



UNIFACS
UNIVERSIDADE SALVADOR
LAUREATE INTERNATIONAL UNIVERSITIES®

MESTRADO EM SISTEMAS E COMPUTAÇÃO

CARLOS ROGÉRIO SANTOS ARISTIDES

**ADOÇÃO DE REDES HÍBRIDAS: UMA ABORDAGEM GENÉRICA PARA MIGRAÇÃO
DE REDES TRADICIONAIS PARA REDES DEFINIDAS POR SOFTWARE (SDN)**

Salvador
2021

CARLOS ROGÉRIO SANTOS ARISTIDES

**ADOÇÃO DE REDES HÍBRIDAS: UMA ABORDAGEM GENÉRICA PARA MIGRAÇÃO
DE REDES TRADICIONAIS PARA REDES DEFINIDAS POR SOFTWARE (SDN)**

Dissertação apresentada ao Mestrado em Sistemas e Computação da Universidade Salvador - UNIFACS, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Nazareno Maia Sampaio.

Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UNIFACS Universidade Salvador, Laureate Internacional Universities.

Aristides, Carlos Rogério Santos

Adoção de redes híbridas: uma abordagem genérica para migração de redes tradicionais para redes definidas por software (SDN). / Carlos Rogério Santos Aristides.- Salvador, 2021.

101 f.: il.

Dissertação apresentada ao Mestrado em Sistemas e Computação da Universidade Salvador - UNIFACS, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Nazareno Maia Sampaio.

1. Rede de computadores. 2. Indústria 4.0. 3. Hibridização. 4. Multiprotocol Label Switching (MPLS). 5. Redes Definidas por Software (SDN). I. Sampaio, Paulo Nazareno Maia, orient. II. Título.

CDD: 004.62

Dedico este trabalho aos meus pais: Antônio e Rosemere, em especial a minha mãe que não mediu esforços para que eu alcançasse este objetivo. Também a todos meus irmão e familiares pela paciência e compreensão das minhas ausências.

AGRADECIMENTOS

A Deus e a Meishu-Sama pela vida e todas as realizações.

A todos os docentes do Programa de Pós-Graduação em Sistemas e Computação da UNIFACS que sempre se empenharam para proporcionar um excelente ambiente de ensino e a melhor experiência de aprendizagem.

Ao professor orientador, Prof. Dr. Paulo Sampaio, pelo apoio, profissionalismo e orientação com a qual me conduziu na elaboração desta dissertação de mestrado.

À FAPESP por viabilizar a minha caminhada nesse curso de mestrado, através da bolsa de estudos, tornando possível a minha realização acadêmica e profissional.

À minha mãe por todas as orações e apoio, a meus familiares e amigos Rogério Mota, Felipe Lira, Ives Seixas e Claudio Oliveira que de alguma forma contribuíram para que o objetivo fosse alcançado.

RESUMO

A evolução tecnológica vivida nos últimos 20 anos tem produzido uma série de benefícios a humanidade, especialmente na área de informática, onde ações anteriormente inimagináveis são plenamente possíveis na atualidade. Esses avanços, principalmente aqueles propiciados pela Internet, tem permitido dentre outras a informação em tempo real, o encurtamento da distância no envio de informações e dados e, a possibilidade de maior automação das máquinas no ambiente industrial. Nesse sentido as redes de computadores têm papel preponderante, ao possibilitar a conexão de diversos equipamentos e o transporte de dados em alta velocidade, facilitando assim, principalmente, o trabalho nas empresas. É nesse contexto de desenvolvimento que surge a Indústria 4.0, como paradigma da evolução dos processos de automação industrial, requerendo a existência de redes mais eficientes e com maior capacidade de transmissão de dados. Diante desta demanda a Rede Definida por Software (SDN) se apresenta como uma solução ideal para a questão. Diante dessa perspectiva surge a motivação para este estudo, no sentido de demonstrar a viabilidade do uso das redes SDN na Indústria 4.0 em substituição as redes tradicionais, mais precisamente, o *Multiprotocol Label Switching* (MPLS). Para tanto, foram desenvolvidos experimentos com a finalidade de promover tal migração, onde se testou a possibilidade de hibridização das redes MPLS/SDN, de modo a garantir uma transição sem perdas e prejuízos para as empresas. Diante desse contexto, o objetivo geral desta dissertação é: apresentar o estudo e a proposta de um modelo para a migração de redes tradicionais para redes SDN, passando pelas redes híbridas, no contexto das redes industriais, identificadas pelo modelo da Indústria 4.0. Metodologicamente a dissertação é composta de uma pesquisa bibliográfica, que a fundamenta, trazendo inclusive, todo o subsídio teórico/metodológico para o desenvolvimento do estudo de caso, que consistiu no desenvolvimento de experimentos destinados a verificar a viabilidade da implantação da rede SDN a partir da hibridização da rede MPLS original. O qual foi demonstrado pelos resultados apresentados pelo estudo: a viabilidade da aplicação da hibridização no processo de migração para a rede SDN, ainda que o desempenho tenha sido inferior ao da rede original.

Palavras-chave: Rede de computadores, Indústria 4.0, Hibridização, *Multiprotocol Label Switching* (MPLS), Redes Definidas por Software (SDN), Migração.

ABSTRACT

The technological evolution experienced in the last 20 years has produced a series of benefits for humanity, especially in the area of information technology, where previously unimaginable actions are fully possible today. These advances, especially those provided by the Internet, have allowed, among others, the delivery of information in real time, the shortening of the distance in sending information and data and the possibility of greater automation of machines in the industrial environment. In this sense, computer networks play a leading role, as they enable the connection of various equipment and the transport of data at high speed, thus facilitating, mainly, work in companies. In this context, Industry 4.0 emerges as a paradigm related to evolution of industrial automation processes, requiring the existence of more efficient, more flexible, easy-to-manage networks with greater capacity for data transmission. In order to cope with this demand, the Software Defined Networks (SDNs) paradigm presents itself as an ideal solution to the issue, due to its characteristics as greater control with greater speed and flexibility; offers a customizable network infrastructure, and; ensures a more secure access to the network. However, the migration of traditional networks used in industrial plant infrastructures, usually related to Multiprotocol Label Switching (MPLS) technology has its price, the impossibility of a complete migration to SDN without interrupting the production process. In this scenario, the motivation for carrying out this work is the investigation of the migration process from traditional networks to SDN networks, going through an incremental process called network hybridization. For this purpose, a literature review was carried out in order to determine the efforts made to promote this migration, identifying the best practices, benefits, and their advantages and disadvantages. The purpose of this work is to propose a generic and incremental approach, in the context of industrial networks identified by the Industry 4.0 model, for the migration of traditional networks to SDN networks, through hybrid MPLS / SDN networks, in order to guarantee a transition without losses for the companies. To carry out this work, a bibliographic review was carried out, in order to obtain all theoretical and conceptual support for the identification of the main requirements of Industry 4.0 oriented to computer systems, in particular to computer networks, as the presentation of concepts, characteristics and benefits of hybrid networks. An experimental study was also carried out in order to validate and illustrate the proposed approach. For this purpose, the simulation and quantitative analysis of the simulation results allowed the assessment of the benefits of networking migration in the applied industrial context.

Keywords: Computer networks, Industry 4.0, Hybridization, Multiprotocol Label Switching (MPLS), Software Defined Networks (SDN), Migration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação das arquiteturas tradicional e SDN	23
Figura 2 - Visão simplificada da SDN.....	23
Figura 3 - Componentes principais de um <i>switch OpenFlow</i>	27
Figura 4 - Projeto da camada de comunicação com um exemplo de caminho fim-a-fim	35
Figura 5 - Modelos SDN híbridos classificados com base na arquitetura e componentes.....	54
Figura 6 - Abordagens de migração	62
Figura 7 - Equipamento SDN Híbrido	63
Figura 8 - Topologia de Rede MPLS	68
Figura 9 - Tráfego voip UDP melhor esforço para rede MPLS	72
Figura 10 - Tráfego banco de dados (TCP) melhor esforço para rede MPLS	73
Figura 11 - Tráfego para <i>streaming</i> de vídeo (UDP) melhor esforço para MPLS.....	74
Figura 12 - Tráfego VoIP com contingenciamento para rede MPLS	75
Figura 13 - Tráfego de banco de dados com contingenciamento para MPLS.....	76
Figura 14 - Tráfego <i>streaming</i> de vídeo com contingenciamento para MPLS.....	77
Figura 15 - Ilustração de uma topologia de rede MPLS	78
Figura 16 - Ilustração de uma topologia de rede híbrida	80
Figura 17 - Tráfego VoIP melhor esforço para rede híbrida	83
Figura 18 - Tráfego para banco de dados melhor esforço para rede híbrida	84
Figura 19 - Tráfego <i>streaming</i> de vídeo melhor esforço para rede híbrida	85
Figura 20 - Tráfego VoIP com contingenciamento para rede híbrida	86
Figura 21 - Tráfego banco de dados com contingenciamento para rede híbrida	87
Figura 22 - Tráfego Streaming de vídeo com contingenciamento para rede híbrida	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Definições das Aplicações utilizadas.....	68
Tabela 2 - Tabela de tráfegos utilizados	70
Tabela 3 - Métricas de tráfego.....	71

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Resultado tráfego VoIP melhor esforço para rede MPLS	72
Gráfico 2 - Resultado do tráfego tcp melhor esforço rede mpls	73
Gráfico 3 - Resultados tráfego para <i>streaming</i> de vídeo (UDP) melhor esforço rede MPLS	74
Gráfico 4 - Resultado tráfego VoIP com contingenciamento para rede MPLS	75
Gráfico 5 - Resultado do tráfego banco de dados com contingenciamento para rede MPLS	76
Gráfico 6 - Resultado do tráfego de <i>streaming</i> de vídeo com contingenciamento para rede MPLS	77
Gráfico 7 - Resultado VoIP melhor esforço para rede híbrida	83
Gráfico 8 - Resultado do tráfego de banco de dados melhor esforço para rede híbrida	84
Gráfico 9 - Resultado <i>streaming</i> de vídeo melhor esforço para rede híbrida	85
Gráfico 10 - Resultado VoIP com contingenciamento para rede híbrida	86
Gráfico 11 - Resultado banco de dados com contingenciamento para rede híbrida	87
Gráfico 12 - Resultado <i>streaming</i> de vídeo com contingenciamento para rede híbrida	88

LISTA DE ACRÔNIMOS

AS	<i>Autonomous System</i>
APIs	Interfaces de Programação de Aplicativos
ARP	<i>Address Resolution Protocol</i>
ARPANET	<i>Advanced Research Projects Agency Network</i>
ATM	<i>Synchronous Transfer Mode</i>
CEF	<i>Cisco Express Forwarding</i>
FECs	<i>Forwarding Equivalent Classes</i>
FIB	<i>Forwarding Information Base</i>
GNS3	<i>Graphical Network Simulator 3</i>
IEEE	<i>Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos</i>
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i>
IGP	<i>Interior Gateway Protocol</i>
IoT	Internet das Coisas
IP	<i>Internet Protocol</i>
ISPs	Provedores de Serviços de Internet
LFIB	Base de Informação de Encaminhamento de Rótulo
LIB	Base de Informações do Rótulo
LLDP	Protocolo de Descoberta de Camada de Enlace
LSPs	<i>Label Switched Paths</i>
LSRs	<i>Label Switched Routers</i>
MPLS	<i>Multiprotocol label Switching</i>
NFV	<i>Network Function Virtualization</i>
ODL	<i>OpenDaylight Project</i>
ONF	<i>Open Networking Foundation</i>
ONOS	<i>Open Network Operating System</i>
OSI	<i>Open System Interconnection</i>
OSPF	<i>Open Shortest Path First</i>
OVSDB	<i>Open vSwitch Database Management Protocol</i>

PCMM	<i>Packet Cable Multi Media</i>
QoS	Qualidade de Serviço
RAMI	<i>Reference Architecture Model of Industry</i>
RFC	<i>Request for Comments</i>
RIB	<i>Routing Information Base</i>
SDN	<i>Software Defined Networking</i>
SLA	<i>Service Level Agreement</i>
STP	<i>Spanning Tree Protocol</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TE	Engenharia de Tráfego
TICs	Tecnologias de Informação e Comunicação
TLS	<i>Transport Layer Security</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
VPN	<i>Virtual Private Network</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	14
1.2 PROBLEMÁTICA	15
1.3 MOTIVAÇÃO	16
1.4 OBJETIVOS	16
1.5 METODOLOGIA	17
1.6 CONTRIBUIÇÕES E RESULTADOS ALCANÇADOS	17
1.7 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	18
2 REVISÃO CONCEITUAL E DE LITERATURA	20
2.1 INTRODUÇÃO	20
2.2 CONCEITOS E DEFINIÇÕES	21
2.3 REDES DEFINIDAS POR SOFTWARE	21
2.3.1 Controladores SDN	24
2.3.2. OpenFlow	25
2.4 REDE DE COMPUTADORES	29
2.5 REDES MPLS	30
2.6 INDÚSTRIA 4.0	33
2.7 TRABALHOS RELACIONADOS	37
2.8 CONCLUSÃO	45
3 REDES HÍBRIDAS: CARACTERÍSTICAS E DESAFIOS DE IMPLANTAÇÃO	47
3.1 DEFINIÇÕES	47
3.2 CARACTERÍSTICAS	48
3.3 REQUISITOS	49
3.4 TIPOS DE REDES HÍBRIDAS	51
3.5 VANTAGENS E DIFICULDADES NA IMPLANTAÇÃO DE REDES HÍBRIDAS ..	55
3.6 CONCLUSÕES	59

4 MIGRAÇÃO PARA REDES HÍBRIDAS: ESTUDO EXPERIMENTAL.....	61
4.1 INTRODUÇÃO	61
4.2 CONSIDERAÇÕES DE MIGRAÇÃO	61
4.3 ABORDAGEM DE MIGRAÇÃO PARA REDES HÍBRIDAS.....	63
4.4 CENÁRIOS EXPERIMENTAIS.....	66
4.4.1 Caracterização do experimento	67
4.4.2 Rede Legada MPLS	67
4.4.3 Definição das aplicações usadas	68
4.4.4 Métricas analisadas.....	70
4.4.5 Simulação do cenário legado MPLS	71
4.4.6 Tráfego melhor esforço	71
4.4.7 Tráfego com contingenciamento	74
4.4.8 Cenário híbrido	77
4.4.9 Ilustrando a migração	78
4.4.10 Tráfego sem contingenciamento da rede híbrida.....	82
4.4.11 Tráfego com contingenciamento na rede híbrida.....	85
4.5 DISCUSSÃO	88
4.6 CONCLUSÃO.....	92
5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS	93
5.1 CONCLUSÕES	93
5.2 PERSPECTIVAS FUTURAS	95
REFERÊNCIAS.....	97

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A evolução tecnológica no que diz respeito às redes de computadores tem causado um impacto relevante nas demais tecnologias computacionais, em particular devido a maiores velocidades para a transmissão de dados, maior flexibilidade, novas mídias físicas para a transmissão, entre outros benefícios. No entanto, essas redes também se tornaram cada vez mais complexas e conseqüentemente oferecendo uma gestão mais desafiadora. A cada dia, surgem novas necessidades, com o acréscimo de novos dispositivos, aplicações e recursos, o que torna a possibilidade de ocorrência de eventos disruptivos na rede considerável.

