

Analisando o Estado-da-Arte dos Controllers SDN para a Unificação das camadas de Pacotes e Óptica em redes de Telecomunicações

Fernando Zanferrari Morais¹, Jéferson Nobre¹, Rodrigo da Rosa Righi¹

¹Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada - Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS)

Av. Unisinos, 950 – Cristo Rei, São Leopoldo – RS – 93020-190 – Brasil

fmorais@edu.unisinos.br; jcnobre@unisinos.br; rrrighi@unisinos.br

Abstract. *Driven by the entry of new technologies, telecommunications networks are constantly evolving and improving. Among current developments, Software-Defined Networking (SDN) technology has a strong transformation perspective in telecommunications networks. In particular, SDN can contribute to the unification of the optical and packet layers, since such layers act currently separate. The Controller SDN entity is in charge of this unification, which will bring gains related to interoperability, decision making and management of functions in a unique way. In this context, the present article presents a review of the literature with the main SDN Controllers available in the industry for unify the optics and packets layers control planes. Article's contribution is focused on this area as it details the SDN Controllers to the key recommendations and requirements presented by the Open Networking Foundation (ONF), as well as telecommunication operators and developers. A careful analysis of the literature shows that there are no revisions with the same focus as that developed in this document; therefore, highlighting the innovative role of the results presented in the article.*

Resumo. *Impulsionadas a partir da entrada de novas tecnologias, redes de telecomunicações estão em constante evolução e aprimoramento. Dentre as atuais evoluções, a tecnologia Software-Defined Networking (SDN) possui perspectiva de transformação nas redes de telecomunicações. Em particular, SDN pode contribuir na unificação das camadas de pacotes e óptica, uma vez que tais camadas atuam separadas atualmente. A entidade Controller SDN é, então, encarregada dessa unificação, a qual acarretará ganhos relacionados a interoperabilidade, tomada de decisões e gestão de funções de forma singular. Nesse contexto, o presente artigo apresenta uma revisão da literatura com os principais Controllers SDN disponíveis na indústria no que se refere a unificação dos planos de controle das camadas de pacotes e óptica. A contribuição tem seu foco nessa área, uma vez que detalha os Controllers SDN perante as principais recomendações e requisitos apresentados pelo órgão Open Networking Foundation (ONF), bem como operadoras e fabricantes na área de telecomunicações. Até o momento, uma análise criteriosa da literatura mostra que não há outras revisões com o mesmo foco da apresentada nesse documento, ressaltando, portanto, o papel inovador dos resultados apresentados no artigo.*

1. Introdução

Na atualidade, observa-se um crescimento exponencial do uso dados em redes de telecomunicações, conhecido como Era de Dados. É possível destacar a evolução dos dispositivos móveis, os quais apresentam-se em maior número em comparação à população mundial e também a explosão do uso de vídeo sobre IP (perspectiva de 79 por cento do tráfego em 2018)[Tofigh and Leenheer 2015].

Para o conseqüente crescimento do tráfego de dados, a evolução das camadas de pacotes e óptica, também consideradas redes de transporte, são fundamentais, assim como para seus serviços agregados, tais como redes móveis, telefonia fixa, banda larga, Internet Protocol Television (IPTV) e serviços corporativos. Tendo como referência pilha de protocolos TCP/IP, as redes de transporte são baseadas nas camadas físicas, de enlace e de rede. Sendo assim, ao atribuir referências às tecnologias Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) e Optical Transporte Network (OTN), entende-se que estas são específicas da camada física, enquanto o protocolo Generalized Multi Protocol Label Switching (GMPLS) possui abrangência tanto da camada óptica, quanto da camada de pacotes. De forma particular, a camada de pacotes atua em todas as camadas da rede de transporte, a partir dos protocolos de roteamento Interior Gateway Protocol (IGP), Exterior Gateway Protocol (EGP) e Multi-Protocol Label Switching (MPLS) [Mirkhazadeh et al. 2018].

No entanto, o cenário atual das redes de transporte de telecomunicações expõe fragilidades, como, por exemplo, o funcionamento com planos de controles distintos entre as camadas de pacotes e óptica que, por sua vez, evidência vulnerabilidades como a baixa convergência, a fabricação de equipamentos proprietários e de baixa interoperabilidade, as tomadas de decisões e gerenciamento distribuídos, a baixa eficiência energética e o alto custo operacional. Por outro lado, as transformações de mercado exigem inovações, tais como a integração de camadas, o aumento de velocidade de maneira flexível, uma maior disponibilidade e resiliência, a simplificação no planejamento, o gerenciamento fim-a-fim, a melhoria e a otimização na operação e inteligência de rede.

A partir das eminentes necessidades de rede, impulsionadas pela demanda, a tecnologia SDN propicia grande expectativa de imersão nas redes de telecomunicações, principalmente nas de transporte para fazer parte do processo de mudança. Nesse sentido, a tecnologia SDN surge como um novo conceito que propicia transformações na essência de redes de maneira geral, tais como a inserção do Controller SDN para dissociação do plano de controle de dados e gerenciamento unificado, Application Programming Interfaces (APIs) abertas, tanto para plano de controle, quanto para plano de dados e desenvolvimento de funções customizadas de forma mais ágil e simples. Tendo em vista esse panorama, a figura 1 retrata o cenário atual das redes de transporte legadas e a proposta de evolução com a tecnologia SDN e o Controller SDN [Sood et al. 2014].

Atualmente, em âmbito científico, há muitas pesquisas relacionadas à tecnologia SDN. A literatura contempla os surveys [Sood et al. 2014], [Kreutz et al. 2015] e [Alvizu et al. 2017] (survey com foco em SDN para redes de transporte). Além disso, apresenta também artigos que abordam a integração das redes ópticas e de pacotes como em [Martinez et al. 2014], [Das 2012], [Gerstel et al. 2015], [Zhou et al. 2016], [Gringeri et al. 2013] e [Haddaji et al. 2018]. Em paralelo à literatura científica, os órgãos ONF e OIF trabalham em recomendações, tanto voltadas à tecnologia SDN, quanto nas especificamente direcionadas para as redes de

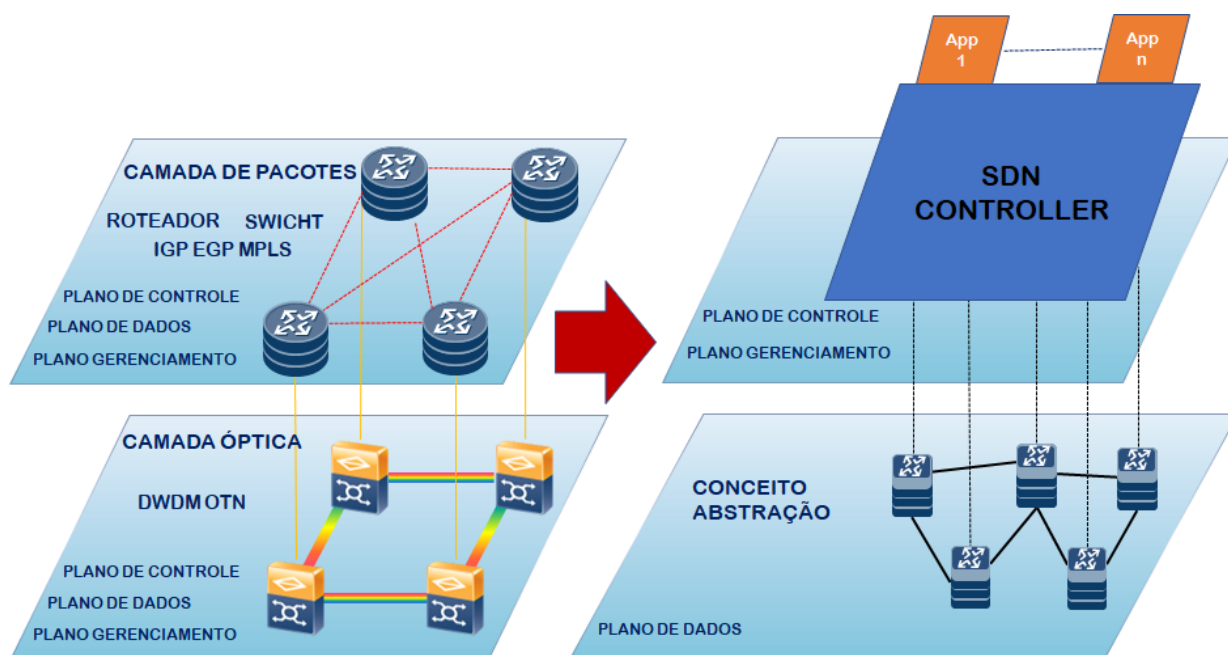


Figura 1. Redes de Transporte de Telecomunicações - (a) Gestão independente entre camada de pacotes e óptica; (b) SDN - Controller SDN e a unificação do plano de controle

transporte, tais como [Ong 2017], [Mitch Auster et al. 2014], [Jia He et al. 2014], [Gerlach and Foisel 2013] e [Mitch Auster et al. 2014]. As operadoras de telecomunicações têm produzido um vasto referencial teórico apreciado nos artigos e recomendações técnicas [Tofigh and Leenheer 2015], [Verizon 2016], [AT&T 2013], [Javier et al. 2014], [Malcolm Betts et al. 2014], [Li 2014], [Brown et al. 2017], [Ong 2017] e [SDN Central 2017].

Diferentemente dos trabalhos supracitados, o presente artigo apresenta uma revisão da literatura referente aos Controllers SDN desenvolvidos pela indústria de tecnologia para a unificação entre as camadas de pacotes e óptica em redes de telecomunicações. A metodologia da pesquisa foi embasada em recomendações dos órgãos padronizadores e das principais operadoras de telecomunicações, em ensaios laboratoriais e em bibliografias acadêmicas. Nesse sentido, a contribuição deste manuscrito foi apresentada no formato de tabela contendo os requisitos pesquisados e a discussão do estado-da-arte dos Controllers SDN para unificação do plano de controle, bem como em uma análise de desafios, oportunidades e limitações dessa proposta. Consequentemente, para a sociedade, esta pesquisa colabora com o desenvolvimento das redes de telecomunicações, para a evolução do atendimento aos serviços, assim como para aplicabilidades vigentes e futuras.

