define a eficiência de uma forma de gerenciamento em relação a utilização da capacidade de armazenamento dos dispositivos de encaminhamento. Por quantidade de intervenções do controlador, considera-se a soma das mensagens para inserção de uma nova regra na tabela de fluxos (*flowmods*) e das mensagens de encaminhamento direto de pacotes (*packet-out*), sendo a principal métrica que define a sobrecarga inserida por uma forma de gerenciamento. Por latência, considera-se o tempo que um pacote precisa para alcançar o seu destino e retornar para a origem, também conhecido como *Round Trip Time*. Cada forma de gerenciamento irá influenciar a latência da rede de uma maneira diferente, principalmente, se o tempo de processamento da mesma é alto. Por *jitter*, considera-se a variação do atraso entre os pacotes de dados, sendo a métrica que consegue capturar o impacto das formas de gerenciamento na remoção e instalação de novas regras, gerando momentos instáveis na rede. Para a correta mensuração das métricas de desempenho em termos estatísticos, as coletas foram replicadas no mínimo 20 vezes, alcançando um nível de confiança de 95%.

4.2. Resultados

Essa seção apresenta os resultados experimentais obtidos a partir da metodologia proposta, organizados da seguinte forma. Primeiro, analisa-se o comportamento do gerenciamento por agregação e múltiplas tabelas comparando-os para um único dispositivo de encaminhamento na topologia de estrela. Em seguida, realiza-se a comparação entre essas formas de gerenciamento considerando as topologias de árvore e anel. É importante frisar que os experimentos foram realizados em um computador equipado com processador Intel i7-4770S com 4 núcleos de 3.1 GHz e 8GB de RAM. As formas de gerenciamento de domínio espacial foram implementados como aplicações do controlador Ryu (versão 4.2.2). Para mensurar a métrica de *jitter* foi utilizado a ferramenta iPerf versão 2.0.5. Além disso, foram utilizados o Mininet (versão 2.2.1) e Open vSwitch (versão 2.0.2 com suporte a OpenFlow 1.3) para emular uma rede real.

Comparação em uma Topologia Estrela

A topologia estrela permite a comparação entre as formas de gerenciamento de regras de domínio espacial para um único dispositivo de encaminhamento. Resultados coletados a partir do monitoramento desse dispositivo, podem ser observados a partir das Figuras 3(a), 3(b), 3(c) e 3(d). Essas figuras apresentam os gerenciamentos por agregação e múltiplas tabelas, bem como a linha base sem gerenciamento através das colunas e o eixo x.

Na Figura 3(a), o eixo y representa a eficiência de cada uma das formas de gerenciamento a partir da quantidade de regras instaladas no dispositivo de encaminhamento. Nota-se que o gerenciamento por agregação de fluxos reduz significativamente a quantidade total de regras utilizadas, alcançando uma melhora de aproximadamente 95%, quando comparado com a linha base sem gerenciamento. O gerenciamento por múltiplas tabelas, por sua vez, obteve uma redução de aproximadamente 89%, comparado a linha base, ou uma eficiência 6% menor que o gerenciamento por agregação.

Na Figura 3(b), o eixo y representa a quantidade de intervenções do controlador utilizadas para instalar regras e manter o estado da tabela de fluxos ao decorrer do experimentos. O gerenciamento por agregação de fluxos apresentou uma quantidade de