Com a evolução das redes de computadores e, conseqüentemente, com a revolução tecnológica, novos paradigmas computacionais também têm proporcionado a evolução dos processos industriais, que vão se tornando mais complexos, requerendo um alto nível de regulação e controle. Nessa perspectiva, o desenvolvimento da indústria se encontra intimamente ligado ao elemento de transporte de dados. A sua ineficiência acaba comprometendo a produção.

No contexto da Indústria 4.0, as redes industriais correspondem a um modo de automação, constituído de protocolos de comunicação utilizados para o gerenciamento e supervisão dos processos, o que ocorre através de uma rápida e apurada troca de informações entre diversos equipamentos. Uma característica importante da Indústria 4.0 é a agregação de um número variado e heterogêneo de tecnologias, tais como Internet das Coisas (IoT), Realidade Virtual e Aumentada, *Big Data*, sistemas cyberfísicos, dentre outros. Nesse sentido, a necessidade nesse cenário de tecnologias e paradigmas de comunicação que ofereçam uma grande flexibilidade, facilidade de gerenciamento, escalabilidade e sobretudo interoperabilidade entre as demais tecnologias envolvidas.

Quando se trata de roteamento e encaminhamento de pacote de dados entre redes, o modelo tradicional de redes implementado baseado na arquitetura de referência *Open System Interconnection* (OSI), possui seus próprios protocolos de comunicação nas diferentes camadas, e que são compatíveis com os equipamentos ativos de comunicação (roteadores, *switches*, etc.) disponíveis no mercado. No entanto, esse modelo ainda possui limitações no que diz respeito à flexibilidade de gerenciamento de rede, interoperabilidade e à manutenção da segurança na mesma.

Na conjuntura da Indústria 4.0, que corresponde ao acoplamento do conjunto da cadeia produtiva por meio da Internet, verifica-se novos protocolos, padrões e formas de gerenciamento de dados que maximizam mais ainda as demandas, que a princípio não se encontravam renunciadas na arquitetura tradicional das redes Ethernet. Novos paradigmas, como as Redes Definidas por Software ou simplesmente SDN (Software Defined Networking) representam um enfoque de rede que usa controladores com base em software ou interfaces de programação de aplicativos (do inglês, APIs) para direcionar o tráfego na rede e se comunicar com a infraestrutura de hardware subjacente (VMWARE, 2021). Diferente das redes tradicionais, que usam dispositivos de hardware dedicados (roteadores e switches) para controlar o tráfego de rede. Uma SDN pode criar e controlar uma rede virtual ou controlar uma rede de hardware tradicional com software. A SDN oferece vários benefícios sobre a rede tradicional: maior controle com maior velocidade e flexibilidade; infraestrutura de rede personalizável; e segurança reforçada. Por essas razões, as redes SDN se apresentam como uma solução adequada para o atendimento das demandas existentes na Indústria 4.0.

1.2 PROBLEMÁTICA

A partir da necessidade identificada na infraestrutura de comunicação no contexto da Indústria 4.0, é necessária a adoção de novos paradigmas e tecnologias que proporcionem uma maior flexibilidade, facilidade de gerência da rede, interoperabilidade, etc.

No entanto, a proposta e adoção de novos paradigmas e tecnologias de rede oferecem uma complexidade agregada já que a sua absorção no mercado não pode ser imediata devido à falta de compatibilidade dos equipamentos legados, além da impossibilidade de realizar a migração instantânea da infraestrutura de rede sem afetar a produtividade das empresas.

Dessa forma, é importante a proposta de soluções que viabilizem as empresas adotarem essas novas tecnologias de forma a estarem alinhadas com as demandas da Indústria 4.0, as quais são apresentadas na revisão conceitual da literatura desta pesquisa.

1.3 MOTIVAÇÃO

De forma a ir ao encontro das empresas que necessitam de uma solução para a adoção de novas tecnologias e paradigmas de comunicação de dados sem afetar o seu processo de produção, é necessária a proposta de uma abordagem incremental para viabilizar a incorporação dessas novas tecnologias à sua infraestrutura legada de comunicação.

Nessa abordagem incremental, seria possível a coexistência de duas ou mais tecnologias de forma não invasiva uma com a outra, até que a tecnologia legada fosse completamente retirada (se for desejável), deixando apenas a tecnologia alvo operacional. Esse tipo de abordagem podemos chamar de hibridização da rede, ou a adoção de redes híbridas.

Por exemplo, grande parte das infraestruturas legadas de comunicação das empresas se apoiam sobre a tecnologia MPLS (*Multiprotocol label Switching*) para o transporte multi-serviço de dados. De forma a viabilizar a migração dessa infraestrutura para uma rede SDN, seria necessária a adoção incremental de uma rede híbrida MPLS/SDN, onde os benefícios de ambas as redes seriam mantidos de forma a viabilizar o processo de produção durante a migração.

1.4 OBJETIVOS

Esta dissertação de mestrado tem como objetivo geral, apresentar uma proposta de migração de rede tradicional para rede SDN a partir do processo de hibridização.

A fim de alcançar esse objetivo, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Proporcionar a compreensão do que vem a ser à Indústria 4.0, e das suas principais demandas computacionais;
- Descrever as principais características e requisitos das redes híbridas, discutir as vantagens e desvantagens na sua implantação, de modo a proporcionar a compreensão da viabilidade desse modelo;
- Estabelecer um passo a passo no processo de migração das redes tradicionais para as redes híbridas;
- Realização de um estudo experimental a fim de constatar a viabilidade de redes híbridas no processo de migração da rede tradicional para uma rede SDN.

1.5 METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho a natureza da pesquisa adotada foi do tipo aplicada, uma vez que o estudo e a abordagem propostos visam gerar insumos para a adoção de diretivas para as empresas possam realizar a migração de redes e a utilização de redes híbridas. Para esse propósito, como objetivo de pesquisa, a mesma foi explicativa de caráter experimental uma vez que se baseou na compreensão do modelo para redes híbridas, de suas características, requisitos e benefícios. De forma a ilustrar o modelo proposto, foi realizado um estudo experimental através de uma pesquisa quantitativa onde os resultados do estudo foram aferidos e analisados.

Para a realização deste trabalho, foram adotadas as seguintes etapas:

- Realização de um estudo conceitual de forma a compreender os principais elementos teóricos relacionados com este trabalho, tais como, as redes de computadores, as redes SDN, MPLS, etc.
- Realização de um levantamento da literatura de forma a identificar as principais contribuições relacionadas com a proposta e implementação de redes híbridas;
- Identificação, categorização e proposta de uma abordagem genérica para a migração das redes tradicionais para as redes SDN, através das redes híbridas, e;
- Proposta e realização de um estudo experimental de forma a ilustrar e validar a abordagem proposta para a adoção de redes híbridas através de uma análise quantitativa.

1.6 CONTRIBUIÇÕES E RESULTADOS ALCANÇADOS

Uma das contribuições da pesquisa apresentada nesta dissertação é a discussão acerca do papel das redes na Indústria 4.0, considerando a necessidade crescente que se verifica de redes mais eficientes, que possam atender as demandas cada vez maiores do setor industrial, decorrente da automação cada dia maior nos processos produtivos, exigindo mais eficiência das redes.

É possível destacar também como contribuição, a apresentação de diversos estudos que abordam a questão das *redes híbridas*, haja vista se tratar de uma

necessidade cada vez mais frequente, mas que não tem sido abordada com a mesma equivalência, requerendo uma maior dedicação dos pesquisadores acerca do tema, de modo a proporcionar maiores subsídios aos gestores de rede no momento de buscar uma maior eficiência na sua rede.

A contribuição principal deste estudo é a proposta de uma abordagem genérica incremental para a migração de uma rede tradicional para uma rede SDN, através de redes híbridas. Essa abordagem pretende representar diretivas genéricas não-disruptivas que podem ser adotadas pelas empresas e pela indústria para a adoção das novas tecnologias e paradigmas de rede, sem penalizar sua produtividade.

Os cenários experimentais realizados neste estudo, trazem como principal contribuição o fato de oferecer novas perspectivas de aprendizado para aqueles que se dedicam ao estudo das redes de computadores, possibilitando o estreitamento entre a teoria e a prática. Nesse caso específico, ilustrando a migração na prática entre as tecnologias OSPF, MPLS e SDN.

De modo geral, os resultados obtidos nos cenários experimentais apontam para viabilidade de redes híbridas em um processo de migração para SDN, garantindo a coexistência e a produtividades de ambas as tecnologias.

1.7 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Além deste capítulo introdutório, esta dissertação encontra-se estruturada em mais quatro capítulos, conforme demonstrados a seguir:

- Capítulo 2 – Revisão conceitual e de literatura: onde são abordados os aspectos conceituais e teóricos utilizados no decorrer do estudo, além da identificação e discussão das principais pesquisas existentes sobre o tema presente na literatura;
- Capítulo 3 – Neste capítulo é realizada uma abordagem sobre as redes híbridas, apresentando conceitos suas principais características, tipos de redes híbridas e especialmente é discutida as vantagens e dificuldades de implementação da mesma. Além disso, é apresentada relevantes considerações acerca do processo de migração;
- Capítulo 4 – Neste capítulo são apresentados os resultados do estudo experimental desenvolvido, demonstrando o funcionamento de uma rede MPLS legada, da rede SDN e de uma rede híbrida MPLS/SDN. Além desses aspectos, é ilustrada a migração

incremental para redes SDN, e os dados aferidos como resultados da simulação desses cenários são analisados e discutidos;

- Capítulo 5 – No último capítulo são discutidas as principais conclusões obtidas da realização deste trabalho, bem como a perspectiva de sua continuidade a partir de novas pesquisas sobre a temática em questão.

2 REVISÃO CONCEITUAL E DE LITERATURA

2.1 INTRODUÇÃO

Uma rede de computadores corresponde a um conjunto de computadores e diversos outros dispositivos de hardware de computação, que se encontram interligados por meio de canais de comunicação, a fim de auxiliar o compartilhamento de recursos e a comunicação entre os diversos usuários da rede.

Uma das primeiras redes de computadores e possivelmente a mais conhecida, foi a rede de comunicação que compunham o sistema de radar do exército dos Estados Unidos da América. A Internet conhecida e utilizada mundialmente, é o resultado do projeto *Advanced Research Projects Agency Network* (ARPANET), que em 1969 conectou as Universidades da Califórnia em Los Angeles, a Universidade de Utah e o *Stanford Research Institute*, da Universidade da Califórnia em Santa Barbara.

Atualmente as redes de computadores possuem diversas utilidades, sendo utilizadas para uma série de funções, como: possibilitar que diversos usuários compartilhem um único dispositivo de hardware, a exemplo de um scanner ou uma impressora; favorecer a comunicação através de mensagens instantâneas, por e-mail, videoconferência e outras; acionar o compartilhamento de arquivos; transformar o acesso à informação mais eficiente e possibilitar a manutenção de diversos usuários num mesmo ambiente ou em ambientes distintos com acesso remoto; possibilitar o compartilhamento de programas de software, dentre outras.

A existência das redes de computadores pode ocorrer em vários formatos distintos, as quais são definidas basicamente por dois fatores: o modelo dos equipamentos que estarão conectados à rede e, o outro consiste na distância existente entre tais equipamentos. Desse modo, o que determina uma escolha entre os distintos tipos de rede são as necessidades que deverão ser atendidas pela mesma.

Nesse sentido, este capítulo busca estabelecer uma ideia geral acerca das redes de computadores, de modo propiciar uma maior compreensão acerca do objetivo principal do estudo que diz respeito a utilização de redes híbridas na Indústria 4.0.

2.2 CONCEITOS E DEFINIÇÕES

Neste capítulo, são trazidos os principais conceitos presentes nesta dissertação de modo a proporcionar uma melhor compreensão para o leitor sobre os elementos básicos que são tratados neste estudo. São abordados conceitos como Redes Definidas por Software, redes MPLS e Indústria 4.0. Porém, inicialmente verifica-se a importância de conceituar redes, a fim de possibilitar a apresentação dos conceitos mais específicos de redes.

2.3 REDES DEFINIDAS POR SOFTWARE

Software defined networks ou apenas SDNs, também conhecida como “redes definidas por software”, trata-se de uma tendência que tem ocupado cada vez mais espaço no ambiente da transformação digital, bem como dos novos recursos de tecnologia. A SDN consiste basicamente em um modo de projetar a arquitetura de redes entre computadores. A especificidade principal da SDN que inclusive a difere das demais redes, consiste no fato de a mesma possibilitar o controle da rede de forma centralizada, através de aplicativos de software. De modo prático, esse aspecto auxilia a operadora a administrar toda a rede de maneira mais consistente, independente da tecnologia implícita empregada (SILVA et al., 2019).

Como sugerido pelo próprio nome, a SDN faz uso de software ao invés de dispositivos especializados na gestão de serviços de rede e aplicativos. Além disso, confere maior flexibilidade aos sistemas, propiciando o provimento de aplicativos expansíveis, criados a partir das necessidades (GUEDES et al., 2012).

Segundo Kreutz et al. (2017), com a SDN, o provisionamento da malha não se choca com deficiências de hardware, haja vista tratar-se de um sistema centralizado, pois a mesma passa por um monitoramento inteligente, destinado a adequá-la de forma automática em função das condições. Ou seja, consiste em um modo de digitalizar a rede.