O restante do artigo foi organizado a partir da seção 2, que está dividida em 3 subseções. A subseção 2.1 introduz os principais conceitos de SDN, a subseção 2.2 detalha a arquitetura da rede legada operante nas redes de telecomunicações e a terceira subseção, 2.3, apresenta os elementos chave para unificação do plano de controle. A seção 3 reproduz a metodologia aplicada para escolha dos requisitos e levantamento dos dados. A seção 4 unifica as informações dos Controllers SDN no formato da tabela 1,

detalha e reproduz discussão dos requisitos avaliados por cada fabricante. Na seção 5, são apresentados a discussão, os desafios e as oportunidades constatadas por meio do desenvolvimento desta pesquisa. A seção 6 indica as principais limitações verificadas para a tecnologia, e a seção 7 apresenta a conclusão do trabalho.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A seção 2 busca embasar o artigo por meio dos principais pilares da unificação dos planos de controle das camadas de pacotes e óptica, assim como os principais requisitos, arquiteturas e estrutura dos Controllers SDN.

2.1. SOFTWARE DEFINED NETWORKING

A terminologia SDN foi criada para representar ideias e trabalhos em torno do padrão OpenFlow na Universidade de Stanford. O órgão ONF define SDN como um produto único, que permite que os planos de controle e de dados sejam dissociados a partir do emprego de inteligência à rede, de centralização lógica e de abstração das subcamadas de infraestrutura de rede segundo a aplicação. A arquitetura da tecnologia SDN é estruturada em quatro pilares[Sood et al. 2014]:

1. Desacoplamento do plano de controle do plano de dados, com a remoção do plano de controle dos dispositivos (switches, roteadores, firewall, middleboxes, entre outros), estes apenas com funções de encaminhamento de pacotes;
2. Decisões baseadas em fluxos ao invés de endereçamento de destino, funcionamento da rede em modo abstrato. Tal característica oportuniza unificação entre diferentes dispositivos;
3. Lógica de controle em entidade externa denominada Controller SDN, que, por sua vez, constitui-se como plataforma de software também chamada de Networking Operating System (NOS). A entidade Controller SDN traz o conceito de centralização das funções de controle, possibilitando, a partir desse conceito, a simplificação na realização de modificações das políticas de rede por meio das diferentes linguagens e níveis;
4. Redes configuradas em softwares de aplicações On Top.

O protocolo OpenFlow é considerado um dos primeiros padrões da tecnologia SDN. Ele é originalmente definido para a interação entre Controller SDN, camadas de gerenciamento, orquestração e camada de dados. Além disso, é considerado um protocolo open source, pois provê os padrões para as interfaces APIs Northbound e Southbound, proporcionando, assim, a possibilidade de um único Controller SDN operar diferentes dispositivos de rede, inclusive, de diferentes fabricantes. Atualmente, o principal grupo regulador do protocolo OpenFlow é o ONF, criado justamente para padronização das interfaces SDN. A ONF possui muitas especificações desenvolvidas, sendo a 1.0.0 a mais utilizada[Sood et al. 2014].

A figura 2 detalha a estrutura proposta pela tecnologia SDN, bem como a divisão da tecnologia em 3 principais camadas: Plano de Dados, Plano de Controle e Plano de Aplicações.

O plano de dados na arquitetura SDN possui duas funções principais, a infraestrutura de rede e a interface Southbound. A infraestrutura de rede constitui-se por dispositivos, tais como roteadores, switches, appliances, entre outros. No entanto, como

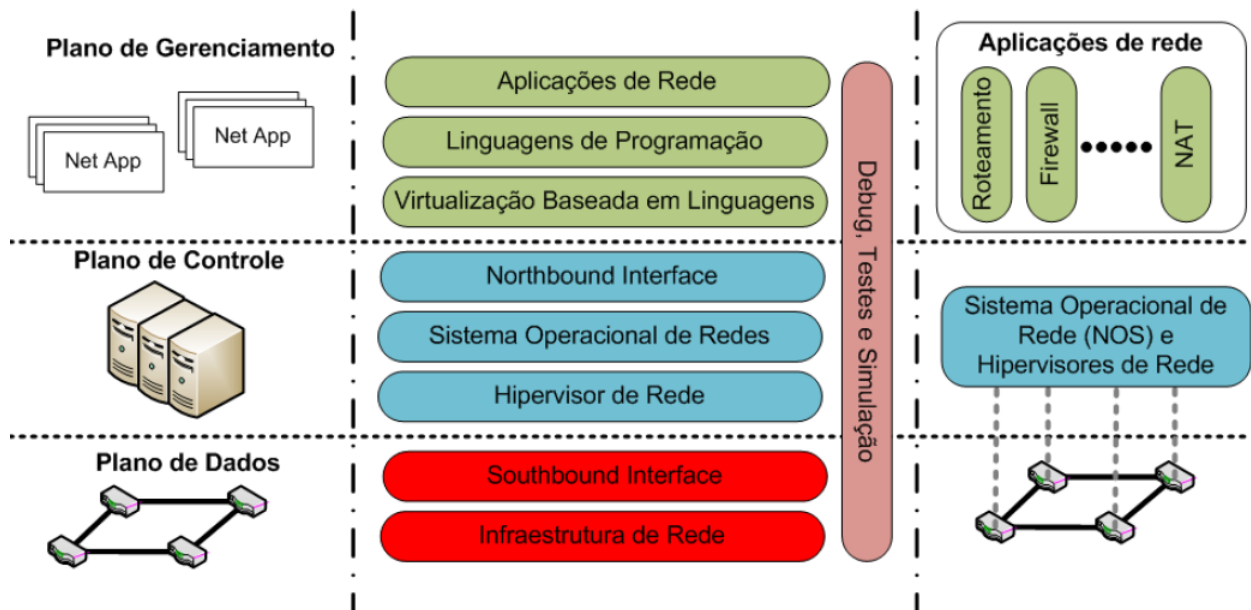


Figura 2. Estrutura SDN e suas camadas [Kreutz et al. 2015]

já detalhado nos pilares do SDN, nesta nova arquitetura, os dispositivos possuem como atribuições apenas o encaminhamento de pacotes, perdendo funções de softwares embarcados ou decisões autônomas que foram para o plano de controle logicamente centralizado.

No que diz respeito a Interface Southbound, comum aos dispositivos de encaminhamento e Controller, seu principal ganho é a proposta de interoperabilidade entre os diferentes fabricantes. Quando utilizada no protocolo OpenFlow, a interface provê três principais informações para o Controller SDN. A primeira refere-se à comunicação entre o dispositivo de encaminhamento e o Controller quando um link ou porta é habilitada. A segunda contempla o controle das mensagens referentes aos dados estatísticos coletados e a terceira ocorre quando o dispositivo encaminhador necessita contatar o Controller para determinar o que deve ser realizado com um pacote desconhecido ou sem tabela de fluxos.

O plano de controle na arquitetura SDN é dividido em 3 subcamadas, sendo elas Network Hypervisor, sistema operacional e interfaces Southbound e Northbound. As funções do plano de controle estão contidas dentro do Controller SDN, o qual pode tanto ser virtualizado quanto físico [Kreutz et al. 2015].

A criação do conceito de Network Hypervisor traz a abstração das funções e do controle de rede, criando uma rede independente do tipo de aplicação. Assim, habilita a criação, a remoção e a movimentação das máquinas virtuais dos Controllers SDN e de suas aplicações de rede. Logo, possibilita que diferentes máquinas virtuais compartilhem os mesmos recursos de hardware a partir do conceito de slicing (dimensionamento de uma função de rede e comprometimento de recursos a partir da sua necessidade, por exemplo, bandwidth, topologia, tráfego, CPU, tabelas de encaminhamento e outros). No que se refere as funções e serviços de rede, permite que múltiplas redes virtuais operem simultaneamente criando uma espécie de personalização das funções e serviços, conforme a demanda solicitada.

O sistema operacional tem como principais funções prover APIs de alto nível para reproduzir um nível de abstração mais baixo dos dispositivos de rede, além de gerenciar recursos concorrentes de hardware (Hard Drive, CPU, memória) e disponibilizar mecanismos de segurança. Nos dispositivos de rede atuais, os sistemas operacionais são proprietários, operam de forma distribuída (tomada de decisão descentralizada) e trazem grande complexidade de implementação e gestão da rede. Sendo assim, o sistema operacional propõe facilitar o gerenciamento de rede, possuir adaptabilidade para novas aplicações e serviços, não ser proprietário (normalmente operando com plataforma que possibilite desenvolvimento de novas funções e aplicações de forma aberta) e trazer vantagens na centralização lógica do controle. Além disso, permite acrescentar funcionalidades, como status da rede, topologia de rede, descoberta de dispositivos, configurações de rede, aplicações ou atualizações de políticas para diversos dispositivos simultaneamente e de forma única, buscando, com isso, reduzir a complexidade inerente às redes atuais [Kreutz et al. 2015].

Em se tratando das interfaces Northbound e Southbound, ambas são consideradas a chave para o funcionamento da abstração nas redes SDN, sendo a interface Southbound, tratada em parágrafo anterior. Por outro lado, a interface Northbound é responsável pela comunicação entre o Controller SDN e o Plano de aplicações, além de suas respectivas aplicações e interações com o orquestrador. Mesmo com toda sua relevância, ainda não possui um padrão e linguagem previamente definido e consolidado. Algumas soluções já contemplam padronizações proprietárias, podendo-se destacar a utilização dos APIs Representational State Transfer (REST) com as linguagens Hypertext Transfer Protocol (HTTP), Hyper Text Transfer Protocol Secure (HTTPS), Java, Python, RESTCONF (utilizando o YANG) e o NETCONF. Entre as principais funções previstas para a API, pode-se realçar as funções Path Computation, prevenção de Loops, de roteamento, de segurança, de interação com funções do Orquestrador, de gerenciamento em nuvem, entre outros. A ONF criou um grupo chamado de Northbound Working Group (NWG) para desenvolvimento e tentativa de padronização da API em questão.