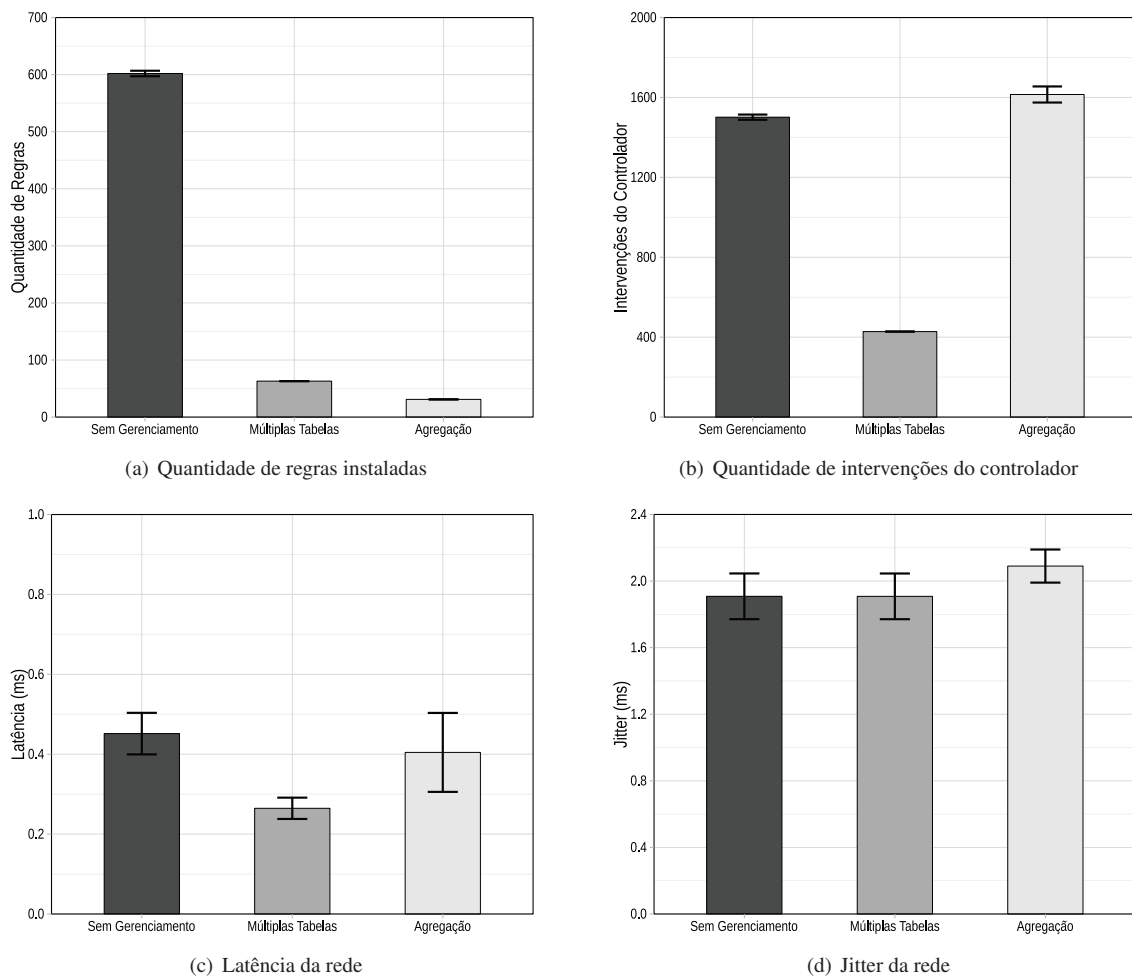


Figura 3. Resultados obtidos para uma topologia de rede estrela

intervenções do controlador aproximadamente 8% maior do que a linha base e por volta de 370% maior em relação ao gerenciamento por múltiplas tabelas. A grande quantidade de interrupções necessária para a operação do gerenciamento por agregação decorre do processo de atualização da tabela de fluxos com as regras agregadas. Já, o gerenciamento por múltiplas tabelas, obteve uma redução na quantidade de intervenções do controlador de aproximadamente 71% em relação a linha base.

Na Figura 3(c), o eixo y representa a latência média mensurada minuto-a-minuto durante o experimento. Nota-se que o gerenciamento por múltiplas tabelas alcança a melhor latência dentro da rede estrela com 0,26 ms, enquanto o gerenciamento por agregação apresentou 0,40 ms e a linha base 0,45 ms. Os intervalos de confiança permitem identificar que o gerenciamento de múltiplas tabelas é comparativamente inferior aos demais. Entretanto, o mesmo não pode ser afirmado em relação ao gerenciamento por agregação e a linha base, permanecendo como não diferenciáveis para um nível de confiança de 95%.

Na Figura 3(d), o eixo y representa o *jitter* médio coletado durante a duração de cada fluxo. Pode-se observar, que o gerenciamento por múltiplas tabelas e a linha base atingiram um *jitter* médio de 1,9 ms e o gerenciamento por agregação apresenta 2,19 ms. Considerando o intervalo de confiança utilizado, pode-se concluir que as formas de gerenciamento são semelhantes e não diferenciáveis.

Baseado na comparação em uma topologia estrela, pode-se concluir que o gerenciamento por agregação possui a melhor eficiência para a redução das regras de encaminhamento na tabela de fluxos. Entretanto, para atingir essa eficiência são necessárias uma quantidade significativa de intervenções do controlador, inserindo sobrecarga na rede com tráfego de sinalização. Por sua vez, o gerenciamento por múltiplas tabelas, atinge uma eficiência semelhante ao gerenciamento por agregação, mas sem a necessidade de uma grande quantidade de intervenções do controlador, apresentando o melhor custo benefício entre as estratégias de domínio espacial *intra-switch* neste cenário.