O surgimento da SDN se dá em função da necessidade de escalar, automatizar e otimizar as redes, com o intuito de relacionar-se melhor com aplicações oriundas da nuvem pública, de serviços privados de armazenamento, bem como dos bancos de dados. Quer dizer, a mesma foi criada para acompanhar as transformações vividas pelos provedores de serviço nos últimos tempos (ANDRIOLI, 2017).

Vale destacar que o grande crescimento dos conteúdos multimídia e o impacto provocado por inúmeros dispositivos móveis, resultaram na criação de uma demanda que não era suportável pelos antigos modelos de negócio. Nesse contexto e intensa transformação, a SDN se apresenta como uma solução com capacidade de mudar as bases do design e das operações de rede.

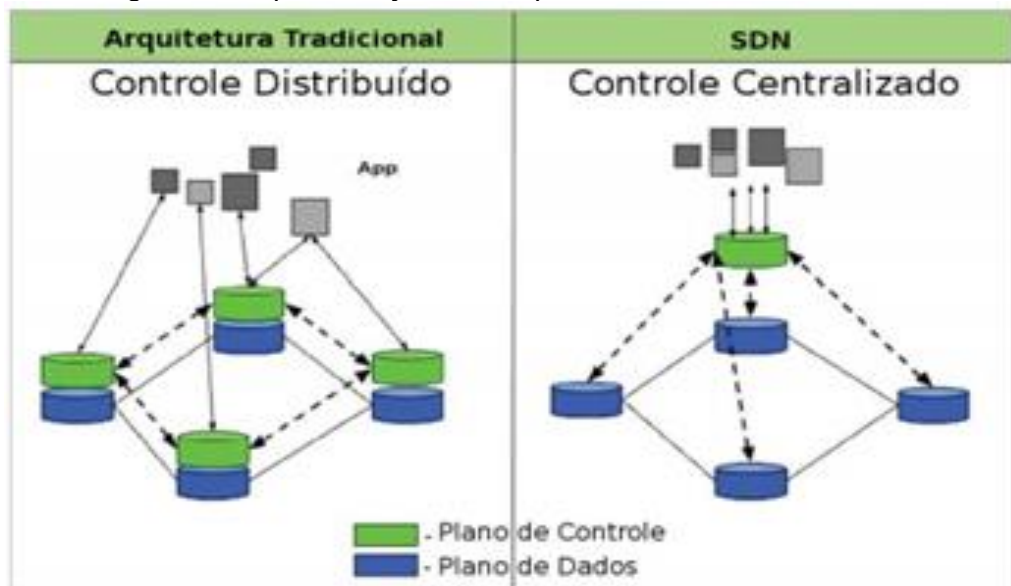
De acordo com a *Open Networking Foundation* (ONF), o principal objetivo da SDN é minimizar custos e maximizar a experiência do usuário, ao automatizar o conjunto de serviços existente na rede. Dentre os seus princípios estão: o desacoplamento entre controle e dados, o potencial de interagir de forma direta dos elementos da rede com este e a concentração da gestão (ONF, 2016).

A capacidade de dissociação dos planos ocorre ao transformar a camada de controle encarregada da deliberação de roteamento, analisando os pacotes e resolvendo a melhor forma de lidar com o tráfego, enquanto a camada de dados apenas encaminha de acordo com a deliberação tomada (LIMA, 2019). por meio de fluxos, que determinam uma sequência de ações entre o início e o ponto final, as determinações de envio são estabelecidas, onde os pacotes são traçados através de critérios de ação e correspondência (*match-action*). Essa subjetividade padroniza a postura no interior dos distintos dispositivos de rede, a exemplo dos encaminhadores (roteadores), *firewalls*, *switches* e *middleboxes* (KREUTZ et al., 2015).

A Figura 1 representa todas essas vertentes, contrastando-as com a arquitetura tradicional. Percebe-se a forma consolidada com que as relações SDN ocorrem, onde tanto as aplicações de alto nível quanto as operações de baixo têm a supervisão do controlador (LIMA, 2019).

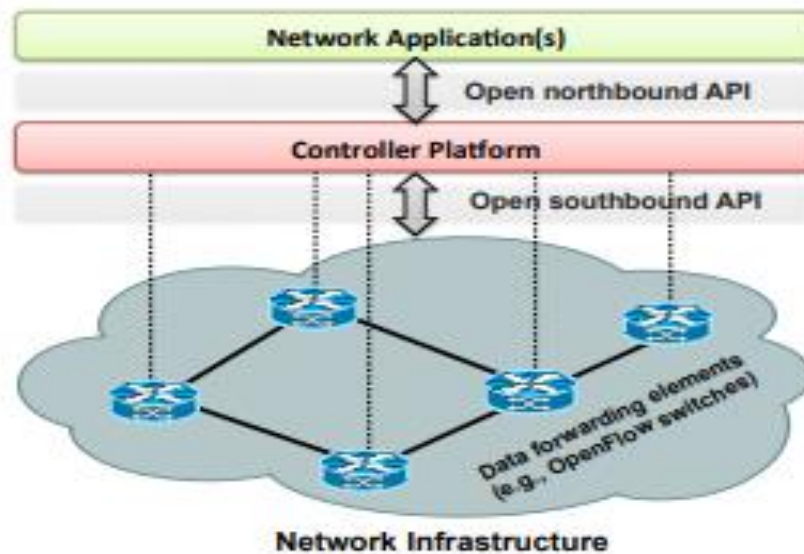
O SDN quebra a integração vertical separando a lógica de controle da rede dos roteadores e *switches* subjacentes que encaminham o tráfego. Os *switches* de rede tornam-se dispositivos de encaminhamento simples e a lógica de controle é implementada em um controlador centralizado logicamente, simplificando a aplicação da política. Embora o controlador possa ser implementado como um sistema distribuído, os aplicativos de rede têm acesso a um modelo programático centralizado (uma visão de rede global), tornando mais fácil raciocinar sobre o comportamento da rede (KREUTZ et al., 2015). Uma visão simplificada dessa arquitetura é mostrada na Figura 2.

Figura 1 - Representação das arquiteturas tradicional e SDN



Fonte: Câmera et al (2019).

Figura 2 - Visão simplificada da SDN



Fonte: Kreutz et al. (2015).

De acordo com Stancu et al. (2015), uma rede definida por software é uma arquitetura de rede com quatro pilares:

a - Os planos de controle e dados são desacoplados. A funcionalidade de controle é removida dos dispositivos de rede que se tornam elementos de encaminhamento simples (pacote);

b - As decisões de encaminhamento são baseadas no fluxo, em vez de no destino. Um fluxo é amplamente definido por um conjunto de valores de campo de pacote agindo como um critério de correspondência (filtro) e um conjunto de ações (instruções). A abstração do fluxo permite unificar o comportamento de diferentes tipos de dispositivos de rede, incluindo roteadores, *switches*, *firewalls* e outros *middleboxes*;

c - A lógica de controle é movida para uma entidade externa, o controlador é uma plataforma de software que é executada em um servidor e fornece os recursos e abstrações essenciais para facilitar a programação de dispositivos de encaminhamento com base em um sistema logicamente centralizado e abstrato. Sua finalidade é, portanto, semelhante à de um sistema operacional tradicional, mas para recursos de rede, e;

d - A rede é programável por meio de aplicativos de software executados na parte superior do controlador SDN. Essa é uma característica fundamental da SDN, considerada sua principal proposição de valor.

2.3.1 Controladores SDN

De acordo com Lima (2019), o controlador tem a função de fornecer uma interface programática através de uma API bem definida para redes SDN [2]. O controlador pode trabalhar de forma centralizada ou distribuída e os aplicativos são fornecidos como se a rede fosse um único sistema para o usuário. Além disso, os controladores permitem que o modelo SDN seja aplicado em diversas aplicações, como tecnologia de redes heterogêneas e nas mídias físicas (ex: redes sem fio (IEEE 802.11, IEEE 802.16 e etc.), redes com fio (ex: Ethernet) e redes ópticas.

Existem diversos controladores disponíveis no mercado, porém, nem todos tem suporte para habilitar QoS em uma rede SDN. Lima (2019) destaca que alguns controladores *Open Source* disponibilizaram essa tecnologia, dentre os quais:

a - **OpenDaylight Project** (ODL) – trata-se de um controlador *open source* baseado na linguagem de programação Java, desenvolvido pelo projeto colaborativo da *Linux Foundation* para promover o uso de SDN. O projeto ODL consiste em muitos outros subprojetos e plugins, como o *PacketCable MultiMedia* (PCMM), que pode ser utilizado para acionar QoS através de políticas. Além disso, existe outro plugin conhecido como *Open vSwitch Database Management Protocol* (OVSDB) na Interface

Southbound, encontrado na versão 1.3 do OpenFlow, que tem a função de gerenciar e configurar filas em switches para o controle de taxa de transferência (LIMA, 2019).

b - **Open Network Operating System (ONOS)** - É um controlador SDN *open source* baseado na linguagem de programação Java, desenvolvido pela *Open Networking Lab*, o qual utiliza tecnologia distribuída. Com relação a QoS, o ONOS suporta o mecanismo de medição para o protocolo OpenFlow, porém, essa funcionalidade poucas vezes é implementada em *switches* existentes. Esse controlador também tem suporte para filas configuradas na função *set_queue* para o controle de taxa de transferência, essa função trabalha na versão 1.3 do OpenFlow (LIMA, 2019).

c - **Floodlight Project** - É um controlador de código aberto desenvolvido pela *Big Switch Networks*, baseado na linguagem de programação Java, sendo bem aceito pela comunidade SDN. Existem projetos gerados pela comunidade do *Floodlight* que facilita a integração, atualização de módulos novos e existentes. Entre eles, temos um módulo de QoS externo implementado para o controlador *Floodlight*, que visa fornecer configurações de filas para habilitar políticas e controlar a taxa de transferência. Esta função é configurada na versão 1.0.0 do protocolo OpenFlow (LIMA, 2019).

D - **Ryu Project** - É um controlador desenvolvido pela NTT e OSRG *group* elaborado em linguagem de programação Python. Esse controlador tem suporte para as versões mais recentes do protocolo OpenFlow, além de oferecer novos aplicativos para gerenciamento, controle de rede, QoS, *firewall*, roteamento, dentre outros. Segundo a documentação sobre a tecnologia QoS oferecida pelo controlador, este controlador suporta a versão 1.3 do protocolo OpenFlow, disponibiliza somente configurações de filas que podem ser configuradas para métricas de controle de taxa de transferência (PROJECT RYU, 2014).

2.3.2. OpenFlow

Como citado anteriormente, a centralização do controle se dá por meio da utilização do protocolo aberto OpenFlow, o qual segundo Kreutz et al. (2015) é encarregado por estimular os fornecedores na efetivação de determinados conceitos SDN em produtos de rede. Esse protocolo tem sido usado na maior parte das propostas SDN, dispondo de uma série de aplicações *open source* de controladores. Experimentos iniciais que estão fazendo uso do OpenFlow foram desenvolvidos a

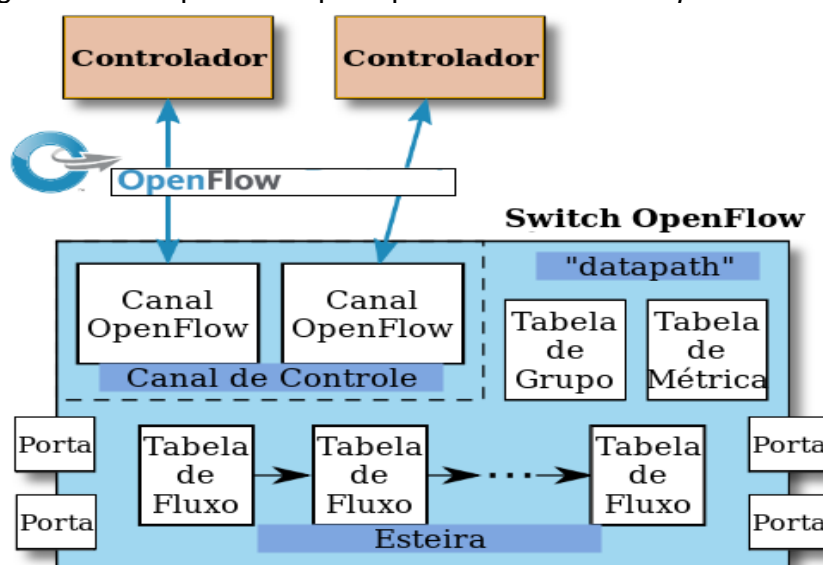
princípio para dividir a rede em uma parcela de software controlável, orientada ao direcionamento de pacotes.

De acordo Rawat e Reddy (2017), não é fácil apresentar noções do que hoje é chamado de SDN sem antes tratar do que vem a ser o protocolo OpenFlow. Desenvolvida pela Universidade de Stanford, essa proposta foi responsável por tornar o paradigma de SDN popular como é atualmente. Além disso, a aceitação do mercado e o trabalho desempenhado pelo ONF foram fundamentais para a consolidação desse conceito. A elevada propagação do OpenFlow como iniciativa principal para SDN fez com que a API se tornasse o padrão para a Interface *Southbound* do controlador (KREUTZ et al., 2015).

O *switch* OpenFlow atua com canais de controle que utilizam o protocolo OpenFlow em sua comunicação com o controlador do mesmo (TOURRILHES et al., 2014). As portas de entradas são responsáveis por encaminhar os pacotes que aportam para um pipeline de tabelas de fluxo, as quais dispõem de todos os fluxos hospedado no equipamento. Pfaff et al. (2015) destacam que, não apenas as tabelas de fluxo se fazem presentes, mas também uma tabela de métricas, responsável por agrupar e flexibilizar orientações para os pacotes e qualidade de serviço (QoS) para os fluxos, na devida ordem. O *multicast* é um exemplo de tabela de grupos. Um grupo pode ser responsável por armazenar os endereços e interfaces configuradas para a permuta de pacotes com os determinados IPs. Enquanto que as tabelas de métrica podem ter seu uso destinado ao controle granular de fluxos e implementação de QoS, assim como, de monitoramento de tráfego antes até do envio de pacotes. Na Figura 3 é possível visualizar a relação entre esses componentes.