O Plano de Aplicações é conceitualmente a interface entre os planos de dados, planos de controle, interfaces Southbounds e Northbounds com os administradores da Rede. Esta camada é responsável pelas aplicações do SDN. Conforme a literatura, são divididas em três subcamadas: (1) aplicações de Rede, (2) linguagens de programação e (3) linguagem baseada em virtualização. Por meio destas subcamadas, torna-se viável a configuração de equipamentos da rede para desempenhar diversas funções, conseguir as notificações dos eventos ocorridos e obter as informações de monitoramento e performance. As linguagens de programação utilizada nas aplicações desse plano fornecem abstrações, facilitando, dessa maneira, a programação das aplicações e a reutilização de código, além de evitar erros e conflitos entre comandos vindos de várias aplicações. Entre as principais aplicações, pode-se destacar os protocolos de roteamento, balanceamento de carga, Access Control Lists (ACLs), virtualizações de rede, monitoramento de rede, detecção de ataque, Traffic Engineering, QoS e funções de mobilidade [Kreutz et al. 2015].

2.2. Rede Legada

Atualmente, as principais operadoras de telecomunicações trabalham com arquiteturas divididas em camadas de pacotes e ópticas no contexto das redes de transporte. As redes

de pacotes são baseadas em roteadores e switches, ao passo que as redes ópticas são apoiadas em fibras ópticas e dispositivos DWDM. Entretanto, a camada de pacotes opera a partir da comutação de pacotes, enquanto a camada óptica funciona segundo comutação de circuitos. Recentemente, as redes ópticas vêm apresentando avanços relacionados a interoperabilidade com algumas funcionalidades da camada de pacotes, agregando, desse modo, evoluções em parâmetros de resiliência, operação, elasticidade, entre outros. No entanto, estes avanços ainda estão aquém da necessidade de mercado, sendo a operação, até o momento em planos de controle distintos entre as duas camadas um ponto relevante a se destacar. Normalmente, a camada de pacotes possui o plano de controle mandatório em relação a camada óptica, devido a maior complexidade de suas funções e interação com os serviços [Das 2012].

2.2.1. Redes de Pacotes

No que diz respeito a rede de pacotes, a bibliografia atual a define como um conjunto de dispositivos com capacidade de encaminhamento de pacotes conectados, cada uma com independentes domínio, administração e gerenciamento. É estruturada a partir de um domínio de roteamento IGP delimitado ao seu Autonomous System (AS), além de anunciar suas redes a partir de protocolos EGP, normalmente pelo protocolo Border Gateway Protocol (BGP). Cada dispositivo de rede possui tomadas de decisões próprias, tais como descoberta de vizinhos, topologia de rede, troca de informações, encaminhamento de pacotes e aprendizagem de falhas. Os protocolos de roteamento (OSPF, ISIS, BGP, os mais usados para redes em grande escala) são os responsáveis pelo controle distribuído. Estes protocolos não possuem a confiança esperada quando em estado de congestionamento, não proporcionando, portanto, garantias fim-a-fim (normalmente best-effort) e o suporte a Quality of Service (QoS) de forma pouco automatizada. Funções de gerenciamento envolvem tipicamente Command Line Interface (CLI), monitoradas pelo protocolo Simple Network Management Protocol (SNMP) ou ferramentas proprietárias dos fabricantes e com Operations, Administration and Management (OAM) de dispositivos de forma independente [Das 2012].

A evolução dos serviços e interoperabilidade em redes de pacotes está atrelada ao protocolo MPLS. Este protocolo traz uma nova camada intermediária entre as camadas de rede e enlace, tanto para a pilha de protocolos TCP/IP quanto OSI. Tem o intuito de operar em conjunto com os protocolos IGPs, mas baseando-se em troca de etiquetas inseridas no cabeçalho do pacote IP. Dentre os diferenciais, destacam-se: o conceito de roteamento explícito (com maior velocidade para as redes) com admissão de criação de túneis transparentes independente dos protocolos), a criação de VPNs MPLS de forma isolada, sem qualquer interação com a tabela de roteamento global dos equipamentos por meio dos protocolos BGP e Multi Protocol-BGP e as funções de Traffic Engineering (TE), QoS e Diffserv de forma mais robusta [Das 2012].

2.2.2. Redes Ópticas

O principal objetivo das redes ópticas em cenários de telecomunicações está relacionado a promover comunicação entre pontos geograficamente distintos, normalmente de longo

alcance e sob a tecnologia DWDM para otimização dos recursos. Redes DWDM operam sobre fibras ópticas e por multiplexação de comprimentos de onda, atualmente na ordem de até 96 canais e terabits de transmissão de informações. São redes consideradas intradomínio, mas o conceito não se equivale aos das redes de pacotes. Tradicionalmente, não atuam com plano de controle operando de forma distribuída. Entre suas desvantagens está: baixa interoperabilidade entre fabricantes, poucas soluções multivendor e dificuldade de automatização de sistemas. Apesar disto, possuem planos de dados e gerenciamento muito robustos e estáveis, e pode-se ressaltar também o elevado índice de Service Level Agreement (SLA), baixo delay e jitter [Das 2012].

Complementar às redes DWDM, a tecnologia OTN agrega benefícios às redes ópticas. A estratégia do OTN é operar em uma camada acima do DWDM com o conjunto de Optical Network Element (ONE), que possui como principais funcionalidades o transporte, a multiplexação, o roteamento, o gerenciamento, a supervisão e os mecanismos de resiliência para os canais ópticos. A tecnologia OTN é dividida em duas partes: a Hierarquia Óptica de Transporte (HOT) e a Hierarquia Digital de Transporte (HDT). A hierarquia HDT possui maior relação com o domínio elétrico, com a gestão fim-a-fim e com o serviço da aplicação ao cliente. Já a hierarquia HOT possui relação com o domínio óptico, conversões ópticos/elétricas (vice-versa) e multiplexação óptica [Favoreto 2009].

Outra evolução desenvolvida para as redes ópticas foi o protocolo GMPLS que permite aproximar as redes ópticas das redes de pacotes. Este por sua vez é considerado uma extensão do MPLS devido à possibilidade de extensão do conceito de label switching para tecnologias de circuito comutado. Habilita distintos tipos de rede e dispositivos para realizar processos por comutação de pacotes, multiplexação por divisão de tempo, comutação por comprimento de onda e comutação óptica no geral. O protocolo acresce os requisitos de controle e interoperabilidade de tráfego de diferentes tipos de transportes e serviços, além de possibilitar, a partir de um conjunto de protocolos, a constituição de plano de controle e possuir alta interoperabilidade com o protocolo OTN [Favoreto 2009].

2.3. Unificação Plano de Controle

Primeiramente, como já apresentado na seção 2.2, a unificação dos planos de controle entre as camadas de pacotes e óptica é um grande desafio para as redes de transporte de telecomunicações. No entanto, foi visto que, a partir da entrada do conceito SDN e do protocolo OpenFlow, estas redes poderão operar de forma conjunta, permitindo suporte a controle logicamente centralizado e independente de software ou hardware. No que se refere aos objetivos da unificação, os itens de maior relevância são: unificação dos planos com um controle multicamada e multivendor de forma logicamente centralizada, controle de configuração e programação com conceito aberto, provisionamento de aplicações orientadas em tempo real e introdução de virtualização em redes de transporte, possibilitando o particionamento em múltiplas redes virtuais [Haddaji et al. 2018].

Para atingir os objetivos apresentados, o Controller SDN é considerado o principal componente do sistema. Todavia, o Controller SDN é o elemento no qual as decisões são tomadas de maneira a garantir o funcionamento da rede e atingir os propósitos acima descritos [Cardoso and Fernandes 2015].

2.3.1. Sistema Operacional do Controller SDN

Desde o início da evolução da solução SDN muitos sistemas operacionais foram desenvolvidos, contemplando soluções acadêmicas e industriais. A companhia VMware desenvolveu a plataforma Network Virtualization Platform (NVP) ou VMware NSX, que utiliza um comutador virtual aberto (Open Virtual Switch – OVS) e o OpenFlow como interface SBI. Outros sistemas operacionais presentes são o Ryu (linguagem Python e SBI Openflow e NETCONF), Beacon (solução pioneira e com linguagem JAVA) e o NOX/POX (origem do ONOS, código aberto e Openflow). No entanto, para as redes de transporte de telecomunicações, os principais sistemas operacionais utilizados são o Opendaylight (ODL) e o Open Network Operating System (ONOS) [Kreutz et al. 2015, Sood et al. 2014].

A solução ODL é escrita em JAVA, orientada a API REST e interface web, além de incluir suporte a NFV, redes em escala e modularidade plugável. Interfaces Southbound podem operar com OpenFlow, BGP e PCEP. O ODL é baseado em uma arquitetura de microsserviços, através do compartilhamento de estruturas de dados baseados em YANG para armazenamento e troca de mensagens. Por meio de um modelo dirigido à camada de abstração de serviços (Model Driven Service Abstraction Layer - MD-SAL) qualquer aplicação ou função pode ser agregada a um serviço e carregada pelo Controller SDN. No que se refere ao sistema ONOS, o mesmo é voltado para operadoras de telecomunicações, projetado para alta disponibilidade, desempenho e escalabilidade através de instâncias distribuídas que conferem redundância ao controlador em caso de falha [Kreutz et al. 2015, Sood et al. 2014, Zhang et al. 2017].

2.3.2. Arquitetura

A ONF definiu, para as redes de transporte, duas interfaces aplicadas ao Openflow, ambas atreladas à interface Southbound. As interfaces são as Control Data Plane Interface (CDPI) e Control Virtual Network Interface (CVNI). A interface CDPI é a responsável pela interação entre o elemento de rede e o Controller SDN. Logo, a interface CVNI é a responsável por interações no âmbito de serviços do Controller SDN virtualizados, estes internos ou externos. Por exemplo, a interface CVNI pode utilizar o protocolo GMPLS para interação com a rede legada [Mitch Auster et al. 2014]. Conforme o OpenFlow para unificação do plano de controle, duas vertentes são possíveis, sendo elas (1) o controle de diferentes camadas que são gerenciadas por um único Controller SDN (suporta as tecnologias ópticas e de pacotes em um mesmo plano) e (2) a criação de uma arquitetura de Controllers SDN, com um Controller servidor e outros clientes, um para cada camada [Malcolm Betts et al. 2014].

Com a utilização de um único Controller, pode-se fazer o seu detalhamento a partir das informações abaixo:

- A arquitetura integra as tecnologias e traz como diferencial a possibilidade de adaptação conforme demanda.
- Utiliza apenas a interface CPDI que incorpora as funcionalidades, tanto da rede quanto óptica. Por exemplo, os nós de borda devem suportar interoperabilidade, tanto para GMPLS quanto para OTN.