Comparação em Topologias de Árvore e Anel

As redes de topologias em anel e árvore permitem extrapolar a comparação entre as diferentes formas de gerenciamento espacial *intra-switch* para redes com números maiores de dispositivos. Para realizar essa comparação, os resultados coletados a partir do monitoramento dos dispositivos podem ser observados a partir das Figuras 4(a), 4(b), 4(c) e 4(d). Essas figuras apresentam as formas de gerenciamento espacial por agregação e múltiplas tabelas, bem como a linha base sem gerenciamento através das colunas com diferentes cores. Já, no eixo x, as colunas são agrupadas de acordo com as duas topologias.

A Figura 4(a) representa no eixo y a quantidade média das regras instaladas em cada dispositivo de encaminhamento. Para as topologias em anel e árvore, a eficiência do gerenciamento por agregação de fluxos é superior que as demais formas, alcançando uma melhora de 88% para anel e 71% para árvore, quando comparado com a linha base sem gerenciamento. Ainda que seja o mais eficiente, o gerenciamento por agregação apresentou baixa resiliência em relação a troca de topologias, duplicando sua quantidade de regras instaladas entre as topologias de anel para árvore. Já, o gerenciamento por múltiplas tabelas, mostrou-se resiliente a alteração das topologias, mantendo sua eficiência praticamente intacta, com 961 regras instaladas para anel (*i.e.*, uma redução de 73% comparado a linha base) e 945 regras para topologia em árvore (*i.e.*, uma redução de 67% comparado a linha base). É importante salientar que a resiliência é fundamental para a estabilidade e previsão do número de regras a serem utilizadas em redes reprogramáveis.

Na Figura 4(b), o eixo y representa a quantidade de intervenções do controlador ao decorrer do experimentos necessárias para instalar e manter o estado das tabelas de fluxos. Com um intervalo de confiança de 95%, pode-se constatar que o gerenciamento por múltiplas tabelas apresenta a menor quantidade de intervenções do controlador para as topologias de anel (66% abaixo da linha base) e para topologias em árvore (66% abaixo da linha base). Já, o gerenciamento por agregação de fluxo obteve a maior quantidade de intervenções do controlador, 155% acima da linha base para topologia em anel e 170% para topologia em árvore. Um fato interessante é o impacto significativo no crescimento da quantidade de intervenções do controlador entre as topologia de árvore para anel, onde, no melhor caso, 2310 intervenções foram acrescentadas utilizando o gerenciamento por múltiplas tabelas e, no pior caso, 12460 intervenções extras foram requisitadas pelo gerenciamento por agregação. Assim, a topologia da rede tem grande influência na quantidade de intervenções do controlador sem alteração na quantidade de fluxos ou número de encaminhamento presentes em relação a forma de gerenciamento utilizada.

Na Figura 4(c), o eixo y representa a métrica de latência média da rede. A forma de gerenciamento que propiciou a menor latência média para uma topologia em anel é por