Barbosa (2018) descreve que ao alcançar um switch OpenFlow, um pacote é enviado inicialmente a uma tabela, sendo o mesmo processado pela tabela de prioridade maior que se adequa às suas especificidades, assim, instruções pré-determinadas podem ser impostas ao pacote, dentre as quais é possível citar: mudança nos cabeçalhos, alteração e inserção nos metadados, direcionamento de pacotes, dentre outros. Tal direcionamento pode ocorrer para uma tabela posterior, mas também para uma interface de saída através de onde se dará a transmissão do pacote ou ainda para a tabela de grupos.

Figura 3 - Componentes principais de um switch OpenFlow



Fonte: Barbosa (2018).

Todo fluxo dispõe dos campos para busca e validação (*match*), suscitando os metadados que serão confrontados com aqueles presentes nos pacotes, a fim de determinar se os mesmos devem ou não serem processados (FERNANDEZ, 2013). Existem ainda uma prioridade na tabela, medidores de número de pacotes e bytes processados, além de orientações que devem serem realizadas sobre os pacotes, a exemplo da forma de operar o passo seguinte do prosseguimento de processamento do pacote, promover a modificação ou encaminhá-lo para uma interface ou outra tabela (BARBOSA, 2018).

Kreutz et al. (2015) ressaltam que a instalação dos fluxos pode ocorrer de modo proativo ou reativo. Os fluxos instalados de forma proativa são aqueles cuja inserção ocorre antes até do tráfego de pacotes, cuja configuração de cada uma das tabelas ocorre através de regras preestabelecidas. Já os fluxos cuja instalação se dá de forma reativa, são aqueles que necessitam da chegada de um determinado pacote que funcionará como um gatilho para que ocorra a configuração da tabela. Segundo Barbosa (2018), o gatilho será gerado por um pacote recebido pelo equipamento OpenFlow, posteriormente encaminhando-o para o controlador, cujas decisões podem ser tomadas fundamentadas nos metadados do pacote recebido, e assim promover a instalação de fluxos nas tabelas do *switch* encarregado pelo direcionamento dos dados.

Quando ocorreu a popularização do protocolo, destinava-se grande relevância à instalação reativa dos fluxos, haja vista se tratar de uma funcionalidade dificilmente encontrada nas redes tradicionais e que em grande parte dos modelos de aplicações com OpenFlow disponibilizados utilizavam os fluxos reativos. Entretanto, a utilização de fluxos proativos tem se apresentado relevante e se constituído em maior parte em aplicações subsequentes (FERNANDEZ, 2013).

Sezer et al. (2013) afirma que não se faz necessário que os *switches* sejam 100% OpenFlow, cada fabricante pode, desde que considere as especificações, dispor no *switch* de uma forma não-OpenFlow, empregando-o tão somente quando se fizer necessário ou de forma paralela com a instância de OpenFlow. O protocolo é capaz de filtrar os pacotes e tomar a decisão de quais carecem de ser examinados pelo mesmo e quais deverão ser encaminhados para a instância do *switch* não-OpenFlow.

Segundo Rawat e Reddy (2017), o protocolo OpenFlow determina a conexão do *switch* com um ou mais controladores e o modo como as normas devem ser permutadas através desses elementos. É possível realizar a conexão do *switch* com o controlador por meio de um canal específico para esse fim ou através da própria rede de dados, por onde ocorre o tráfego da totalidade dos pacotes. As autoras afirmam ainda que a transmissão dos dados de OpenFlow ocorre por meio de uma conexão TCP comum, através de padrão na porta 6633. É possível ainda, criptografar as mensagens entre o controlador e o *switch* empregando o TLS. A utilidade da criptografia TLS está justamente em acrescentar uma camada de segurança na comunicação entre os elementos, favorecendo a estrutura de autorização de troca de dados e inviabilizando a leitura do tráfego OpenFlow por elementos não autorizados.

A composição das mensagens OpenFlow é formada por um cabeçalho padrão onde consta a versão do protocolo, a forma de mensagem, sua identificação e comprimento. O cabeçalho pode ser constituído de estruturas inerentes a cada modelo de mensagem. Os mecanismos permutados entre controlador e *switch* se encontram organizados em quatro categorias especificadas pelo OpenFlow, como descreve Barbosa (2018):

a) *Mensagens comuns*: consiste em caracterizações de estruturas e elementos utilizados por tipos específicos de mensagens, gerando uma categoria para finalidade

generalizada. Essa categoria é composta pelas estruturas para fluxos, portas, ações e instruções;

b) *Mensagens de controlador para switch*: trata-se de estruturas de mensagens que são encaminhadas do controlador para o switch, quando definido pelo controlador ou aplicações. Essa categoria é composta por estruturas destinadas à configuração do *switch*, pacotes para serem encaminhados à rede e mensagens de alterações de estado, requisição de informações e estatísticas, dentre outras;

c) *mensagens assíncronas*: corresponde a mensagens que são encaminhadas do *switch* para o controlador de modo assíncrona, isto é, de forma autônoma de seja qual for a requisição. Nessa categoria estão incluídas as mensagens que comunicam a chegada de um pacote novo ao *switch*, a remoção de um fluxo ou o status de algum elemento que foi modificado para o *switch*, e;

d) *mensagens simétricas*: corresponde a estruturas capazes de serem encaminhadas seja pelo controlador ou pelo *switch*, com resposta pré-estabelecida. Nessa categoria encontram-se: as mensagens de *eco* e *hello*, utilizadas na manutenção e estabelecimento da conexão, além das definições das estruturas de mensagens de erro, as quais são encaminhadas do *switch* para o controlador.

Outra tecnologia bastante abordada na literatura como tecnologia legada para a migração para redes SDN são as redes MPLS, apresentada na próxima seção.

2.4 REDE DE COMPUTADORES

De modo geral, é possível definir uma rede de computadores como uma disposição de computadores e dispositivos conectados por meio de sistema de comunicação, visando o compartilhamento de recursos e informações entre si (MORAES, 2015). Sendo que nesse sistema encontra-se presentes protocolos e meios de transmissão.

Moraes (2015) descreve que a rede de computadores diz respeito a interconexão através de um sistema de comunicação alicerçado em protocolos e transmissões de diversos computadores com uma série de objetivos, dentre as quais o compartilhamento de informações. A esse tipo de conexão dá-se o nome de estações de trabalho (representadas por pontos ou dispositivos de rede e nós).

Para um maior esclarecimento, tomar-se-á o exemplo de uma residência na qual existem dois computadores, um na sala e outro no quarto, e que se encontram isolados sem comunicação entre si. No momento em que se instala um cabo par trançado estabelecendo uma conexão entre os mesmos através da internet, passa-se ter os computadores conectados através da rede.

Nos dias atuais, existe uma interconexão entre os computadores existentes ao redor do mundo inteiro, possibilitando a comunicação entre as pessoas e organizações. Essa interconexão pode ser observada nas diversas atividades diárias realizadas pelos indivíduos, como reuniões por meio de videoconferência, impressão de documentos, troca de e-mails, divertindo-se por meio de jogos online, acesso as redes sociais dentre outros, tudo graças à internet.

Além disso, não é mais necessário que se esteja em casa ou no escritório para realizar atividades como acessar as redes sociais ou enviar e-mails, através de dispositivos móveis como um smartphone ou tablet é possível a realização dessas atividades, desde que se esteja conectado à internet.

Nesse sentido, especialmente por conta da pandemia tem se verificado um intenso trabalho remoto, ou seja, as pessoas exercendo suas atividades laborativas a partir de suas casas, devido a necessidade do afastamento social, mas isso se dá graças a possibilidade de acesso à Internet que permite que basicamente todas as ações que eram realizadas no escritório ou na empresa, sejam tomadas de forma remota.

2.5 REDES MPLS

Com o aumento da demanda de usuários, quantidade de dispositivos e serviços, as redes de comunicação de dados necessitaram de uma plataforma que ofereça multisserviços, atendendo às demandas de tráfego alicerçados em *Internet Protocol* (IP) com largura de banda flexível (LINS et al., 2012).

Segundo Lins et al. (2012), objetivando satisfazer essa demanda, foi desenvolvido o *Multiprotocol Label Switching* (MPLS) visando alcançar grande parte dos clientes e das aplicações. O mesmo se apresenta como uma das principais tecnologias capaz de desenvolver serviços múltiplos de rede fundamentada em determinada infraestrutura de compartilhamento. Assim, torna-se viável o provimento de serviços de forma rápida, levando em consideração o tráfego suportado apenas pela rede legada.

O Internet *Engineering Task Force* (IETF) define MPLS como sendo, uma tecnologia de encaminhamento de pacotes que permite o direcionamento e a conversão eficaz de fluxos de tráfego por meio da rede, colocando-se como um recurso para minimizar o processamento nos dispositivos de rede e conectar de modo mais eficiente os distintos tipos de redes (SOUZA, 2019).

A expressão *Multiprotocol* diz respeito do fato dessa tecnologia poder ser utilizada em todo tipo de rede. Levando em conta a internet e a relevância dos protocolos presentes nas diversas redes *Wide Area Network* (WAN), sejam elas públicas ou privadas. Ainda é possível implementar sobre MPLS aspectos como Qualidade de Serviço (QoS), *Virtual Private Network* (VPN) e *Traffic Engineering* (engenharia de tráfego) para rede baseada em IP (SIQUEIRA, 2016).

Quando se trata de rede IP convencional, o roteamento é realizado através do processo de pesquisa de dados fundamentada nas informações presentes nos seus *headers* (cabeçalhos) e nos dados disponibilizados em cada roteador MPLS (*Label Switched Routers - LSRs*) e que se encontra ao alcance dos demais roteadores da rede. Nas redes MPLS, os roteadores são habilitados a deliberar acerca do encaminhamento mais apropriado a partir de pacotes rotulados no exato momento que adentram a rede. Desse modo, esses pacotes são direcionados fundamentados no conteúdo dos rótulos, impedindo assim, que ocorra todo o processo de pesquisa existente no roteamento convencional (LINS et al., 2012).

De forma sintética, o MPLS possui como proposição administrar determinada estrutura de comutação seja qual for a rede de datagramas, utilizando caminhos ordenados por protocolos de roteamento da camada de rede para desenvolver circuitos virtuais. O procedimento compreende em aferir e desmembrar os dados em classes de serviço (*Forwarding Equivalent Classes – FECs*), estabelecendo rótulos, e direcionar tais informações através de rotas pré-estabelecidas (*Label Switched Paths - LSPs*) por essas classes, realizando somente a comutação. Dessa forma, se preserva o nível de enlace, possibilitando a aplicação do MPLS em redes como a ATM e *Frame Relay* (LINS et al., 2012).

Segundo concepção de Bahnasse et al. (2018), a principal motivação para o uso do protocolo MPLS foi a velocidade do processo de roteamento com o princípio de comutação de rótulos, o MPLS fornece um tratamento rápido e simples sobre retransmissão de pacotes IP. Tradicionalmente, em uma rede IP, cada roteador consulta o cabeçalho IP do pacote para determinar o destino e, a seguir, pesquisa o

Routing Information Base (RIB) para determinar o próximo endereço de salto ou a interface de saída.

Depois do descrito, uma solicitação de protocolo de resolução de endereço (ARP) é gerada para determinar o endereço físico do próximo salto se a mídia for *Ethernet*. Este processamento é provavelmente muito caro em termos de atraso (SADON et al., 2012). Para superar esse limite, os fabricantes incluíram novos métodos de roteamento, como o *Forwarding Information Base* (FIB), que consiste na criação de tabelas de roteamento e adjacência. A primeira tabela é usada para armazenar, de forma ordenada, as resoluções feitas pela tabela RIB, e a segunda tabela é usada para inserir as informações relacionadas ao encapsulamento vinculado à camada de enlace. *Cisco Express Forwarding* (CEF) é um exemplo desses métodos (Bahnsse et al., 2018).

Segundo Reale et al. (2011), a engenharia de tráfego (TE) é um dos pontos fortes da tecnologia MPLS. A TE permite determinar o LSP não apenas de acordo com o caminho mais curto (métrica do protocolo de *gateway interior*), mas também de acordo com as restrições do tráfego transportado, como a largura de banda, o atraso e os recursos disponíveis na rede. O problema com o *Cisco Express Forwarding* é que ele não leva em consideração as diferentes classes de tráfego, o que significa que a reserva de largura de banda é feita para um túnel LSP entre uma fonte e um destino e não configura vários túneis por classe de tráfego onde cada túnel possui seus próprios recursos.

De acordo com Bahnsse et al. (2018), a engenharia de tráfego (TE) é um mecanismo que controla a fluidez do tráfego nas redes e fornece otimização de desempenho, utilizando os recursos de rede. Alguns dos principais recursos do TE são reserva de recursos, tolerância a falhas e utilização otimizada de recursos. A engenharia de tráfego se refere ao processo de seleção LSPs escolhidos pelo tráfego de dados, a fim de equilibrar a carga em vários links, roteadores e switches na rede.

Tal processo é mais importante em redes onde existem vários caminhos alternativos disponíveis. O objetivo da engenharia de tráfego é facilitar as operações na rede IP de forma eficiente e confiável, ao mesmo tempo em que otimiza recursos de utilização e desempenho da rede (TRIVISONNO et al., 2015). Redes MPLS pode usar mecanismos nativos de TE para minimizar o congestionamento na rede e melhorar o desempenho da rede. A TE modifica padrões de roteamento para fornecer mapeamento eficiente de fluxos de tráfego para recursos de rede. Este mapeamento

eficiente pode reduzir a ocorrência de congestionamento e pode desempenhar um papel importante na implementação de serviços de rede com garantia de qualidade de serviço (QoS) (MISHRA; AHMAD, 2014).

Em se tratando de ambientes de redes computacionais híbridos, é importante considerar os pátios fabris que devem suportar a coexistência de várias tecnologias e paradigmas computacionais. Daí a importância de discutirmos os principais conceitos associados à Indústria 4.0.