- Alta complexidade, dispositivos e portas com visão física e lógica, com mapeamento lógico em diferentes camadas, como por exemplo, atributos de multiplexação OTN (ODU, OCh, OTU), atributos de dados (pseudowires, MPLS-TP, GMPLS) e atributo topológicos.

Relativo ao uso de Arquitetura de Controllers SDN, pode-se destacar as atribuições abaixo:

- Utiliza a interface CVNI para comunicação entre o Controller SDN servidor e os Controllers SDN clientes, e provê a Path Computation da Rede.
- Assume, como política a utilização de abstração entre os Controllers SDN de Dados (NPC), Ópticos (ONC) e na topologia. Dessa forma, reduz uma grande quantidade de troca de informações entre os Controllers SDN e a complexidade em Path Computation.
- A sincronização entre o NPC e ONC expõe uma visão de topologia abstrata com foco na rede óptica.
- Ness circunstância, o conceito de fluxo é aplicado na rede óptica e por meio da interface CVNI provedora da topologia, possibilitando assim, a escolha do melhor caminho para a rede de pacotes com o fluxo criado na rede de óptica. Portanto, trazer a visão de que uma conexão nesta rede é um link para a camada de pacotes, sendo uma nova conexão e um novo link.
- Todas as funções de redes autônomas associadas, tais como proteção ou restauração de malha, são também provisionadas utilizando a interface CVNI como conexão. Sendo assim, alterações na rede óptica são mapeadas pela interface CVNI.

As interfaces CDPI e CVNI não possuem um protocolo único para utilização, sendo possível verificar os principais protocolos utilizados na figura 3. Os mesmos estão divididos em Management Plane (MP), OpenFlow ou Hybrid (híbrido), havendo, em cada divisão uma subdivisão de controle de dispositivos de rede e controle de conexão [Gerlach and Foisel 2013].

MP		Hybrid (examples)						OF	
Controle do Dispositivo	Controle de Conexão	Controle do Dispositivo	Controle de Conexão	Controle do Dispositivo	Controle de Conexão	Controle do Dispositivo	Controle de Conexão	Controle do Dispositivo	Controle de Conexão
TL1, SNMP, CORBA, JSON/REST		OF	GMPLS	OF		GMPLS		OF	
		TL1, SNMP, CORBA, JSON/REST		TL1, SNMP, CORBA, JSON/REST					

Figura 3. Protocolos Interfaces Southbound

Com base ainda na figura 3, as interfaces CDPI e CVNI possuem grande número de protocolos sendo avaliados para utilização da interface Southbound. Assim como, há viabilidade de utilização de diferentes protocolos de forma simultânea e com diferentes aplicabilidades. Dentre os principais protocolos, é possível destacar: GMPLS - altamente suportado nas redes legadas, OF - estado da arte do conceito SDN e SNMP/TL1 - amplamente utilizado em dispositivos de redes de pacotes.

2.3.3. Funcionalidades do Controller SDN

Com as duas possibilidades de arquiteturas expostas na subseção anterior, a camada de controle do SDN apresenta, como principais funcionalidades o gerenciamento dos serviços de rede (NSM - Network Service Manager), um elemento computacional para rotas e caminhos (PCE - Path Computation Element), um gerenciador de topologias (TM - Topology Manager), um gerenciador de performance (MM - Monitoring Manager), um gerenciador de encaminhamento (FCM - Forwarding/cross Manager) e uma camada de abstração unificada (UAL - Unified Abstraction Layer). O NSM é utilizado como gestor das demandas ou serviços da interface Northbound para execução no Controller SDN. O Controller SDN, por sua vez, analisa o status da rede com informações obtidas dos módulos TM e MM, após requisitadas informações do PCE para análise da disponibilidade da demanda solicitada. Durante a operação entre as funcionalidades TM, MM e FCM, o PCE controla o estado de toda a rede. O resultado da análise é gerido pela FCM e enviado para a UAL para configurar os elementos da rede. O UAL é o principal responsável pela análise das mensagens das interfaces Southbound e pela construção de mensagens relacionadas e em acordo com as decisões do controlador [Zhou et al. 2016]. A figura 4 detalha a interação entre as funcionalidades que compõe o Controller SDN.

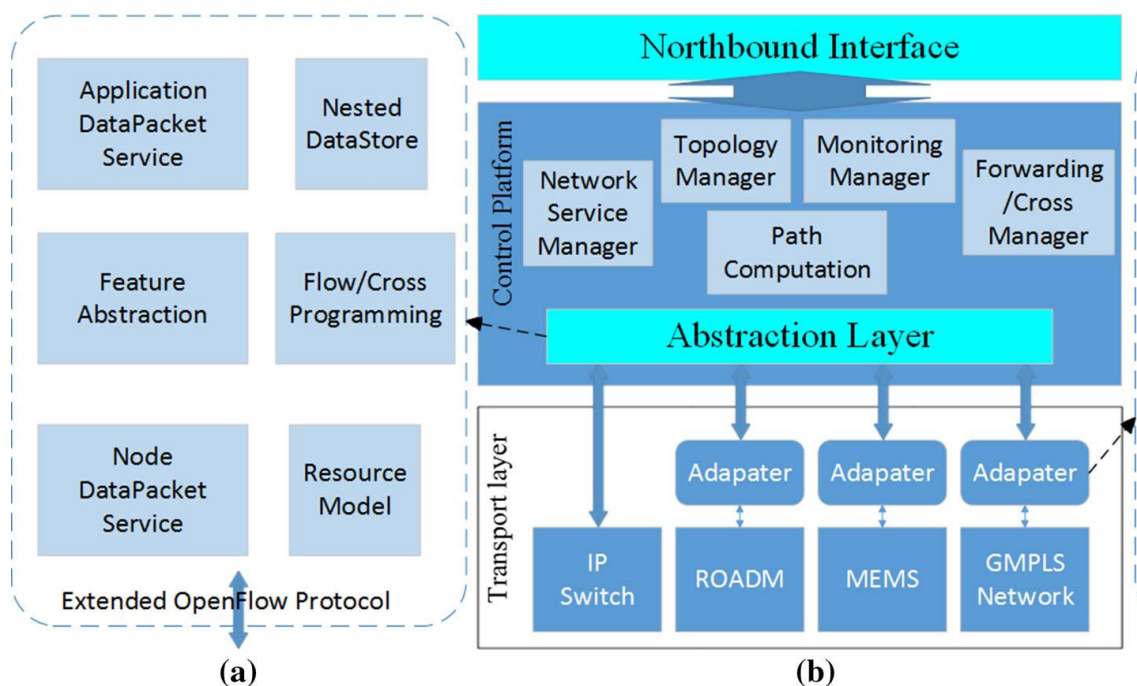


Figura 4. Detalhamento Funções SDN Controller SDN

O PCE é denominado como entidade (componente, aplicação ou nó de rede), trazendo um grande diferencial para a unificação do plano de controle, pois torna computacional caminhos ou rotas da rede. Dessa maneira, retira toda a complexidade dos processos computacionais dos nós de redes e unifica a tomada de decisão. Além disso, aplica políticas de restrições para rede e opera com dois principais tipos de informações, o Link State (LS) e o Traffic Engineering (TE), criando as bases de dados Link State Database (LSDB) e Traffic Engineering Database (TED)

[Zhou et al. 2016, Mirkhanzadeh et al. 2018].

As organizações ONF e OIF estão trabalhando para criação de um padrão de PCE que utilize protocolos OpenFlow. No entanto, para telecomunicações, em ambiente legado, ainda há grandes dificuldades [Lopez et al. 2016, Alvizu et al. 2017].

Outras funcionalidades a serem ressaltadas nos Controllers SDN são os suportes a protocolos de segurança e criptografia, além de interoperabilidade com diferentes fabricantes de Controller SDN por meio das interfaces Westbound e Eastbound.

3. Metodologia para Revisão da Literatura

A seção 3 tem como principal objetivo descrever o protocolo de estudo, assim como detalhar o processo e tomada de decisão para a seleção dos requisitos e atributos da pesquisa. Para determinação dos requisitos e atributos, foram utilizados parâmetros emergentes dos referenciais teóricos dos principais dos órgãos recomendadores, além de referências técnicas e testes realizados por operadoras de telecomunicações e fabricantes de equipamentos.

Entre as principais referências para a elaboração da metodologia, encontram-se as [Ong 2017, Brown et al. 2017] dos órgãos ONF e OIF que foram utilizadas como base para os requisitos de análise, uma vez que estão concentrando todas as normativas, padronizações e testes em conjunto com outros órgãos (IEEE, ETSI, ITU-T, MEF, IETF e outros), com os principais fabricantes e com as principais eminentes operadoras mundiais. A referência [Verizon 2016], desenvolvida pela operadora americana Verizon apresentou, para o mercado, um documento no qual detalha as suas intenções de aplicações das novas tecnologias fim-a-fim para a sua rede, incluindo unificação da camada de pacotes e óptica. A operadora americana, AT&T, desenvolveu um trabalho semelhante a Verizon [AT&T 2013], estudo que também foi levado em consideração para levantamento dos requisitos. O documento [Javier et al. 2014], é um whitepaper gerado pelas principais empresas de telecomunicações no mundo, tais como Telefônica, Orange, British Telecom, Telecom Itália, Deutsche Telecom, Korea Telecom, China Unicom e outras, foi utilizado como referência para levantamento das exigências. Neste documento, as operadoras propõem seus principais estudos de casos e preceitos técnicos para a convergência entre as camadas de pacotes e óptica, bem como detalham seus interesses específicos ligados a suas estratégias de mercado. O disruptivo trial realizado pela empresa de tecnologia Sedona, em conjunto com a operadora Telefônica e os fabricantes Juniper, Cisco, Huawei, Ciena, Coriant e Infinera, também foi utilizado como base para o levantamento dos requisitos [Gerstel et al. 2015]. Outro relevante trial foi desenvolvido pela operadora Rostelecom [Team Rostelecom 2017]. Em conjunto com os fabricantes NEC, Huawei e Nokia foi reproduzido um teste de sucesso na unificação do plano de controle das camadas de pacotes e óptica.

A partir da análise das referências detalhadas anteriormente, foi possível constatar que os Controllers SDN possuem muitos requisitos e grande diversificação de soluções, além de constantes perspectivas de atualizações de suas funcionalidades. Sendo assim, os itens abaixo expõem os principais requisitos apresentados nas referências anteriores, servindo também como base para a criação da tabela comparativa 1 proposta no presente manuscrito:

- Protocolos utilizados pelas interfaces Southbound e Northbound.