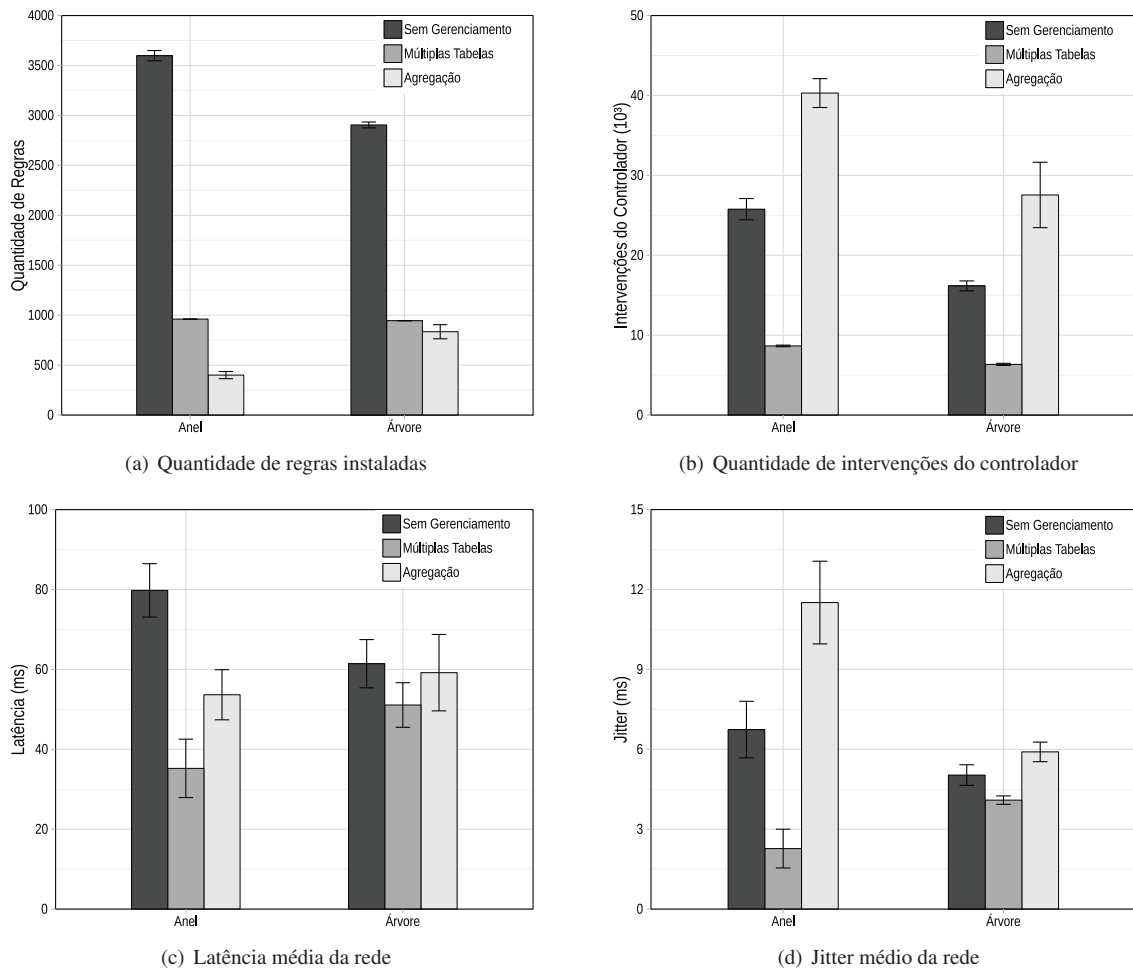


Figura 4. Resultados obtidos para as topologias anel e árvore

múltiplas tabelas, com uma latência média de 35,22 ms. Já, para a topologia em árvore, todas as formas de gerenciamento, incluindo-se a linha base, são semelhantes dado a intersecção entre as barras de erro calculadas com um nível de confiança de 95%. É importante frisar que o gerenciamento por múltiplas tabelas apresentou uma latência 57% maior entre as topologias de anel para árvore e a mesma análise não pode ser realizada para o gerenciamento por agregação e linha base.

Na Figura 4(d), o eixo y representa o *jitter* médio mensurado nas redes com topologias em anel e árvore. O gerenciamento por múltiplas tabelas possui o menor impacto no *jitter* para ambas as topologias de redes, alcançando o valor médio de 2,27 ms para anel e 4,09 ms para árvore. Já, o gerenciamento por agregação obteve o maior impacto no *jitter* para ambas as redes, apresentando um valor médio de 11,50 ms para anel e 5,9 ms para árvore. É importante observar que as formas de gerenciamento possuem valores semelhantes para ambas as topologias, exceto pelo gerenciamento por agregação com um valor significativamente alto de *jitter*, próximo aos 12 ms. Isto significa, que o atraso da rede gerenciada por agregação de regras torna-se instável e compromete a utilização de aplicações sensíveis ao *jitter*, como *Voice Over IP* e vídeo chats seguros.

Baseado na comparação entre topologias de árvore e anel, percebe-se que o gerenciamento por agregação de fluxos mostrou-se mais eficiente entre as formas de geren-

ciamento espacial *intra-switch*. Entretanto, essa forma de gerenciamento apresentou uma elevada quantidade de intervenções do controlador e degradação da qualidade de serviço da rede. O gerenciamento por múltiplas tabelas demonstrou-se resiliente as topologias mantendo tanto a quantidade de regras instaladas, quanto a número de intervenções do controlador inalterados. Essa forma de gerenciamento não impactou significativamente na qualidade de serviço da rede. Assim, múltiplas tabelas apresenta o melhor custo benefício, para as topologias estrela, anel e árvore.

5. Conclusão e Trabalhos Futuros

Neste artigo apresentou-se uma comparação de duas formas de gerenciamento de regras de domínio espacial *intra-switch*, por agregação e múltiplas tabelas, para redes baseada em OpenFlow. Essas formas de gerenciamento foram comparadas em redes com diferentes topologias, *i.e.*, estrela, anel e árvore. A partir dos resultados obtidos, pode-se afirmar que o gerenciamento por agregação de fluxos reduz significativamente a quantidade de regras de encaminhamento independente da topologia utilizada. Entretanto, essa forma de gerenciamento requer uma quantidade elevada de intervenções do controlador, além de impactar negativamente na latência e no *jitter* das redes. Além disso, o gerenciamento por agregação de fluxos não é resiliente a troca de topologias, tendo sua eficiência alterada. Por outro lado, o gerenciamento por múltiplas tabelas reduz a quantidade de regras de encaminhamento, necessitando uma baixa quantidade de intervenções do controlador e com baixo impacto na latência e *jitter* das redes. Além disso, demonstrou-se resiliente a mudança de topologia, mantendo sua eficiência praticamente constante, tanto para as redes em anel, quanto em árvore. Assim, o gerenciamento por múltiplas tabelas possui o melhor custo benefício, considerando regras de domínio espacial *intra-switch*.