2.6 INDÚSTRIA 4.0

A transformação digital tem proporcionado uma rápida evolução nos hábitos sociais e econômicos da população em todo o globo. No mundo dos negócios, um dos setores que se encontra em plena expansão é o da inteligência artificial. Tem sido cada vez mais comum as empresas irem em busca de uma moderna geração de robôs inteligentes, equipados com as mais modernas tecnologias, como sensores de visão e de toque. Trata-se das denominadas fábricas do futuro ou Indústria 4.0 (LIMA; PINTO, 2019).

Santos et al. (2018), apontam que a Indústria 4.0, conhecida também como a quarta força industrial, consiste em um modelo industrial que possui por objetivo beneficiar-se da informatização, através das denominadas fábricas inteligentes, que fazem uso de tecnologias como robôs e interfaces de alta performance na automatização dos processos fundamentados em dados.

Cordeiro et al. (2017) afirmam não se ter dúvidas de que as mudanças ocasionadas pela Indústria 4.0 já estão sendo sentidas pelas empresas, e tais transformações não tem alterado apenas a atitude das organizações, mas também dos consumidores. Essa realidade já pode ser constatada a partir do surgimento de empresas como a Uber, que fez com a necessidade de possuir um carro deixasse de ser prioridade para muitos, outro exemplo é a empresa automobilística Volkswagen do Brasil está investindo em robôs colaborativos, máquinas inteligentes, postos de trabalho que se comunicam interagindo com o veículo em processamento, fábrica digital, sistemas de rastreabilidade, logística inteligente, prototipagem em 3D, entre outros conceitos avançados que fazem parte da Indústria 4.0, melhorando seu nível de produção, aumentando a eficiência operacional, eliminando erros e reduzindo custos, com o objetivo de desenvolver uma fábrica inteligente.

Kagermann et al. (2013) chamam a atenção para o elevado potencial da Indústria 4.0 em decorrência da possibilidade de customização do produto, maximização da flexibilidade do processo, aperfeiçoamento da tomada de decisão através do compartilhamento e processamento da informação em tempo real, aumento da eficácia e da produtividade dos recursos, bem como do surgimento de novas oportunidades de criação de valor agregado.

De acordo com Oesterreich e Teuteberg (2016), de forma sintética é possível estabelecer como estratégia principal para implantação da Indústria 4.0 a conquista dos seguintes elementos: total integração digital da engenharia com o conjunto da cadeia de valor a nível de processo de negócio; agregação horizontal das redes de valor em caráter estratégico; integração vertical e redes de sistemas de produção. Porém, para que se estabeleça uma estrutura com essas características é preciso o uso de Sistemas Ciberfísicos, que viabilizem o exercício do processo produtivo com repartição de informações nos ambientes externos e interno da organização.

O cyber-physical systems (CPS), também conhecido como sistemas ciberfísicos, dizem respeito a uma estrutura que permite a integração entre os ambientes físico e virtual. Esses sistemas integrados através de tecnologias de informação e comunicação (TICs) e dispositivos físicos controlam e monitoram os processos físicos, que retornam os dados da produção, produzindo assim um ciclo permanente de troca de informações (CYBER – PHYSICAL SYSTEMS, 2012). Um dos conceitos empregados aos sistemas ciberfísicos é aquele trazido por Kagermann *et al.* (2013), que define os mesmos como um conjunto formado por máquinas inteligentes, instalações de produção e sistemas de armazenamento, com capacidade de compartilhar informações, fomentar controles de ações de modo autônomo e harmônico.

Nessa conjuntura, algumas tecnologias e paradigmas se destacam, a exemplo da *Internet of Things* (internet das coisas), Computação em nuvem, *Big Data Analytics*, Robôs autônomos, Manufatura Aditiva, Simulação digital, Realidade virtual e Segurança cibernética. Essa conjugação de tecnologias possibilita que a produção e a tomada de decisões nas organizações que atuam no modelo e Indústria 4.0 seja mais assertiva, eficiente e direta, em decorrência do processo de automação (BORLIDO, 2017). A seguir são destacadas algumas dessas tecnologias.

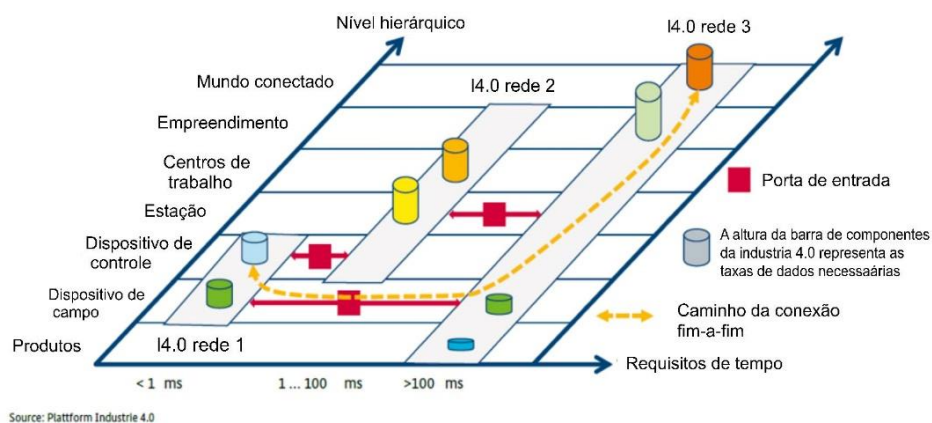
Dentre essas tecnologias, a Internet das Coisas – que descreve a integração das infraestruturas de comunicação global com as redes locais – está no núcleo do

modelo de comunicação associado à Indústria 4.0, sendo uma das camadas principais do Modelo de Arquitetura de Referência para a Indústria 4.0 (*Reference Architecture Model of Industry 4.0*), conhecida como RAMI 4.0 (LINS et al., 2016). O modelo RAMI 4.0 integra todos os aspectos hierárquicos do ciclo de vida, baseados em TI, em um modelo genérico para a Indústria 4.0. Nesse modelo a camada de *Comunicação* é implementada de forma a mediar as camadas de *Integração* (que torna as propriedades do mundo físico acessíveis aos sistemas computacionais) e de *Informação* (que contém os dados funcionais a serem transmitidos).

De forma a descrever os requisitos relevantes, as funções e interfaces da camada de *Comunicação*, um modelo para a comunicação baseado em redes necessita ser projetado de acordo com o modelo RAMI 4.0. A Figura 4 ilustra essa camada de Comunicação.

Na Figura 4 uma dimensão descreve a camada hierárquica RAMI 4.0, e a outra descreve os requisitos de latência para a comunicação. As várias redes de comunicação utilizadas são apresentadas entre essas duas dimensões. Essas redes diferem de acordo com o nível hierárquico onde elas estão localizadas ou de acordo com os requisitos de latências que podem ser satisfeitos nessas redes. Os cilindros descrevem os componentes da Indústria 4.0 que comunicam entre eles via uma rede específica.

Figura 4 - Projeto da camada de comunicação com um exemplo de caminho fim-a-fim



Fonte: Plattform Industrie 4.0 (2016).

Um aspecto importante nesse modelo são os gateways (roteadores que garantem a conectividade entre redes heterogêneas) que conectam as várias redes. Esses gateways podem, por exemplo atuar na transição entre uma rede local dentro de uma empresa para a rede global de um provedor de serviços. As conexões fim-a-fim compatíveis com a Indústria 4.0 são realizadas dentro de redes da Indústria 4.0 (conectadas via gateways).

De forma a identificar os requisitos básicos para as soluções de comunicação baseadas em redes, vários cenários de referência foram definidos em uma plataforma para a Indústria 4.0. A partir desse estudo, três categorias de requisitos foram identificados: segurança, relacionada à segurança de dados e de redes, segurança de personificação (ou identidade) e segurança funcional; disponibilidade, denotando que os processos e os dados estejam disponíveis quando necessário, e; qualidade de Serviço (QoS), relacionada na Indústria 4.0 aos aspectos de requisitos de latência (incluindo *jitter*), confiabilidade durante a transferência e requisitos de taxa de transmissão (PLATTFORM INDUSTRIE 4.0, 2016).

Além dos requisitos identificados, um requisito principal na Indústria 4.0 está relacionado às garantias de flexibilidade e segurança em uma comunicação fim-a-fim. Esses aspectos devem ser garantidos sobretudo na comunicação através de várias redes, no contexto global, e também entre vários operadores de rede (PLATTFORM INDUSTRIE 4.0, 2016). Nesse ponto, é importante proporcionar o máximo de continuidade possível. Com essa finalidade, os *gateways* possuem uma responsabilidade agregada no contexto da Indústria 4.0 de forma a proporcionar a conectividade entre a rede de uma fábrica a uma rede de alcance amplo (em inglês, *Wide Area Network* ou WANs). Para isso as seguintes características são desejáveis nessas redes:

- Estabelecimento configurável, baseado em aplicações, de tunelamento e de protocolos de segurança com menor tempo possível para o setup de conexão e para a desconexão;
- Facilidade de manutenção e gestão dispondo de recursos de monitoração e emprego de funções analíticas;
- Gestão de prioridades para as aplicações, e;

- Tradução de parâmetros de QoS entre vários operadores de redes.

Nas camadas mais baixas do modelo *Open System Interconnection (OSI)*, o paradigma de Redes Definidas por Software (SDN) oferece novas possibilidades para uma produção industrial mais flexível e a administração de serviços de rede. Isto é possível através do conceito de separação dos planos de controle e de dados das redes, e da virtualização das camadas funcionais mais baixas (*Network Function Virtualization - NFV*). A partir dessas características, a operacionalização dessas redes se torna economicamente viável, com maior disponibilidade e flexibilidade, além de serem mais seguras. Por exemplo, é possível citar as redes privadas virtuais (VPNs) que se tornaram relevantes na implementação de redes industriais. Nesse sentido, as soluções baseadas em código aberto terão um papel importante para SDN e NFV, uma vez que irão facilitar as chamadas “redes segmentadas” (*network slices*) para diferentes requisitos de usuários e cenários de aplicação.

2.7 TRABALHOS RELACIONADOS

A Indústria 4.0, corresponde a um ecossistema ciberfísicos no qual as pessoas, e máquinas compartilham dados e informações. A fim de que isso tudo seja possível, é necessário interconectar a totalidade desses elementos em determinada rede, de modo que as informações sejam capazes de trafegar de forma eficiente em todo o sistema automatizado, possibilitando a interoperabilidade do processo.

Nesse contexto, diversos estudos têm sido desenvolvidos sob a perspectiva de apresentar a rede ou as redes que melhor se adequam as necessidades da Indústria 4.0 (VIEIRA et al., 2019). Nesse capítulo serão apresentadas as vantagens e desvantagens do uso das redes híbridas SDN/MPLS no cenário em questão, através de diversos estudos publicados na literatura. Inicialmente serão mostrados estudos que apresentaram vantagens no uso dessas redes na Indústria 4.0, para em seguida apresentar os que apontaram desvantagens em seu uso.

O crescente desenvolvimento da indústria 4.0 é destacado por Lins et al. (2016), o que segundo os autores, tem conduzido a uma busca constante por tecnologias que contribuam com a sua implementação. Nesse contexto, as redes definidas por software (SDN), representam como uma nova ferramenta capaz de contribuir na comunicação dos dispositivos que compõem a rede presente nessas indústrias.

No estudo apresentado por Lins et al. (2016) é apresentada uma arquitetura SDN que concebe o plano de controle em consonância com o controle de produção de uma indústria, no qual as decisões da produção são direcionadas diretamente para o controlador SDN. Além da concepção da comunicação SDN, os autores também demonstram a comunicação utilizando uma rede tradicional de computadores. A fim de legitimar a arquitetura SDN, foi realizado também uma simulação nos cenários da Indústria 4.0, onde pode se constatar o sucesso nas comunicações dos componentes.

Em estudo realizado por Tajiki et al. (2018), levando em consideração o elevado fluxo de informações nos tráfegos de rede nas indústrias 4.0, os autores destacam o interesse dos gerentes de redes pelas redes híbridas de SDN/MPLS, o que levou os mesmos a apresentarem uma proposta de arquitetura de engenharia de tráfego para rede SDN/MPLS.

Na proposta apresentada pelos autores, os *switches* habilitados para o *OpenFlow* são aplicados sobre as extremidades da rede a fim de maximizar o nível de fluxo, bem como a flexibilidade do gerenciamento, ao tempo em que os roteadores MPLS se estabelecem como núcleo da rede de modo a tornar o processo viável para redes MPLS pré-existentes (TAJIKI et al., 2018).

Na arquitetura proposta, são atribuídos fluxos aos *Label-Switched Paths* (LSPs) de forma a utilizar ao máximo os recursos da rede, nas situações em que o fluxo e redirecionamento de nível são insuficientes. Dessa forma, é recomendado pela arquitetura proposta a utilização dos LSPs (TAJIKI et al., 2018).

A fim de pôr em prática a proposta apresentada, Tajiki et al. (2018) formularam matematicamente dois problemas de otimização: o primeiro baseado no redirecionamento de fluxo e o segundo na recriação de LSP, propondo um algoritmo heurístico para maximizar o desempenho do esquema. Os resultados apresentados pelos autores apontam para a eficiência da arquitetura híbrida SDN/MPLS, demonstrando ser superiores as tradicionais implantadas nas redes MPLS.

O paradigma chamado SDN ao ser utilizado com o protocolo OpenFlow, fornece muitas novidades características de gestão de tráfego. Isto torna-o uma tecnologia altamente indicada para redes de centros de dados. Um dos benefícios mais importantes da utilização do OpenFlow (OF) é a sua capacidade de encaminhar os fluxos de tráfego com base sobre o padrão de tráfego da rede. Por outras palavras, encaminha de forma eficiente o tráfego em granularidade de nível de fluxo. Por conseguinte, há muitas obras inovadoras que se centram em engenharia de tráfego

em redes OpenFlow puras. No entanto, a migração das redes de transporte que são as redes baseadas principalmente em MPLS para OF é um desafio muito caro (TAJIKI et al., 2018).

Para suplantar os desafios prováveis, foi proposta uma nova arquitetura de engenharia de tráfego na qual a integração do OpenFlow e do MPLS tradicional é adotada. Esta arquitetura de engenharia de tráfego é motivada por cenários em que a SDN vai ser implantada numa rede existente. Numa tal rede, algumas partes do tráfego são controladas pelo controlador da SDN; enquanto outras partes da rede utilizam o encaminhamento de rede existente no protocolo. Em outras palavras, é considerada a engenharia de tráfego no caso em que um controlador SDN controla apenas alguns elementos de encaminhamento SDN na rede, e o resto da rede faz o encaminhamento nó-a-nó usando o protocolo MPLS (TAJIKI et al., 2018).