- Controller SDN utilizado pelo fabricante e a sua linguagem de programação primária.
- Tipo de Arquiteturas suportadas pelos fabricantes (centralizada ou distribuída), camadas de suporte Controller SDN e posicionamento do mesmo na arquitetura.
- Protocolos utilizados para unificação do plano de controle e ganhos de interoperabilidade entre as camadas de pacotes e óptica.
- Posicionamento de cada fabricante dentro da arquitetura e as camadas que o mesmo se propõe a operar.
- Unificações do plano de controle e protocolos suportados, suporte a multivendor, multicamada, multidomínio e rede legada.
- Avaliação do Controller SDN para requisitos relacionados a gerência de falhas, configurações, contabilização, desempenho e segurança. Este refere-se à sigla em inglês FCPAS (Fail, Configuration, Accounting, Performance e Security) e OAM.
- Suporte a aprendizagem de topologia de forma automática e inventário de rede.
- Engenharia de Tráfego, priorização de serviços, elasticidade, resiliência, automatização da rede e Share Link Risk Group (SRLG).
- Diferenciais comerciais e técnicos apresentados pelo fabricante.

Tendo por base os requisitos selecionados, os resultados da tabela comparativa 1 serão obtidos a partir de dados analisados segundo documentações dos próprios fabricantes em seus sites oficiais, datasheets e principais fóruns de discussão sobre a tecnologia SDN. Em muitos casos, os fabricantes possuem mais de uma solução, mas o enfoque da análise será a unificação das camadas de pacotes e óptica.

4. Análise Controllers SDN

A presente seção retrata o resultado da pesquisa no formato de tabela, 1, bem como a discussão das soluções presentes e o detalhamento elucidado dos Controllers SDN e respectivos fabricantes. A tabela 1 apresenta detalhamento sobre os requisitos de interfaces, APIs, sistemas operacionais, arquitetura, unificações de funções, interoperabilidade, funções de OAM, mapeamento de rede, resiliência e diferenciais.

Inicialmente, pode-se perceber que os principais fabricantes de redes de transporte de telecomunicações estão empenhados no desenvolvimento de soluções SDN baseados em Controllers SDN para unificação dos planos de controle das redes de pacotes e ópticas. Dessa forma, agregam interoperabilidade, funções de OAM, mapeamento de rede, resiliência, elasticidade, escalabilidade, entre outros.

De uma forma geral, os dois sistemas operacionais mais utilizados nos Controllers SDN são os sistemas open source Opendaylight (ODL) e o ONOS. Entretanto, alguns fabricantes desenvolvem o próprio sistema operacional, como os casos da Juniper, Nokia e a Coriant (esta última possui interoperabilidade com o Opendaylight). Apesar de utilizar o ONOS, a Huawei possui suporte para interoperabilidade com o Opendaylight e a Fujitsu possui uma solução que suporta ambas as plataformas.

Outro ponto analisado de forma ampla é o posicionamento dos Controllers SDN na arquitetura. Atualmente a maioria dos fabricantes já possui posicionamento de operação, tanto no modo client quanto no server. O modo server opera como um Controller SDN de outros Controllers SDN. Ainda há alguns fabricantes que não possuem posicionamento

de forma clara, como os casos da Huawei e Cisco, os quais disponibilizam-se para análise de soluções customizadas e cotações para maior detalhamento.

Ainda em uma análise abrangente, as soluções Controllers SDN conservam tendências estruturais a partir de estratégias técnicas e comerciais dos fabricantes. Um exemplo destas estratégias são as funções de gerenciamento de topologia e SRLG, que podem estar em Network Hypervisor diferentes ou comercializados separadamente. Outro requisito presente em todos os fabricantes é a computação por caminhos ou path computation (base de dados PCE), que é apresentada, majoritariamente, em uma máquina externa (física ou virtual) à máquina do Controller SDN, mas que pode ter variações em sua estrutura.

Em relação a interface Northbound, a padronização ainda encontra-se em desenvolvimento pelos principais órgãos recomendadores. No entanto, os fabricantes dos Controllers SDN tendenciam para o protocolo REST e algumas de suas variações, tais como o RESTful e RESTConf. A padronização da interface Northbound é fundamental para a proposta de interoperabilidade da tecnologia SDN. A interface Southbound possui um grande número de protocolos disponíveis para utilização e é peça fundamental para as funções de multicamada, multivendor, multidomínio e, conseqüentemente, unificação do plano de controle. Os fabricantes Huawei, Ericsson, Cisco, Juniper, Lumina, Nokia e Ciena suportam os principais protocolos, como Netconf, PCEP, BGP-LS, OpenFlow, BGP, SNMP, IGP e OVSDB. Os fabricantes Coriant e Fujitsu operam com os protocolos TL1, NETCONF e SNMP e a ECI opera com os protocolos BGP e Netconf.

A Coriant, com a solução Transcend, aborda um conceito sem solução multivendor, mas não utiliza, na interface Southbound, protocolos proprietários (o que no futuro pode facilitar evoluções). Contudo, a empresa não disponibiliza o protocolo Openflow para comunicação e explora os protocolos OTN, GMPLS e IP/MPLS para unificação do plano de controle dentro da sua solução proprietária. Ela também disponibiliza soluções de Controllers SDN distintos para as camadas de pacotes e óptica, além de um Controller SDN que opera como orquestrador multidomínio dos demais. Funções de monitoramento, performance, planejamento da rede e otimização são externas ao Controller SDN [Coriant 2018b, Coriant 2018a, SDN Central 2017].

Atualmente, a companhia Huawei possui o produto Agile Controller com um número alto de protocolos suportados pela interface Southbound. Além do RESTConf, suporta o YANG na interface Northbound, apesar de posicionar de forma centralizada ou distribuída. O Controller Agile possui suporte as camadas de pacotes e óptica, apesar dos testes executados possuírem maior ênfase na camada óptica. O material disponibilizado na mídia apresenta muitas informações não mencionadas para análise, como por exemplo, o suporte a multivendor. Como diferencial, traz a ideia de sustentabilidade ao produto e suporte a solução de Internet das Coisas [Huawei 2018a, Huawei 2018b, SDN Central 2017].

O Controller SDN da Ericsson, dispõe suporte nas duas camadas de maneira distribuída, podendo operar tanto como server quanto como client, sendo que, na camada de rede, utiliza os protocolos IP/MPLS para unificação do plano de controle, mas não especifica o protocolo na camada óptica. Ademais, apresenta uma solução totalmente open source, além de ter acordos de desenvolvimento com a Cisco e com operado-

ras de telecomunicações como a Telefônica e Swisscom. Da mesma maneira, propõe a integração com redes móveis e core IP Multimedia Subsystem (IMS) com foco em soluções em nuvem [Ericsson 2018].

A Cisco disponibiliza inúmeras soluções SDN, bem como Controllers SDN. O mais popular para redes de transporte é o Cisco Open SDN Controller, que opera apenas na camada de pacotes. No entanto, possui alta disposição para suporte multivendor, principalmente por meio dos protocolos OpenFlow e MPLS [Cisco 2018, SDN Central 2017].

A Juniper apresenta a solução NorthStar para Controller SDN, um ponto já citado, mas o que o difere das principais plataformas é que o software é proprietário. Apesar disso, a solução possui suporte para as camadas de pacotes e óptica, é flexível para operar de forma centralizada ou distribuída, além de disponibilizar os protocolos GMPLS e MPLS para unificação do plano de controle e suportar os principais requisitos avaliados na tabela comparativa. Como ponto forte, destaca-se pelo alto volume de testes e pela interface gráfica integrada para multicamada [Juniper 2018a, Juniper 2018b].

A Nokia desenvolveu a solução Nokia Network Services Platform proprietária, assim como a Juniper. Também opera nas camadas de pacotes e óptica de forma centralizada ou distribuída, mas com os protocolos OTN, GMPLS e MPLS para unificação do plano de controle. Uma das poucas informações não disponibilizadas é o suporte ao inventário. Nos demais, possui suporte completo, além de destacar a automatização da rede de forma integrada em única plataforma [Nokia 2018].

O Controller SDN da Lumina, antiga Brocade, opera apenas na camada de pacotes. Assim, seu Controller SDN posiciona-se como client, necessitando de um Controller SDN server para as funções de unificação do plano de controle da rede de transporte. Como ponto forte, possui suporte a multivendor e disponibilidade de diversos protocolos na interface Southbound [Brocade 2018, SDN Central 2017].

A Ciena desenvolveu o Blue Planet para Controller SDN. A solução apresenta disponibilidade majoritária nos requisitos analisados, operando também com o Controller SDN ONOS. Para unificação do plano de controle, utiliza as tecnologias OTN e MPLS, seguindo as tendências de mercado. Opera com suporte a inventário com multivendor e traz como diferencial a integração com o sistema Business Process Model and Notation (BPMN) como solução [Ciena 2018b, Ciena 2018a, SDN Central 2017].

A ECI, com a solução LightCONTROL, e a Fujitsu, com a solução Virtuora Network Controller, possuem plataformas equivalentes e semelhantes. No que diz respeito à interface Southbound, as soluções abrangem unificação do plano de controle para multicamada. A ECI especifica suporte à camada óptica para soluções Software Defined Optics Networking (SDON) [ECI 2018, Fujitsu 2018a, Fujitsu 2018b, Fujitsu 2018c].

A NEC apresenta a solução Netcracker e, apesar de pouco detalhamento da solução, está trabalhando em diversos testes em laboratório com operadoras de telecomunicações, como a Vodafone e a Rostelecom. No que se refere a Rostelecom, o teste posicionou o Netcracker como um Controller SDN server executando interoperabilidade com os Controllers SDN da Huawei e da Nokia [Team Rostelecom 2017, NEC 2018].