Como trabalhos futuros, pretende-se realizar experimentação em equipamentos reais que utilizem tabela de fluxos implementadas com memórias *Ternary Content-Addressable Memory* (TCAM). Além disso, pretende-se extrapolar a quantidade de estratégias avaliadas realizando um estudo mais abrangente utilizando outras formas de gerenciamento espacial de regras (*i.e.*, posicionamento de regras). Por fim, pretende-se investigar mecanismos que possam melhorar o desempenho das estratégias estudadas oferecendo garantias de desempenho a rede.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pelo programa Horizon 2020 da União Europeia para pesquisa, desenvolvimento tecnológico e demonstração no âmbito do acordo n°. 688941 (FUTEBOL), bem como pelo Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicação (MCTIC) através da RNP/CTIC.

Referências

- Benson, T., Akella, A., e Maltz, D. A. (2010). Network traffic characteristics of data centers in the wild. In *Proceedings of the 10th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement, IMC '10*, pages 267–280, New York. ACM.
- Costa, L., Vieira, A., Silva, E., Macedo, D., Gomes, G., Correia, L., e Vieira, L. (2016). Avaliação de desempenho de planos de dados openflow. *34o. Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos - SBRC 2016*.

- Giroire, F., Moulhierac, J., e Phan, T. K. (2014). Optimizing rule placement in software-defined networks for energy-aware routing. In *Proc. IEEE Global Communications Conference*, pages 2523–2529.
- Kamiyama, N., Takahashi, Y., Ishibashi, K., Shiimoto, K., Ootoshi, T., Ohsita, Y., e Murata, M. (2014). Flow aggregation for traffic engineering. In *Proc. IEEE Global Communications Conference*, pages 1936–1941.
- Kanizo, Y., Hay, D., e Keslassy, I. (2013). Palette: Distributing tables in software-defined networks. In *Proc. IEEE INFOCOM 2013*, pages 545–549.
- Kreutz, D., Ramos, F., Esteves Verissimo, P., Esteve Rothenberg, C., Azodolmolky, S., e Uhlig, S. (2015). Software-defined networking: A comprehensive survey. *Proceedings of the IEEE*, 103(1):14–76.
- Lee, B. S., Kanagavelu, R., e Aung, K. M. M. (2013). An efficient flow cache algorithm with improved fairness in software-defined data center networks. In *Proc. IEEE 2nd Int. Conf. Cloud Networking (CloudNet)*, pages 18–24.
- Luo, S., Yu, H., e Li, L. M. (2014). Fast incremental flow table aggregation in sdn. In *Proc. 23rd Int. Conf. Computer Communication and Networks (ICCCN)*, pages 1–8.
- Neves, M., Oliveira, R., Mazzola, F., Marcon, D., Gasparly, L., e Barcellos, M. (2016). Contando os segundos: Avaliação de estratégias de domínio temporal para a gerência de regras em redes sdn. *34o. Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos - SBRC 2016*.
- Nguyen, X. N., Saucez, D., Barakat, C., e Turlitti, T. (2015). Officer: A general optimization framework for openflow rule allocation and endpoint policy enforcement. In *Proc. IEEE Conf. Computer Communications (INFOCOM)*, pages 478–486.
- Nguyen, X. N., Saucez, D., Barakat, C., e Turlitti, T. (2016). Rules placement problem in openflow networks: A survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 18(2):1273–1286.
- ONF (2015). The benefits of multiple flow tables and TTPs. Open Networking Foundation. Disponível em: <https://www.opennetworking.org>.
- Vishnoi, A., Poddar, R., Mann, V., e Bhattacharya, S. (2014). Effective switch memory management in openflow networks. In *Proc. of the 8th ACM International Conference on Distributed Event-Based Systems, DEBS '14*, pages 177–188, New York. ACM.
- Wickboldt, J., De Jesus, W., Isolani, P., Both, C., Rochol, J., e Granville, L. (2015). Software-define networking: Management requirements and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 53(1):278–285.