O objetivo do estudo foi propor um algoritmo de engenharia de tráfego para integração de redes MPLS e OpenFlow, que possam gerir de forma adaptativa e dinâmica o tráfego numa rede para acomodar tráfego diferente padrões. Para o efeito, o tráfego da rede é monitorado para alcançar a matriz de tráfego atual. A partir daí, com base na matriz de tráfego atual e a base de conhecimentos de exigências anteriores, o controlador calcula os LSPs e atribuir os fluxos a cada LSP (na camada da borda). Os resultados da simulação mostram que o esquema proposto aumenta o rendimento da rede e reduz o total da perda significativa de pacotes (TAJIKI et al., 2018).

Outro estudo utilizando a noção de rede SDN foi realizado por Hasan et al. (2016), com a criação e gerenciamento de tráfego em MPLS a partir do *Open Shortest Path First* (OSPF). O tráfego desenvolvido apresentou uma maior flexibilidade no que diz respeito ao fluxo, além disso, é possível alterar esse tráfego de forma dinâmica a partir dos requisitos atuais da rede, do mesmo modo que a largura da banda escolhida pode ser modificada em função da taxa do fluxo de dados aplicada. Isso possibilita uma restauração do fluxo mais rápido e permite a maximização dos recursos da rede. Além de, melhorar a qualidade da engenharia de tráfego permitindo a melhoria do QoS, resultando em uma rede de maior confiabilidade (HASAN et al., 2016).

Patil e Subhedar (2019) afirmam que o MPLS tem se caracterizado com a escolha principal das empresas para se conectarem. Isso se dá em decorrência dos diversos benefícios no encaminhamento de pacotes de dados. No estudo, os autores analisam o desempenho da SDN quando acoplada ao MPLS. Os mesmos destacam

que o transporte de dados através do MPLS por meio do método convencional é veloz, porém quando ocorre o aumento do fluxo o tempo de criação do túnel é comprometido, além de outros problemas existentes. A fim de solucionar as questões apresentadas, Patil e Subhedar (2019) propõem o uso da SDN no encaminhamento de pacotes de dados, de modo a minimizar a latência apesar do elevado fluxo na rede.

Em seu estudo, Ma et al. (2017) destacam o rápido desenvolvimento vivido pelas redes de tecnologias e as redes digitais, tem permitindo que a indústria 4.0 influencie significativamente a sociedade, em especial nas indústrias. De modo a possibilitar que empresas do ramo manufatureiro, que produzem produtos distintos sejam capazes de igualar os seus níveis de produção, assim como os padrões de custos.

Em uma fábrica inteligente da Indústria 4.0, operários e operadores estão passando por transformações que vão da máquina tradicional para as máquinas inteligentes, onde o processo de produção são controlados através de softwares. Diante desse contexto, Ma et al. (2017) propõem uma definição de software voltada para a Indústria 4.0, cuja infraestrutura maximiza as operações gerais do ambiente de rede, a qualidade dos serviços prestados e a taxa de transmissão de dados.

Ainda que os estudos destacados apontem as diversas vantagens existentes na utilização das redes híbridas, outros trabalhos apontam para as dificuldades e os custos presentes no processo de implantação dessas redes. Rothenberg (2013) em seu estudo, publicado há 7 anos, intitulado “Rede Híbrida Rumo a uma Era Definida por Software”, já apontava para um futuro de utilização de redes híbridas, onde as estratégias iniciais de implantação basearam-se principalmente em transformar os controles *OpenFlow* apenas para toda a rede. No entanto, uma adoção mais ampla das redes SDN para além dos silos do centro de dados - e entre si - requer que se considere a interação e integração com os planos de controle ligados que fornecem comutação tradicional, encaminhamento, e funções de operação, administração e gestão (OAM).

O estudo de Rothenberg et al. (2013) discute a motivação e a declaração de problemas do trabalho em rede híbrida de modelos em OpenFlow/SDN e trata de diferentes abordagens para combinar o controle tradicional com controle OpenFlow. A ligação em rede híbrida num cenário SDN deve possibilitar a implementação do OpenFlow apenas para um subconjunto de fluxos, permitindo ao OpenFlow um subconjunto de dispositivos, e, de um modo geral, fornecendo possibilidades para

interagir com protocolos, dispositivos herdados e domínios vizinhos. Como em qualquer período de transição tecnológica onde as atualizações podem não ser uma escolha para muitos, porém é fundamental o conhecimento de diversos caminhos de migração para sua adoção. Assim, é apresentada a concepção e implementação de duas plataformas de controle SDN que visam responder aos requisitos da implantação de redes híbridas.

Acerca da necessidade das redes híbridas, Rothenberg (2013) afirma que, num sentido geral, em qualquer rede de qualquer tipo há necessidade de estabelecer uma comunicação entre diferentes nós, a fim de alcançar um caminho (espera-se o melhor) entre um par de origem e um par de destino. Destacando que, nas redes atuais, existem basicamente duas formas de estabelecer um caminho: através da utilização de um protocolo distribuído em cada nó ou através de configuração direta do plano de dados em cada nó ao longo de um caminho escolhido.

Sob a perspectiva SDN, as redes híbridas precisam ser discutidas com base na principal característica das redes OpenFlow, que tipicamente é centralizada no controle dos nós de rede. Esta perspectiva induz a pelo menos três abordagens principais a serem utilizadas para redes híbridas:

a) Fazer cada nó OpenFlow comportar-se como um *router*, por isso não importa se tal nó é ligado a outro nó OpenFlow ou a um router legado, supondo que os nós conectados compreendam o respectivo protocolo de camada 3 (L3);

b) Fazer com que cada nó OpenFlow compreenda a sinalização da tecnologia de circuitos para estabelecer LSPs, supondo que outros nós ligados ao longo do caminho também compreendam o mesmo protocolo de sinalização;

c) Utilizar o plano de controle baseado no OpenFlow para toda a rede híbrida e adotar uma camada intermediária para traduzir as respectivas regras de encaminhamento do OpenFlow para a configuração de cada dispositivo antigo não-OpenFlow.

Nesse sentido, Rothenberg (2013) busca no seu trabalho determinar as motivações para a adoção de redes híbridas, assim como as dificuldades em sua implementação em modelos de rede em OpenFlow/SDN. Mais especificamente, apresentando duas abordagens centradas no controle para combinar as funções do plano de controle tradicional com o controle OpenFlow.

A ligação em rede híbrida será sem dúvida uma preocupação para a adoção da SDN, uma vez que deverá considerar tanto questões econômicas como técnicas. As abordagens *RouteFlow* e *LegacyFlow* apresentam soluções pontuais que possibilitam distintas estratégias de migração e cenários de implantação (TAJIKI et al., 2018).

Além de permitir um caminho de adoção gradual para a tecnologia OpenFlow, o autor discute como os motores de encaminhamento centralizado de IP associado à instalação baseada em OpenFlow de regras de fluxo orientadas para IP, conduzem a um novo grau de controle que possibilita uma série de aplicações, que se constituem em um verdadeiro desafio (se não impossível) de realizar em redes clássicas de vários fornecedores.

De acordo com Sinha et al. (2017), O novo paradigma das redes definidas por Software (SDN), embora possua o grande potencial para abordar os problemas complexos apresentados pelas redes das empresas, tem as suas dificuldades de implantação própria e de escalabilidade. Além disso, a implantação completa de uma SDN possui os seus próprios desafios comerciais e econômicos.

A transição gradual das redes legadas para a SDN requer um modelo híbrido de rede como um passo intermédio inevitável; que permite que paradigmas heterogêneos funcionem em conjunto enquanto a transição completa é realizada por fases. Por conseguinte, a necessidade do momento é desenvolver uma estratégia de implantação incremental que atenda às necessidades da organização. Diante dessa realidade os autores apresentam um modelo SDN híbrido baseado em classes (class-based SDN) para redes *Multi Protocol Label Switching (MPLS)*.

Na concepção de Sinha et al. (2017), nas redes legadas, a arquitetura MPLS assemelha-se muito ao Paradigma SDN em termos de separação do plano de controle e dados, abstração de fluxo, etc. Além disso, os provedores de internet, ou *Internet Service Providers (ISPs)*, têm preferido MPLS ao longo dos anos devido aos benefícios da privacidade virtual de redes e engenharia de tráfego. A ideia central é tráfego de partição utilizando classes de equivalência de encaminhamento de entrada, cujas regras podem ser atualizadas através de um *router* controlador centralizado usando OpenFlow.

Sinha et al (2017) apresentam ainda, que na transição das redes legadas para o uso definitivo da SDN, são enfrentados desafios das restrições orçamentais, interrupção dos serviços e falta de confiança entre os administradores. Sem que haja

uma transição eficiente, os benefícios da SDN não podem ser alcançados completamente, pois durante a fase de transição existe maior propensão a falhas e rupturas.

Ainda assim, Sinha et al (2017), afirmam que combinando SDN e arquiteturas baseada de forma híbrida, os modelos SDN têm o potencial de somar os seus benefícios desde que os seus respectivos desafios sejam atenuados. Por exemplo, certos protocolos e técnicas legadas podem resolver algumas dificuldades na SDN. O desafio do momento é de apresentar um modelo SDN híbrido bem desenhado para assimilar os benefícios de muitas das obras semelhantes numa obra utilizável de caráter heterogêneo.

Para tanto os autores apresentaram um modelo de rede híbrido que engloba ambos SDN e MPLS, onde é possível demonstrar sua funcionalidade e avaliá-la experimentalmente com a ajuda de um protótipo de implementação. O protótipo de implementação do modelo de rede híbrida dá a prova de conceito para a coexistência de elementos de rede baseados em MPLS e SDN. Estes *switches* podem ser configurados utilizando um controlador centralizado para exercer controle e alavancar configurações. Este modelo é capaz de realizar uma separação sem conflitos de controles centralizados e descentralizados. O mesmo também provou que um controlador centralizado é capaz de fornecer um melhor tráfego em comparação com o tráfego descentralizado usando MPLS. Por conseguinte, este modelo fornece uma melhor alternativa para a transição suave de uma rede legada habilitada para SDN (SINHA et al., 2017).

Na concepção de Vissicchio et al. (2016), a SDN promete trazer uma flexibilidade sem paralelo, um controle de granulação fina e uma simplificação da configuração. A introdução da SDN numa rede existente, no entanto, deve ser incrementada na maioria dos casos, tanto por razões técnicas como econômicas. Durante a transição, os operadores têm de gerir redes híbridas, onde a SDN e os protocolos tradicionais coexistam.

No seu trabalho, Vissicchio et al. (2016), demonstram que a presença simultânea de SDN e protocolos tradicionais de encaminhamento podem criar anomalias que acabam por comprometer o objetivo do destaque para SDN. Foram concebidas técnicas para adaptar os fluxos de tráfego à rede dinâmica, atualizando as políticas de encaminhamento e implementação de forma crescente da SDN em redes híbridas, evitando ao mesmo tempo essas anomalias. Foi avaliado a

aplicabilidade da abordagem desenvolvida através de simulações. Ao acrescentar apoio à capacidade de gestão e de evolução, as nossas técnicas fazem das redes híbridas não só um meio para a transição, mas também um ponto de desenho interessante que pode fundir as vantagens da SDN e dos paradigmas tradicionais.

Apesar de todas estas vantagens, os operadores de rede são geralmente (e compreensivelmente) lentos ao adotar novas tecnologias de rede disruptivas. A substituição de todos os dispositivos de uma só vez não é possível, considerando os custos, a força humana necessária para realizar a substituição, e o possível tempo de parada. Em vez disso, a transição é provável de forma gradual, com a duração de vários meses, ou até anos (VISSICCHIO et al., 2016).

Durante a transição, os dispositivos tradicionais terão de trabalhar ao longo dos dispositivos SDN a fim de avançar de forma consistente. A cooperação entre os pacotes tradicionais e SDN podem ser estabelecidos com base nos protocolos suportados. De fato, os controladores específicos de dispositivos de baixo suporte de protocolos tradicionais em dispositivos SDN, como em RouteFlow. Além disso, capacidades básicas da SDN (por exemplo, encaminhamento de pacotes) também pode ser adicionada a dispositivos não SDN, deixando os controladores SDN manipularem as suas rotas estáticas.

Para além de facilitar a transição, redes híbridas também podem ser consideradas como um objetivo a longo prazo em algumas redes. De fato, as redes híbridas permitem aos operadores colher alguns dos benefícios da SDN sem uma implantação completa. Por exemplo, redes muito grandes como a dos provedores de serviços de Internet (ISPs), têm normalmente restrições altamente específicas que dificilmente serão cumpridas pelos dispositivos SDN. Tais restrições incluem o apoio de uma grande variedade de conectividade física e a manipulação de milhões de envio de entradas.

A título de comparação, os *switches* SDN são maioritariamente baseados em Ethernet e só podem lidar com dezenas de milhares de entradas. Implementações parciais podem também descarregar o controlador SDN de tarefas para as quais os protocolos tradicionais de encaminhamento têm-se mostrado eficazes. Por exemplo, os operadores de rede podem precisar das capacidades de controle da SDN apenas para uma pequena percentagem de fluxos, assim como os poucos responsáveis pela maior parte do tráfego, ou apenas em pontos específicos da rede.

Os protocolos tradicionais de encaminhamento também oferecem uma solução simples, para a conectividade em banda entre dispositivos da rede e controladores SDN, ou entre controladores SDN que lidam com diferentes porções da rede. Embora sejam inevitáveis, as redes híbridas são também mais difíceis de gerir do que as redes IP ou SDN puras. Em particular, a atualização de uma rede híbrida pode desencadear numerosas inconsistências de encaminhamento devido à presença de planos de controle múltiplos, potencialmente conflituosos. Intuitivamente, uma consistência de encaminhamento ocorre quando partes do tráfego é encaminhado através de reencaminhamento por caminhos imprevistos. Para além de perturbar as políticas de encaminhamento (por exemplo contornando um *firewall*) e políticas de engenharia de tráfego (por exemplo, reencaminhando ao longo de uma ligação de reserva), estas inconsistências podem também conduzir a loops de reencaminhamento e tráfego em buracos negros.