Tabela 1. Comparação Controllers SDN para redes de Telecomunicações

Vendors	Coriant	Huawei	Ericsson	Cisco	Juniper	Lumina	Nokia	Ciena	ECI	Fujitsu	NEC
Nome Controller	Transcend Symphony	Agile Controller	Cloud SDN	Open SDN Controller	NorthStar Controller	Lumina SDN Controller	Network Services Platform	Blue Planet	Light CON-TROL	Virtuora Network Controller	Netcracker
Interface Southbound	Netconf, SNMP, TL1, REST	BGP, Netconf, OpenFlow, OVSDB, SNMP, JSON-RPC	OpenFlow, OVSDB, BGP, NETCONF, PCEP, BGP-LS	OpenFlow, Netconf, BGP-LS, PCEP, OVSDB	OpenFlow, Netconf-YANG, BGP-LS, PCEP, SNMP	OpenFlow, Netconf-YANG, BGP-LS, PCEP, OVSDB	OpenFlow, Netconf-YANG, BGP-LS, PCEP, SNMP, CLI	OpenFlow, Netconf, RESTful API, CLI, TL1, SNMP	Netconf e outras	TL1, Netconf, SNMP	REST
Interface Northbound	REST	RESTful	RESTful API	REST	Restful-YANG	RESTCONF e Java	REST, RESTConf	REST, JSON	Não Espec.	Shared HTTPS para GUI e REST API	Não Espec.
Interface East/Westbound	IETF REST-YANG	Não Espec.	Não Espec.	REST APIs	Não Espec.	Não Espec.	Não Espec.	Não Espec.	Não Espec.	Não Espec.	Não Espec.
Sistema Operacional	Próprio, integração ODL	ONOS-ODL	ODL	ODL	Próprio	ODL	Próprio	ONOS	ONOS	ONOS-ODL	Não Espec.
Linguagem Sistema Operacional	C/C++, Java	Java, Python	Java	Não Espec.	C/C++, Java, Python	Java, Python	Não Espec.	Python, SCALA	Java	Java, Python	Não Espec.
Rede Suportada	IP-Óptica (aplicações distintas)	IP-Óptica	IP	IP	IP (suporte Controlers ópticos externos)	IP	IP-Óptica	IP-Óptica	IP-Óptica	IP-Óptica	IP-Óptica
Arquitetura	Centralizada e Distribuída	Centralizada e Distribuída	Distribuída	Distribuída	Centralizada e Distribuída	Não Espec.	Centralizada e Distribuída	Distribuída	Não Espec.	Distribuída	Centralizada e Distribuída
Tipo	Server e Client	Não Espec.	Server e Client	Não Espec.	Server e Client	Client	Server e Client	Server e Client	Server e Cliente	Client	Server e Cliente

Tabela 1-Continuação. Comparação Controllers SDN para redes de Transporte de Telecomunicações

Vendors	Coriant	Huawei	Ericsson	Cisco	Juniper	Lumina	Nokia	Ciena	ECI	Fujitsu	NEC
Nome Controller	Transcend Symphony	Agile Controller	Cloud SDN	Open SDN Controller	NorthStar Controller	Lumina SDN Controller	Network Services Platform	Blue Planet	Light CONTROL	Virtuora Network Controller	Netcracker
Multivendor	SIM	Não Espec.	SIM	Não Espec.	SIM	SIM	SIM	SIM	Não Espec.	SIM	SIM
Multidomínio	SIM	SIM	SIM	Não Espec.	SIM	Não Espec.	SIM	SIM	SIM	Não Espec.	SIM
Protocolos de Unificação	WDM/OTN, MPLS-TP e IP/MPLS	OTN e IP/MPLS	BGP/VPN e IP/MPLS	IP/MPLS	GMPLS e MPLS	Não Espec.	OTN e MPLS	Não Espec.	WDM/OTN e IP/MPLS	OTN e MPLS	Não Espec.
FCAPS	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	Não Espec.	SIM
Monitoração e Perfomance	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Aprendizagem de Topologia	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	Não Espec.	SIM	Não Espec.
Inventário	Não Espec.	SIM	Não Espec.	SIM	Não Espec.	Não Espec.	SIM	Não Espec.	Não Espec.	Não Espec.	Não Espec.
QoS	Não Espec.	Não Espec.	Não Espec.	Não Espec.	SIM	SIM	SIM	Não Espec.	Não Espec.	Não Espec.	Não Espec.
Banda sobre Demanda	SIM	SIM	SIM	Não Espec.	SIM	Não Espec.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Path Computation	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM - Protocolo	SIM	SIM	Não Espec.	SIM	Não Espec.
SRLG	SIM	SIM	Não Espec.	Não Espec.	SIM	Não Espec.	SIM	SIM	SIM	SIM	Não Espec.
Otimização Automática	SIM	SIM	SIM	Não Espec.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Aplicações diferenciadas	Solução atual apresenta arquitetura dividida em diferentes domínios	Solução possui suporte a IoT	Foco em solução Cloud	Customização de APIs em Java Interfaces web e Chrome e Firefox	Teste maduros e interface gráfica multiculturada disponível.	Propõe a solução não cria dependência do fornecedor	Automação de forma integrada em única plataforma proprietária	Integra o sistema BPMN.	Solução atual apresenta arquitetura dividida em diferentes domínios	Solução atual apresenta arquitetura dividida em diferentes domínios	Testes realizados com sucesso com os vendors Nokia e Huawei

5. Discussão, Desafios e Oportunidades

Com base na seção 4, é possível constatar que a unificação do plano de controle entre as camadas de pacotes e óptica encontra-se em um ritmo acelerado de desenvolvimento e com sólidos resultados. Também é possível constatar que, no centro de toda esta evolução, está a entidade Controller SDN e a sua importância na arquitetura para a unificação dos planos de controle. Apesar de apresentar muitas inovações, os resultados da seção 4 ainda apontam grande relevância nas redes e protocolos legados. Sendo assim, a presente seção contempla uma discussão dos principais resultados encontrados na pesquisa, detalhando também os principais desafios e oportunidades.

Referente às interfaces SDN, os resultados coletados mostram que as mesmas, apesar de grande evolução, ainda carecem de padronização e inovação. Como visualizado na tabela 1, uma vasta quantidade de protocolos é disponibilizada por cada SDN Controller. No que se refere a interface Southbound, o artigo [Alvizu et al. 2017] compartilha dois pontos relevantes. O primeiro, o padrão OpenFlow, ainda não cobre todas as propriedades da camada óptica, mas trabalha no desenvolvimento da nova extensão OpenFlow+ (OF+) para cobertura principalmente da camada física das redes ópticas. Como verificado na 1, a extensão OF+ ainda não foi disponibilizada pelos fabricantes de Controller SDN. O segundo, o protocolo NETCONF em conjunto com modelo YANG (NETCONF/YANG), tem apresentado maior destaque, pois ambos possuem maior adaptabilidade e capacidade de controle de redes heterogêneas. Entretanto, apesar da falta de padronização da interface Southbound, a conexão entre os dispositivos de rede e o SDN Controller é tratado com baixa complexidade e com facilidades de contorno. Por outro lado, a interface NorthBound é considerada de alta complexidade e relevância para adoção da tecnologia SDN na unificação das camadas de pacotes e óptica. Ademais, o protocolo REST surge como a principal linguagem utilizada nos Controllers SDN 1 devido às suas variações e flexibilidade com outros modelos. No entanto, decorrente de sua relevância, a interface Northbound possui destaque nos estudos dentro dos órgãos ONF e OIF em consequência da heterogeneidade das redes de transporte. Em andamento dentro dos órgãos, há o desenvolvimento da interface Transport-SDN (T-SDN) para aplicação na interface Northbound[Brown et al. 2017, Ong 2017]. A referência [Gerstel et al. 2015], introduz o T-API para um cenário de redes em operação e destaca quatro principais evoluções relacionadas a abstração da rede: (1) Topologia, (2) Requisições de conectividade, (3) Computação por caminho (path computation) e (4) Virtualização de rede para um conjunto de interfaces de serviço. No que tange às Interfaces East/Westbound, ainda são pouco exploradas pelo Controllers SDN, conforme apreciado no estudo 1,. Um ponto relevante para a baixa exploração das interfaces East/Westbound é a falta de padronização [Alvizu et al. 2017]. Entretanto, em contrapartida, sugere oportunidades de desenvolvimento.

Fazendo referência aos sistemas operacionais utilizados nos Controllers SDN, como resultado da pesquisa, é factível dividi-los em três principais recursos: (1) ONOS, (2) ODL e (3) sistemas proprietários. Atualmente, sistemas operacionais ONOS e ODL dividem o espaço na escolha dos fabricantes dos Controllers SDN. Contudo, o órgão ONF trabalha em um projeto específico com o ONOS, paralelo ao projeto Open and Disaggregated Transport Network (ODTN), que possui essência na camada óptica[ONF 2018]. Ambos os sistemas, ONOS e ODL, são predominantemente baseados em linguagem de programação Java. No que se refere aos sistemas proprietários, apenas o fabricante Cori-

ant se posicionou com interoperabilidade com os sistemas ODL. Tendo vista a unificação das camadas de pacotes e óptica, os sistemas proprietários possuem um grande desafio para obterem suporte à interoperabilidade e para estarem abertos a aplicações de fontes abertas.

Para os tópicos relacionados à arquitetura, os requisitos analisados são restritos e o resultado obtido apresenta homogeneidade. A maioria dos Controllers SDN dispõem de arquiteturas híbridas (centralizadas ou distribuídas), bem como suporte aos modos servidor e cliente. Em relação ao tipo de rede suportada (camada de pacotes ou óptica), as soluções suportam, majoritariamente, a camada de pacotes, uma vez que o desenvolvimento da tecnologia SDN pelo ONF ocorreu a partir da camada de pacotes. Por outro lado, a camada óptica é suportada por um número menor de Controllers SDN e, em muitos casos, com diversidade de arquiteturas. Com base nos resultados, também é razoável ponderar que a diferença de suporte dos Controllers SDN entre as camadas de pacotes e óptica é fruto da especialização de desenvolvimento dos fabricantes. Por exemplo, Cisco, Juniper e Lumina concentram um maior desenvolvimento em redes de pacotes. Contudo, a maior complexidade na camada óptica é apontada como o grande desafio em muitas referências [Alvizu et al. 2017, Gerstel et al. 2015, Lopez et al. 2016, Jia He et al. 2014] e estudos de caso [Malcolm Betts et al. 2014, Brown et al. 2017, Li 2014, Tofigh and Leenheer 2015], principalmente no que tange a camada física da pilha TCP/IP.