Ainda com as dificuldades apresentadas as técnicas e estudo de Vissicchio et al. (2016), possibilitou uma engenharia e uma política de tráfego de encaminhamento dinâmica a um nível de granularidade fina, por exemplo, apoio ao equilíbrio condicional da carga, adição e remoção imediata de recursos da rede, ou seleção condicional de vias de encaminhamento.

Diante do que foi apresentado até o momento, é possível perceber que a adoção de redes híbridas na maioria dos casos corresponde a uma necessidade do processo de implantação de redes SDN. Ainda que se façam presentes diversas dificuldades, como apresentam os diversos estudos, a adoção de redes híbridas é extremamente viável e vantajosa quando são observados os devidos cuidados destinados a suplementar essas dificuldades que se apresentam, inclusive a elevada demanda de pessoal e recursos financeiros.

2.8 CONCLUSÃO

A partir do que foi abordado neste capítulo é possível perceber que as redes definidas por software representam uma tendência cada dia mais presente na realidade das organizações. Haja vista, ser possível através da mesma, o controle centralizado da rede por meio de *software*, o que permite que a mesma confira maior flexibilidade aos sistemas, permitindo o fornecimento de aplicativos expansíveis, desenvolvidos a partir das necessidades do usuário.

As redes SDN surgem basicamente em decorrência da necessidade de escalar, automatizar e otimizar as redes, de modo a estabelecer um melhor relacionamento com as aplicações originárias de serviços privados de armazenamento, da nuvem pública ou privada, do mesmo modo que dos bancos de dados. Ou seja, o seu surgimento ocorre com o propósito de acompanhar as mudanças pelas quais passam os provedores de serviços nos últimos tempos.

Além das redes SDN, as redes MPLS também foram alvo de discussão neste capítulo. Destacando a necessidade crescente por redes capazes de oferecer multisserviços, satisfazendo as demandas dos usuários nos serviços fundamentados em IP. Nesse sentido, foi desenvolvido o *Multiprotocol Label Switching* (MPLS) que atualmente se constitui como uma das principais tecnologias voltada para o desenvolvimento de múltiplos serviços de rede sobre uma infraestrutura compartilhada.

Outro tema abordado neste capítulo foi a Indústria 4.0, onde foram trazidos os conceitos básicos envolvendo o tema, assim como as necessidades básicas da Indústria 4.0, o seu funcionamento e a importância que as redes de computadores exercem no funcionamento desse segmento. Vale destacar que o principal aspecto da Indústria 4.0 corresponde à utilização da capacidade dos sistemas ciberfísicos em proporcionar inteligência e comunicação para sistemas técnicos, que ao adotarem essa configuração passam ser denominados de sistemas inteligentes.

No capítulo a seguir é realizada uma abordagem acerca das redes híbridas, onde são discutidos aspectos como vantagens, desvantagens, dificuldades de implantação, tipos de redes híbridas e outros aspectos que envolvem essa perspectiva de rede.

3 REDES HÍBRIDAS: CARACTERÍSTICAS E DESAFIOS DE IMPLANTAÇÃO

3.1 DEFINIÇÕES

Diversas definições são empregadas pela literatura para definir as redes híbridas (YASINI, 2018). De modo geral, é possível dizer que uma rede híbrida é aquela que utiliza mais de um paradigma de rede para otimizar a entrega do tráfego ou caracterizada pela utilização simultânea de diferentes paradigmas durante a transição entre eles. Por exemplo, consideremos a transição entre um paradigma tradicional de rede (redes TCP/IP) e uma Rede Definida por Software (SDN), e que os dois paradigmas sejam utilizados simultaneamente durante um dado momento da transição, nesse caso chamamos essa rede de SDN híbrida (YASINI, 2018).

Numa rede SDN híbrida é possível tirar proveito da programabilidade e controle centralizado de toda infraestrutura de rede SDN, juntamente com a robustez dos roteamentos distribuídos. Isto torna possível aos operadores equilibrar a carga e gerir as redes de forma mais eficiente.

De acordo com Huang et al. (2018), os controladores em redes SDN híbridas só pode se concentrar no fluxo ou tráfego útil, enquanto os demais pacotes são geridos pelos protocolos tradicionais. Neste caso, ao implantar um otimizador de rede, os operadores só precisam migrar os dispositivos legados para acesso aos controladores SDN (SANDHYA et al., 2014).

No entanto, os switches SDN em redes híbridas podem ser implantados de forma imprópria ou pode ser adotada uma estratégia de otimização ineficiente, resultando assim na degradação ou inconsistência do desempenho da rede. As decisões de encaminhamento tomadas pelo controlador podem entrar em conflito com protocolos de encaminhamento tradicionais, devido ao controle isolado dos domínios, o que pode levar a ciclos sem fim (*loops*) de reencaminhamento. Dessa forma, é fundamental a investigação na implantação e otimização das redes SDN híbridas (HUANG et al., 2018).

Na concepção de Sandhya et al. (2017), uma rede SDN híbrida é aquela cuja arquitetura possibilita que ambos os paradigmas centralizados e descentralizados coexistam e se comuniquem juntos, em distintos graus para configurar, controlar, alterar e gerir o comportamento da rede, a fim de otimizar o desempenho da mesma e a experiência do usuário. Os autores exemplificam que na rede tradicional os dispositivos que suportam IGP (Interior Gateway Protocol), tentam controlar o

encaminhamento global do tráfego, enquanto que na SDN, o controlador encaminha o tráfego com base na visão global. Se estes forem combinados, uma parte do tráfego é mantida sob o controle tradicional e o restante do tráfego sob o controlador SDN, assim ter-se-á uma arquitetura SDN híbrida.

De outro modo, Vissicchio et al. (2015) definem os modelos de redes híbridas como a base de qual paradigma fornece qual serviço de rede, por meio do controle das entradas na Base de Informação de Encaminhamento (*Forwarding Information*).

3.2 CARACTERÍSTICAS

As redes SDN híbridas consistem em uma combinação da arquitetura SDN com outros paradigmas, por exemplo as redes tradicionais, com o objetivo de oferecer uma solução para uma transição eficiente e suave. Em decorrência do controle centralizado da rede e com visão global, a SDN entrega uma rede mais flexível e de gestão confiável, apoiando a programação inteligente do fluxo para a melhoria da utilização da ligação e rendimento da rede. Dentre as principais características de uma rede SDN híbrida, estão: a coexistência; a comunicação e a reprodução cruzada (SANDHYA et al., 2017).

A *coexistência* diz respeito à heterogeneidade na infraestrutura, seja no plano de dados ou no plano de controle, ou em ambos. Os componentes do SDN e do paradigma legado permanecem juntos na rede, embora possam interagir juntos ou não. Diferentes estratégias de posicionamento constituem os principais atributos desta característica (VAMBEVER et al., 2014).

De acordo com Vambever et al. (2014), a *comunicação* transmite a ideia de integração entre paradigmas com entendimento mútuo, compartilhamento e distribuição de funcionalidade entre componentes essencialmente heterogêneos da rede. O SDN e os componentes legados não apenas coexistem, mas também interagem entre si e compreendem as interfaces e os protocolos de cada um a fim de aprimorar um ao outro. Isso envolve uma série de técnicas como tradução de protocolo, nós SDN se apropriando do pacote legado através do controlador, análise de pacotes, injeção de pacote do controlador para a rede e assim por diante.

Exemplificando, o controlador SDN pode contribuir com a visão topológica global, no momento que o controle legado local no nó pode tomar decisões rápidas localmente, mesmo quando o link do controlador SDN estiver congestionado. Vale destacar que em determinados momentos a comunicação é crucial. Por exemplo, em

uma rede com *switches* legados e SDN, não é possível ter uma rede de camada 2 sem *loop*, a menos que ambos entendam o protocolo STP (*Spanning Tree Protocol*) (VISSICCHIO et al., 2014). Portanto, esta é uma característica relevante.

Vissicchio et al. (2014) ainda destacam que quando se refere à comunicação apenas no plano de dados, quer dizer que, os nós SDN e legados existem juntos e se entendem. Por exemplo, um *switch* SDN entende protocolos legados, como STP, RapidSTP, LLDP (protocolo de descoberta de camada de Enlace) (VISSICCHIO et al., 2014), etc.; usados por *switches* legados para funcionarem juntos. Uma configuração apenas com este recurso apresenta apenas uma pequena vantagem prática, a menos que haja alguma comunicação no plano de controle.

Quando se trata de comunicação apenas no plano de controle, pode ser que o controlador SDN entenda o protocolo distribuído tradicional, como anúncios de *Open Shortest Path First* (OSPF) para descobrir a topologia da rede ou para melhorar o desempenho do roteamento. Já nos planos de dados e controle, os mesmos interagem entre si com vários graus de tradução do protocolo (TILMANS et al., 2016).

Tilmans et al. (2016) esclarecem que a *reprodução cruzada* corresponde em mesclar diferentes paradigmas cujos atributos complementares maximizam a rede híbrida. Dessa forma, o cruzamento indica o grau de hibridização baseado nesses atributos. Por exemplo, pode haver uma troca entre o número de recursos de um protocolo legado que o controlador SDN pode analisar e interpretar em relação ao desempenho.

3.3 REQUISITOS

Basicamente, qualquer rede legada está apta para funcionar de forma híbrida com uma arquitetura SDN, no entanto, alguns elementos se apresentam como requisitos para um processo de hibridização entre redes legadas e redes definidas por software. É preciso destacar que as redes de comunicação modernas, baseadas em protocolos distribuídos e de transporte em rede, são extremamente complexas no que diz respeito aos aspectos operacionais (LEVIN et al., 2014; CASADO et al., 2007, 2006; QAZI et al., 2013).

Levin et al. (2014) destacam que apesar das redes IP tradicionais terem sido adotadas de forma maciça, ainda são complexas e difíceis de gerir. O número de questões como a aplicação da política de tráfego numa grande variedade de dispositivos, alto desempenho em termos de conectividade, robustez e tolerância a

falhas, aplicação e encaminhamento consciente do usuário (*User-Centered Routing*), isolamento de tráfego complexo, dentre outros; conduziram ao desenvolvimento de muitos mecanismos sobrepostos em várias camadas da rede, o que torna a gestão complexa e ainda propensa a falhas e lacunas de segurança.

Os fornecedores de serviços em todo o mundo têm aportado grandes investimentos em sofisticadas infraestruturas de redes tradicionais para a prestação de serviços aos seus clientes. Essas infraestruturas são construídas baseadas em equipamentos tradicionais de rede que são dispendiosos de escalar, complexos de gerir, e demorado a reconfigurar (SANDHYA et al., 2017).

Chu et al. (2015) reconhecem que a Rede Virtual de Funções (NFV), computação em nuvem e a proliferação de dispositivos conectados estão a levar ao aumento exponencial do tráfego e flutuações significativas nos padrões de utilização. Essas razões fazem com que as operadoras de rede se desloquem para arquiteturas ágeis que suportam reconfiguração dinâmica tanto dos serviços como da rede.

O carácter distributivo das redes tradicionais apresenta vantagens múltiplas, a exemplo da escalabilidade, razoável convergência, resiliência e estabilidade. O equipamento tradicional, como sempre, tem problemas tais como ser específico do fornecedor, oferecendo um conjunto fixo de características, exigindo uma gestão por dispositivos em algumas fases da implementação, e grandes probabilidades de erro humano. Como resultado, é difícil implementar conceitos inovadores como a virtualização da rede sob-demanda tais como o provisionamento de rede como serviço (NaaS) em serviços tradicionais de redes. Além disso, um nível de controle granular dos fluxos não é oferecido nas redes tradicionais (SANDHYA et al., 2017).

Para prestadores de serviços, essas capacidades proporcionam novas receitas, reduzem o tempo de colocação no mercado, aumenta a aceitação de novos serviços e melhora a capacidade de diferenciar significativamente as suas ofertas. O paradigma chamado SDN com o protocolo OpenFlow, fornece muitas novidades para a gestão de tráfego, o que o torna uma tecnologia altamente adotada em redes de centros de dados. Um dos benefícios mais importantes do emprego do OpenFlow é a sua capacidade de encaminhar os fluxos de tráfego com base no padrão de tráfego da rede, de outro modo, encaminha o tráfego em granularidade de nível de fluxo (Tajiki et al., 2018). Por conseguinte, há muitas obras inovadoras que se centram em engenharia de tráfego em redes puramente OpenFlow. No entanto, a migração das redes tradicionais para uma rede SDN consiste em um desafio inicialmente de custo

elevado, requerendo estudos e análise para minimizar esses investimentos (TAJIKI et al., 2018).

O SDN permite melhorar a visibilidade e controle de toda rede, aplicando políticas de acesso baseadas em usuários ou grupos, segmentando a rede para isolar o tráfego, minimizando os riscos para conter ameaças visando alcançar consistência na política para toda infraestrutura.

De uma forma geral, de acordo com a literatura, podemos enumerar os requisitos para o desenvolvimento de redes híbridas como aponta Tajiki et al (2018):

- Aplicação de política de tráfego em uma grande variedade de dispositivos, aumentando assim a facilidade de gerenciamento da rede;
- Alto desempenho, garantindo a conectividade e a vazão do tráfego através da reconfiguração dinâmica do seu roteamento;
- Robustez e tolerância a falhas, permitindo que a rede reaja rapidamente a um potencial degradação no tráfego;
- Encaminhamento consciente do usuário, de forma que a entrega do tráfego acompanhe as características contextuais do ambiente computacional, tais como localização geográfica do usuário, características de seus dispositivos de apresentação, *Service Level Agreement (SLA)*, etc.;
- Escalabilidade, acompanhando assim o aumento de demanda de tráfego na rede;
- Rápida convergência, proporcionando uma rede reativa e flexível com alta responsividade;
- Provisionamento da rede como serviço (NaaS), flexibilizando os recursos da rede através da sua virtualização, e;
- Isolamento do tráfego, permitindo a otimização do uso dos recursos computacionais da rede entre tráfegos heterogêneos.