Dentro da proposta do artigo apresentado, os itens relacionados a unificação de funções e interoperabilidade são chaves para a pesquisa. Conforme resultados obtidos, a disponibilidade das funções de Multivendor, Multidomínio e Multicamada são predominantes nos Controllers SDN. No entanto, ensaios e testes, tais como [Brown et al. 2017, Li 2014, Ong 2017, Gerstel et al. 2015], retratam a necessidade de criação de uma hierarquia de Controllers SDN, Controllers SDN dedicados a camadas, domínios e fabricantes, além da utilização de um Orquestrador em alguns casos. Para o tópico Suporte a Rede Legada, conforme documentação dos fabricantes, massivamente o item é especificado. No entanto, o centro da especificação é a rede do próprio fabricante e não há detalhamento sobre interoperabilidade com outros fabricantes. No que se refere aos protocolos previstos para Unificação do Plano de Controle, os protocolos previstos pelos fabricantes ainda condizem com as tecnologias existentes. Os protocolos com maior volume de especificação são OTN, MPLS e extensões do MPLS (GMPLS e MPLS-TP). O artigo [Lopez et al. 2016] aborda o protocolo GMPLS como um possível habilitador da unificação dos planos de controle devido às seguintes características: descoberta automática de rede, reporte de recurso e gerenciamento, roteamento e flexibilidade na escolha dos caminhos. Todavia, as principais simulações de unificação de plano de controle pelo ONF [Brown et al. 2017, Li 2014, Ong 2017] utilizam o protocolo OpenFlow. Apesar de a maioria dos Controllers terem suporte para o protocolo OpenFlow, o processo de unificação dos planos de controle é pouco abordado nas informações dos Controllers SDN pelos fabricantes.

As funcionalidades relacionadas a OAM, tais como FCAPS, monitoramento e performance, foram abordadas nos resultados da pesquisa que trazem a especificação pelos fabricantes. No entanto, o objeto não dispõe de detalhamento, principalmente quando relacionado a interoperabilidade e protocolos. Para as redes ópticas,

a extensão em desenvolvimento pela ONF para a camada física da pilha TCP/IP prevê disponibilização das funções de OAM no protocolo OpenFlow e no protocolo T-API[Alvizu et al. 2017, Lopez et al. 2016]. Para as camadas de rede e enlace, da pilha TCP/IP, o protocolo OpenFlow possui suporte para as funções de OAM [Kreutz et al. 2015, Mitch Auster et al. 2014].

Outro recurso abordado na pesquisa, que é de grande expressão para a tecnologia SDN, além de determinante para a unificação dos planos de controle e abstração da rede, é o elemento PCE. Conforme esperado, no artigo em questão, o suporte ao elemento PCE é disponibilizado em todos os Controllers SDN. Porém, não há riqueza de detalhes na documentação disponibilizada referente a arquitetura e protocolos utilizados. Apesar do elemento ser responsável pela engenharia de tráfego, aprendizado de topologia e inventário. Na literatura, o elemento PCE pode ser implementado de duas formas[Martinez et al. 2014]: (1) dentro de um dispositivo de rede, operando como Label Switched Router (LSR) e (2) como servidor externo, como solução mais provável. O artigo [Lopez et al. 2016] propõe a utilização do elemento PCE ao protocolo GMPLS, que por sua vez, referencia a unificação dos planos de controle. O elemento PCE também agrega à arquitetura SDN serviços de topologia, tais como aprendizagem de topologia e inventário[Lopez et al. 2016]. Para as redes de transporte, o ONF vincula o elemento PCE e as facilidades de aprendizagem de topologia e inventário ao protocolo T-API[Brown et al. 2017].

Em se tratando de resiliência de rede, os Controllers SDN analisados dispõem de suporte, na sua maioria. Mesmo que as informações disponibilizadas pelos fabricantes não detalhem as aplicações dos recursos de resiliência, a literatura acadêmica e o ONF oferecem um vasto material com as aplicações. Em [EANTC 2017], por exemplo, são apresentados testes de SRLG e otimização de redes aplicados sob Controllers SDN da Huawei, Cisco, Nokia, Juniper e Ciena. No whitepaper [Team Rostelecom 2017] há uma abordagem detalhada sobre otimização de rede com diferentes composições com os fabricantes NEC, Huawei e Nokia. Apesar de banda sobre demanda (elasticidade de rede) ser um tema relevante para redes nos dias atuais, apenas em [Mitch Auster et al. 2014, Brown et al. 2017] é possível observar um estudo de caso sobre o tema. No entanto, esses autores não preveem aplicações com os fabricantes analisados.

Sob outra perspectiva, o tópico aplicações diferenciadas foi explorado na presente revisão. A partir deste, foi possível constatar que os Controllers SDN estão direcionados a cooperar com as principais inovações tecnológicas. Entre os resultados mais relevantes, destacam-se os seguintes fabricantes e suas inovações: a Huawei com o suporte a Internet das Coisas (IoT), a Ericsson com o foco em soluções em nuvem e a Ciena com a integração a sistemas BPMN.

6. Limitações

Este artigo apresenta um avanço significativo no que diz respeito a evolução de novas tecnologias e arquiteturas para redes de telecomunicações. No entanto, também expõe as limitações e carências para implementação de forma massiva. Apesar da Tecnologia SDN possuir um desenvolvimento continuado pelo órgão ONF e os principais sistemas operacionais dos Controllers SDN serem open source, as redes de telecomunicações ainda não possuem um padrão e um plano definido para unificação das camadas de pacotes e óptica.

Conforme discutido na seção 5, muitos testes e ensaios foram realizados entre os fabricantes dos Controllers SDN analisados, e, mesmo assim ainda não existem diagnósticos conclusivos e implementações em planta ativa. Contudo, os dispositivos comercializados já apresentam suporte a OpenFlow, trazendo, assim, visibilidade de futuras evoluções.

Para a unificação dos planos de controle das camadas de pacotes e óptica, a inserção dos dispositivos ópticos surge como limitador. O principal limitador é o desenvolvimento da camada física para com os protocolos e arquitetura SDN.

As redes legadas também aparecem entre os principais limitantes para o sucesso do SDN e consequente unificação dos planos de controle das camadas de pacotes e óptica. Conforme analisado neste artigo, as redes legadas possuem muitos protocolos em operação, enquanto o principal desenvolvimento é gerado por meio do protocolo OpenFlow. Sendo assim, para uma evolução que contemple tanto rede legada quanto novas redes, faz-se necessário alto volume de interoperabilidade de redes.

7. Conclusão

A inovação proposta pela tecnologia SDN e a utilização do Controller SDN para unificação dos planos de controle das camadas de pacotes e óptica apesar de ainda não estar consolidada e padronizada, tem sido, neste momento, uma realidade para o direcionamento das redes futuras de transporte de telecomunicações. A proposta de unificação entre as camadas traz para a rede uma maior capacidade de gestão, resiliência, elasticidade, automatização e ganhos operacionais. Além disso, o desenvolvimento da solução está diretamente conectado às redes legadas, prevendo, assim, uma reutilização dos dispositivos em funcionamento em planta. O resultado da pesquisa, evidenciado principalmente na tabela comparativa dos principais desenvolvedores da atualidade, proporciona uma reflexão entre as principais soluções disponíveis de Controllers SDN na indústria, assim como suas características, suporte e possibilidades de aplicação.

As soluções Controllers SDN apresentadas pelos fabricantes do ramo de telecomunicações podem ser utilizadas como contribuição técnica de forma analítica, bem como de forma orientativa na tomada de decisão de soluções customizadas. No campo acadêmico, o artigo contribui apresentando oportunidades de pesquisa e desenvolvimento devido ao fato de a padronização não estar consolidada e os requisitos ainda possuírem carência de inovações que venham a agregar na aplicação. Vale destacar que as transformações apontadas oportunizam a evolução nos serviços de telecomunicações à sociedade, em que se destacam itens como: resiliência; qualidade e incremento de banda, habilitando as redes para melhoria nos serviços vigentes, redes do futuro, tais como 5G e o desenvolvimentos de novas aplicações.

Referências

- Alvizu, R., Maier, G., Kukreja, N., Pattavina, A., Morro, R., Capello, A., and Cavazzoni, C. (2017). Comprehensive survey on t-sdn: Software-defined networking for transport networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(4):2232–2283. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2715220>.
- AT&T (2013). *AT&T Domain 2.0 Vision White Paper*. AT&T. Disponível em https://www.att.com/Common/about_us/pdf/AT\&T\%20Domain\%202.0\%20Vision\%20White\%20Paper.pdf (Acessado 30 Março 2018).

- Brocade (2018). *Lumina SDN Controller*. Disponível em "https://d17alyvefnsmqz.cloudfront.net/wp-content/uploads/2017/08/07031442/Lumina-SDN-Controller-Data-Sheet.pdf (Acessado 18 Março 2018).
- Brown, D., Gerstel, O., Kaczmarek, P., Landon, P., López, V., Ong, L., Sadler, J., Sethuraman, K., Shukla, V., and Vilalta, R. (2017). *SDN Transport API Interoperability Demonstration*. Open Networking Foundation (ONF) e Optical Interworking Forum (OIF). Disponível em <http://www.oiforum.com/wp-content/uploads/OIF-ONF-2016-SDN-T-API-Interop-Demo-whitepaper.pdf> (Acessado 30 Março 2018).
- Cardoso and Fernandes, R. F. (2015). *Uma abordagem SDN para o controlo e admissão de tráfego*. Mestrado em engenharia eletrotécnica e de computadores, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Ciena (2018a). *Blue Planet Intelligent Automation Platform*. Disponível em <http://media.ciena.com/documents/Blue-Planet-Intelligent-Automation-Platform-PB.pdf> (Acessado 18 Março 2018).
- Ciena (2018b). *BLUE PLANET SERVICES*. Disponível em <http://media.ciena.com/documents/Blue-Planet-Services-DS.pdf> (Acessado 18 Março 2018).
- Cisco (2018). *Cisco Open SDN Controller 1.2 Data Sheet*. Disponível em "https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/cloud-systems-management/open-sdn-controller/datasheet-c78-733458.html (Acessado 18 Março 2018).
- Coriant (2018a). *Coriant Transcend™ SDN Packet Controller*. Disponível em "http://http://cdn.extranet.coriant.com/resources/Data-Sheets/DS_Coriant_Transcend_Symphony_for_Packet_74C0203.pdf?mtime=20180206032320 (Acessado 31 Março 2018).
- Coriant (2018b). *Coriant Transcend™ SDN Transport Controller*. Disponível em http://cdn.extranet.coriant.com/resources/Data-Sheets/DS_Transcend_Chorus_for_Transport_74C0206.pdf?mtime=20180206032334 (Acessado 31 Março 2018).
- Das, S. (2012). *PAC. C: A unified control architecture for packet and circuit network convergence*. Philosophy doctor of electrical engineering, Citeseer, Stanford, United States.
- EANTC (2017). *The SDN Solutions Showcase*. Open Networking Foundation (ONF). Disponível em https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/white-papers/ONF_SDN%20Solutions%20Showcase%20WhitePaper_2015.pdf (Acessado 30 Março 2018).
- ECI (2018). *LightCONTROL-SDN NEPTUNE*. Disponível em <http://www.ecitele.com/media/1384/neptune-brochure-full.pdf> (Acessado 18 Março 2018).

- Ericsson (2018). *Ericsson SDN Controller*. Disponível em "https://www.sdxcentral.com/products/ericsson-cloud-sdn/reports/2017/network-virtualization-sdn-controller/" (Acessado 18 Março 2018)".
- Favoreto, F. P. (2009). *Plano de Controle GMPLS para redes Ópticas de Transporte*. Mestrado em engenharia elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, Brasil.
- Fujitsu (2018a). *Virtuora Network Controller*. Disponível em <http://www.fujitsu.com/us/Images/Virtuora-NC-ds.pdf> (Acessado 30 Março 2018).
- Fujitsu (2018b). *Virtuora OTN Control Suite*. Disponível em <http://www.fujitsu.com/us/Images/Virtuora-Product-Suite.pdf> (Acessado 18 Março 2018).
- Fujitsu (2018c). *Virtuora Packet Control Suite*. Disponível em <http://www.fujitsu.com/us/Images/FNC-Fujitsu-Virtuora-Packet-Control-Suite.pdf> (Acessado 18 Março 2018).
- Gerlach, C. and Foisel, H. M. (2013). *OIF Carrier WG Requirements on Transport Networks in SDN Architectures Transport SDN*. Optical Internetworking Forum (OIF), Fremont, Califórnia, United States. Disponível em http://www.oiforum.com/wp-content/uploads/OIF_Carrier_WG_Requirements_on_Transport_Networks_in_SDN_Architectures_Sept2013.pdf (Acessado 30 Março 2018).
- Gerstel, Ori, and Lopez, V. (2015). The need for sdn in orchestration of ip over optical multi-vendor networks. In *Optical Communication (ECOC), 2015 European Conference on*, pages 1–3, Valencia, Spain. IEEE. Disponível em <https://doi.org/10.1109/ECOC.2015.7341833>.
- Gringeri, S., Bitar, N., and Xia, T. J. (2013). Extending software defined network principles to include optical transport. *IEEE Communications Magazine*, 51(3):32–40. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2013.6476863>.
- Haddaji, N., Nguyen, K., and Cheriet, M. (2018). Towards end-to-end integrated optical packet network: Empirical analysis. *Optical Switching and Networking*, 27:18–39. <https://doi.org/10.1016/j.osn.2017.06.003>.
- Huawei (2018a). *Agile Controller-T*. Disponível em "http://e.huawei.com/en/products/enterprise-networking/sdn-controller/agile-controller/transport" (Acessado 18 Março 2018).
- Huawei (2018b). *Agile Controller-WAN*. Disponível em "http://e.huawei.com/en/products/enterprise-networking/sdn-controller/agile-controller/wan#" (Acessado 18 Março 2018).
- Javier, F., Cauchie, Mexico, A., Rios, B. T. G., Lemonnier, N., Davey, B. R., Shakir, R., Lord, A., Guangquan, W., Xiaoxia, Z., Fischbach, C. N., et al. (2014). *IP and Optical Convergence: Use Cases and Technical Requirements*. Telefónica

- Investigación y Desarrollo. Disponível em http://www.tid.es/sites/526e527928a32d6a7400007f/assets/532c7ce328a32d4d710006bd/White_paper_IP_Optical_Convergence__1_.pdf(Acessado 30 Março 2018).
- Jia He, D. H., Young Lee, L. O., Karthik Sethuraman, V. S., and Varma, E. (2014). *Requirements Analysis for Transport OpenFlow/SDN*. Open Network Foudantion (ONF), Palo Alto, Califórnia, United States. Disponível em https://3vf60mmveq1g8vzn48q2o71a-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2013/04/onf2014.227_Optical_Transport_Requirements.pdf (Acessado 30 Março 2018).
- Juniper (2018a). *NorthStar Controller*. Disponível em "https://www.juniper.net/assets/us/en/local/pdf/datasheets/1000494-en.pdf (Acessado 18 Março 2018).
- Juniper (2018b). *NorthStar Controller—Multilayer SDN Coordination and Optimization*. Disponível em "https://www.juniper.net/assets/us/en/local/pdf/whitepapers/2000615-en.pdf (Acessado 18 Março 2018).
- Kreutz, D., Ramos, F. M., Verissimo, P. E., Rothenberg, C. E., Azodolmolky, S., and Uhlig, S. (2015). Software-defined networking: A comprehensive survey. *Proceedings of the IEEE*, 103(1):14–76. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2371999>.
- Li, J. (2014). *Global Transport SDN Prototype Demonstration*. Optical Internetworking Forum (OIF) and China Telecom. Disponível em <http://www.oiforum.com/wp-content/uploads/Singapore-OIF-Transport-SDN-Junjie-Li.pdf> (Acessado 30 Março 2018).
- Lopez, V., Contreras, L. M., de Dios, O. G., and Palacios, J. P. F. (2016). Towards a transport sdn for carriers networks: An evolutionary perspective. In *Networks and Optical Communications (NOC), 2016 21st European Conference on*, pages 52–57, Lisbon, Portugal. IEEE. Disponível em <https://doi.org/10.1109/NOC.2016.7506985>.
- Malcolm Betts, T. S. C., Nigel Davis, P. D., Luyuan Fang, T. G., Marshall Ha, J. H., Richard King, K. L., Victor Liu, V. L., Ben Mack-Crane, G. M., Lyndon Ong (Editor, Use Case 4), E. K. P., Ping Pan, J. S., Mohammad Sarwar, K. S., Sejun Song, E. V., Maarten Vissers, W. D. Y., and Wei, X. D. (2014). *Optical Transport Use Cases*. Open Networking Foundation (ONF), Palo Alto, Califórnia, United States. Disponível em <https://3vf60mmveq1g8vzn48q2o71a-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2013/04/optical-t-transport-use-cases.pdf> (Acessado 30 Março 2018).
- Martinez, A., Yannuzzi, M., Lopez, V., Lopez, D., Ramirez, W., Serral-Gracia, R., Masip-Bruin, X., Maciejewski, M., and Altmann, J. (2014). Network management challenges and trends in multi-layer and multi-vendor settings for carrier-grade networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16(4):2207–2230. <https://doi.org/10.1109/COMST.2014.2327754>.

- Mirkhanzadeh, B., Shakeri, A., Shao, C., Razo, M., Tacca, M., Galimberti, G. M., Martinnelli, G., Cardani, M., and Fumagalli, A. (2018). An sdn-enabled multi-layer protection and restoration mechanism. *Optical Switching and Networking*.
- Mitch Auster, S. B., Mike McBride, G. N., Lyndon Ong, M. S., Vishnu Shukla, A. T., and Vissers, M. (2014). *OpenFlow-enabled Transport SDN*. Open Network Foundation (ONF). Disponível em <https://www.opennetworking.org/wp-content/uploads/2013/05/sb-of-enabled-transport-sdn.pdf> (Acessado 30 Março 2018).
- NEC (2018). *NEC/Netcracker Transport SDN Solution*. Disponível em <https://www.netcracker.com/download-mkt-file.html?file=22009> (Acessado 18 Março 2018).
- Nokia (2018). *Deploying SDN for operational efficiency and service velocity in IP/optical networks*. Disponível em https://onestore.nokia.com/asset/201789/Nokia_Multilayer_NRC-X_Application_Note_EN.pdf (Acessado 18 Março 2018).
- ONF (2018). *ONOS Project*. Disponível em <https://www.opennetworking.org/onos> (Acessado 13 outubro 2018).
- Ong, L. Y. (2017). Onf sdn architecture and standards for transport networks. In *Optical Fiber Communication Conference*, pages M2H-1, Los Angeles, California, United States. Optical Society of America. <https://doi.org/10.1364/OFC.2017.M2H.1>.
- SDN Central, L. (2017). *The Future of Network Virtualization and SDN Controllers*. SDxCentral, California, United States. Disponível em <https://www.sdxcentral.com/reports/network-virtualization-sdn-controllers-download-2017> (Acessado 30 Março 2018).
- Sood, M. et al. (2014). Software defined network—architectures. In *Parallel, Distributed and Grid Computing (PDGC), 2014 International Conference on*, pages 451-456, Solan, India. IEEE. Disponível em <https://doi.org/10.1109/PDGC.2014.7030788>.
- Team Rostelecom (2017). *Rostelecom Transport SDN successful Interoperability Proof of Concept with Huawei, NEC/Netcracker and Nokia*. Rostelecom, Moscow, Russian. Disponível em https://www.rostelecom.ru/en/about/net/White_Paper_Rostelecom_v0.8_eng.pdf/ (Acessado 28 Março 2018).
- Tofigh, T. and Leenheer, M. D. (2015). *Converged Packet-Optical Software Defined Networking*. AT&T and ON.LAB, San Jose, California, United States. Disponível em http://computer.ieeesiliconvalley.org/wp-content/uploads/sites/2/2015/08/2015-09-15_Converged-Packet-Optical-Software-Defined-Networking.pdf (Acessado 30 Março 2018).
- Verizon (2016). *Verizon Network Infrastructure Planning - SDN-NFV Reference Architecture*. Verizon. Disponível em <http://innovation.verizon>.

com/content/dam/vic/PDF/Verizon_SDN-NFV_Reference_Architecture.pdf (Acessado 30 Março 2018).

- Zhang, T., Giaccone, P., Bianco, A., and De Domenico, S. (2017). The role of the inter-controller consensus in the placement of distributed sdn controllers. *Computer Communications*, 113:1–13.
- Zhou, Y., Yin, S., Guo, B., Huang, H., Li, W., Zhang, M., and Huang, S. (2016). Experimental demonstration of software-defined optical network for heterogeneous packet and optical networks. *Photonic Network Communications*, 32(2):329–335. <https://doi.org/10.1007/s11107-016-0611-x/>.