3.4 TIPOS DE REDES HÍBRIDAS

Uma rede híbrida é aquela que apresenta elementos de dois ou mais paradigmas (ou tecnologias) de rede, o que para o gestor resulta em uma prestação de serviço com maior flexibilidade e adaptabilidade especificamente para cada caso. Como citado anteriormente, uma rede SDN híbrida é uma rede definida por software que atua em conjunto, por exemplo, com uma rede tradicional, em muitos casos de forma temporária até que ocorra a transição total da rede tradicional para a SDN.

Diversos estudos na literatura apresentam os mais diversos formatos de redes SDN híbridas, especialmente com MPLS, sendo alguns desses estudos discutidos nos próximos parágrafos.

Sinha et al. (2017) apresentaram um modelo híbrido baseado em SDN para redes MPLS. Os autores destacam que o modelo, o desenho, os componentes e suas interações foram alvo de discussões, assim como suas vantagens e limitações. Foi apresentado pelos mesmos uma implementação e avaliação de um protótipo. Segundo os autores, nas redes legadas, a arquitetura MPLS assemelha-se muito ao paradigma SDN em termos de separação de controle, plano de dados, abstração de fluxo, etc. Nessa proposta, o tráfego utiliza classes de equivalência de encaminhamento, cujas regras podem ser atualizadas através de um roteador com controlador centralizado usando OpenFlow. Dessa forma, o estudo buscou utilizar o plano de dados padrão MPLS juntamente com um plano de controle baseado no OpenFlow para elaborar um plano de dados sistemático e metodológico de implantação incremental, bem como um modelo híbrido de operação.

Tajiki et al. (2018) destacam a natureza altamente dinâmica das redes, o que faz com que os gestores das mesmas explorem a flexibilidade do paradigma do estado da arte chamado SDN. Desta forma, tem havido um interesse crescente em redes híbridas de SDN-MPLS. Desse modo, no trabalho desenvolvido pelos autores é apresentada uma nova arquitetura de engenharia de tráfego para a rede SDN-MPLS. Para este fim, as ligações OpenFlow são aplicados sobre a borda da rede para melhorar o nível de fluxo e flexibilidade de gestão, enquanto os roteadores MPLS são considerados como o núcleo da rede para tornar o esquema aplicável para as redes MPLS existentes. O esquema proposto reatribui os fluxos para os caminhos comutados por rótulo (LSPs) a utilizar os recursos da rede. Nos casos em que o redirecionamento do nível de fluxo é insuficiente, o esquema proposto recompila e recria os LSPs submetidos. Para este fim, foram formulados matematicamente dois problemas de otimização: o i) redirecionamento do fluxo; ii) a recriação e proposta de LSPs.

Subhedar e Patil (2019) chama a atenção para que nos dias atuais, uma série de redes empresariais de alta velocidade fazem uso do protocolo MPLS. O autor destaca a impossibilidade de migração da empresa para a tecnologia SDN, de forma direta e sem que haja problemas, sendo necessário para tanto, garantir uma transição

segura das redes MPLS para SDN. O estudo apresentado pelo o autor teve como objetivo, otimizar o desempenho do MPLS acoplado ao SDN.

Desse modo, o controlador SDN utilizou algumas características da MPLS-TE para ler estatísticas da rede. Com base na entrada da OSPF de extensão, a SDN redireciona o tráfego sempre que houver congestionamento. O controlador é pré-programado com fluxos escritos a partir do OpenFlow Manager, sempre que há alguma alteração na topologia ou nas estatísticas da rede. Além disso, o cabeçalho do pacote foi modificado e direcionado de acordo com os fluxos (Subhedar, 2019).

Segundo Rzym (2016), a implementação da arquitetura *Path Computation Element* (PCE) em redes MPLS/GMPLS de alta velocidade apresenta uma ampla aceitação e ajuda a executar operações de configuração de caminhos, para aplicações com objetivo explicitamente definido, com funções e requisitos de QoS. Foi desenvolvido pelo autor um estudo utilizando a arquitetura PCE com controlador SDN a fim de promover a otimização da largura da banda com funções específicas.

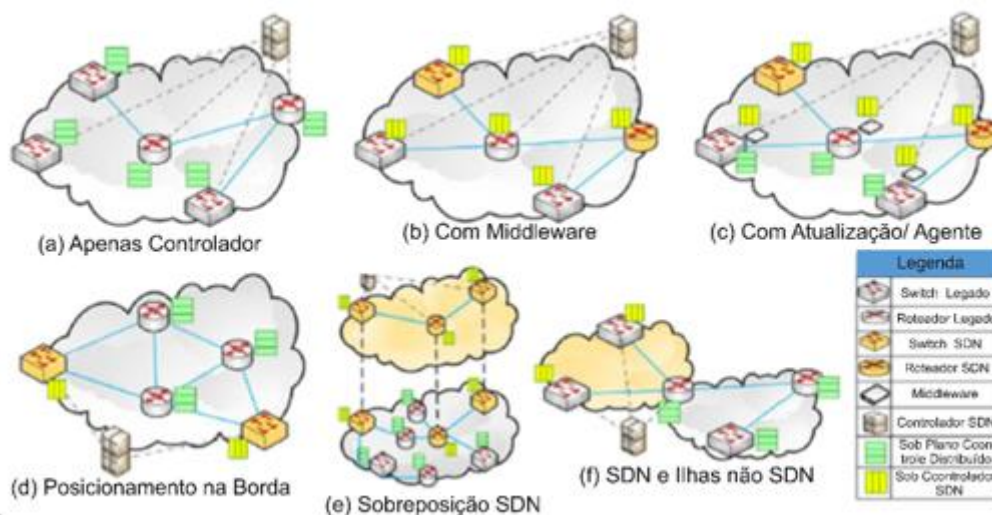
Para Rzym (2016), o desenvolvimento atual de redes de alta velocidade é realizado com a implementação de métodos de controle de rede que suportam fluxos IP. Em seu estudo inicialmente foi utilizado o ATM e depois o MPLS/GMPLS, apoiando a proliferação ubíqua de IP. Tanto a MPLS como a GMPLS precisam empregar regras flexíveis de estabelecimento de caminhos, que foram realizados utilizando o módulo dedicado de otimização centralizada e computacional, chamado PCE. O conceito PCE foi introduzido a fim de gerir eficazmente o tráfego e executar processos de configuração de caminhos num único domínio.

De acordo com Sandhya (2017), as redes SDN híbridas podem ser classificadas em diferentes abordagens:

- a) **Apenas controlador** - conforme ilustrado na Figura 5, o modelo introduz um controlador SDN enquanto o resto da rede permanece inalterado. A ideia é aprimorar o plano de controle distribuído com entradas no controlador centralizado que tem benefícios na visualização global da rede, rápida convergência e abstração de fluxo. Na Figura 5, o controlador SDN pode interagir com os nós legados diretamente ou indiretos. Na comunicação direta, o próprio controlador entende o protocolo e nenhuma tradução é necessária. Por exemplo, na plataforma de controle de roteamento, o controlador atua como IGP e BGP para se comunicar entre si. Na comunicação indireta, o controlador interage com os nós legados com a ajuda de

tradução de protocolo, por exemplo, injeta pacotes de protocolos legados na rede para fornecer benefícios semelhantes aos de SDN;

Figura 5 - Modelos SDN híbridos classificados com base na arquitetura e componentes



Fonte: Sandhya (2017).

- b) Middleware** - esta abordagem visa fazer o controlador SDN entender os protocolos legados com um módulo de software específico, denominado *middleware*, de forma a permitir interação com os dispositivos legados. Após a transição do modelo legado para o modelo híbrido envolve mudar o plano de dados progressivamente, através da adição de nós SDN e, portanto, movendo-se para uma implantação SDN completa;
- c) Com atualização / agente** - Fornece um controle melhor do tipo SDN, esta abordagem visa fazer com que os dispositivos atuais entendam o protocolo OpenFlow, de modo a permitir a comunicação adequada com o controlador com a ajuda de um agente OpenFlow;
- d) Posicionamentos de borda** - nesta abordagem (Figura 5), os nós SDN são colocados na borda da rede. O controlador SDN controla a decisão de encaminhamento nos nós de extremidade. Para o controlador, a topologia é limitada apenas aos dispositivos SDN, ou seja, abstrai os dispositivos da rede legado existente. O tráfego no núcleo da rede usa os protocolos legados. O paradigma SDN é responsável por gerenciamento de tráfego que sai da rede para o mundo exterior e vice versa;

- e) **Sobreposição SDN** - a rede SDN é construída como uma sobreposição no topo da rede legada. Alguns dos dispositivos escolhidos na rede são substituídos por dispositivos SDN a fim de facilitar a aplicação e melhor gerenciamento de tráfego. O controlador vê a sobreposição SDN como a rede real. A sobreposição é composta de links lógicos que, por sua vez, consistem em um ou mais dispositivos legados, e;
- f) **Ilhas SDN e não SDN** - nesta abordagem a organização pode escolher uma pequena parte de sua rede para ser atualizada para SDN, enquanto o resto da rede continua funcionando de forma inalterada.

3.5 VANTAGENS E DIFICULDADES NA IMPLANTAÇÃO DE REDES HÍBRIDAS

De forma a ilustrar as vantagens e dificuldades de implantação de redes híbridas, é importante contextualizar a aplicação e utilidade dessas redes. Assim, como caso de utilização, podemos considerar o emprego das redes híbridas na implementação da infraestrutura tecnológica na Indústria 4.0, dada a heterogeneidade de paradigmas e tecnologias envolvidas nesse cenário, e a necessidade de uma maior interoperabilidade dessas redes.

Na concepção de Knapp e Langill (2015), para que essa infraestrutura seja projetada e implantada, de forma que possua interoperabilidade e obedeça à cadeia hierárquica, diversos desafios são expostos, dos quais é possível pontuar:

- Como adquirir o máximo de dados de sistema e ativos de forma a conceber um ecossistema de informações na indústria;
- Como conectar redes com diversos protocolos e padrões, assim como sistemas legados, e;
- Como estabelecer uma infraestrutura de redes que possibilite simplicidade e escalabilidade de crescimento e acréscimo.

Assim sendo, diante desses desafios e diversas tecnologias existentes, o questionamento que se faz é: que tipo de rede utilizar? É possível destacar um direcionamento de aplicação, não único, porém mais usual nos dias atuais, ressaltando que a tecnologia se encontra em constante evolução.

Nesse contexto, diversos estudos têm sido desenvolvidos sob a perspectiva de apresentar a rede ou as redes que melhor se adequam às necessidades da Indústria 4.0 (TAJIKI et al., 2018; LINS et al; HASAN et al., 2016). Assim, são apresentadas as vantagens e desvantagens do uso das redes híbridas SDN/MPLS no cenário em

questão, através de diversos estudos publicados na literatura. Inicialmente, são mostrados estudos que apresentaram vantagens no uso dessas redes na Indústria 4.0, para em seguida apresentar os que apontaram desvantagens em seu uso.

O crescente desenvolvimento da indústria 4.0 é destacado por Lins et al. (2016), o que segundo os autores, tem conduzido a uma busca constante por tecnologias que contribuam com a sua implementação. Nesse contexto, as redes definidas por software (SDN), representam como uma nova ferramenta capaz de contribuir na comunicação dos dispositivos que compõem a rede presente nessas indústrias.

Em estudo realizado por Tajiki et al. (2018), levando em consideração o elevado fluxo de informações nos tráfegos de rede nas indústrias 4.0, os autores destacam o interesse dos gerentes de redes pelas redes híbridas SDN/MPLS, o que levou os mesmos a apresentarem uma proposta de arquitetura de engenharia de tráfego para rede SDN/MPLS.

Outro estudo utilizando a noção de rede SDN e que aponta para suas vantagens, é o de Hasan et al. (2016), com a criação e gerenciamento de tráfego em MPLS a partir do *Open Shortest Path First* (OSPF). No estudo o tráfego desenvolvido apresentou uma maior flexibilidade no que diz respeito ao fluxo, além disso, é possível alterar esse tráfego de forma dinâmica a partir dos requisitos atuais da rede, do mesmo modo que a largura da banda escolhida pode ser modificada em função da taxa do fluxo de dados aplicada (HASAN et al.,2016).

Patil e Subhedar (2019) afirmam que o MPLS tem se caracterizado com a escolha principal das empresas para se conectarem. Isso se dá em decorrência dos diversos benefícios no encaminhamento de pacotes de dados. No estudo, os autores analisam o desempenho da SDN quando acoplada ao MPLS. Os mesmos destacam que o transporte de dados através do MPLS por meio do método convencional é rápido, porém quando ocorre o aumento do fluxo o tempo de criação do túnel é comprometido, além de outros problemas existentes. A fim de solucionar as questões apresentadas, Patil e Subhedar (2019) propõem o uso da SDN no encaminhamento de pacotes de dados, de modo a minimizar a latência apesar do elevado fluxo na rede.

Outro estudo que destaca as vantagens das redes híbridas é o de Ma et al. (2017), o qual chama a atenção o rápido desenvolvimento vivido pelas redes de tecnologias e as redes digitais, o que tem permitido que a indústria 4.0 influencie significativamente a sociedade, em especial às indústrias. De modo a possibilitar que

empresas do ramo manufatureiro, que produzem produtos distintos sejam capazes de igualar os seus níveis de produção, assim como os padrões de custos.

Ainda que os estudos destacados apontem as diversas vantagens existentes na utilização das redes híbridas, outros trabalhos apontam para as dificuldades e os custos presentes no processo de implantação dessas redes. Rothenberg (2013) já apontava para um futuro de utilização de redes híbridas. Nele o autor ressalta que os primeiros trabalhos SDN formam especialmente os cenários "greenfield" e/ou domínios administrativos únicos rigorosamente controlados.

O estudo de Rothenberg (2013) discute a motivação e a declaração de problemas do trabalho em rede híbrida de modelos em OpenFlow/SDN. A ligação em rede híbrida num cenário SDN, deve possibilitar a implementação do OpenFlow apenas para um subconjunto de todos os fluxos, permitindo ao OpenFlow num subconjunto de dispositivos, de modo geral, fornece possibilidades para interagir com o OAM (*Operation, Administration and Management*) existente, protocolos, dispositivos herdados, e domínios vizinhos.

De acordo com Sinha et al. (2017), O novo paradigma das redes definidas por Software (SDN), embora possua grande potencial para abordar os problemas complexos apresentados pelas redes das empresas, tem as suas dificuldades de implantação própria e de escalabilidade. Além disso, a implantação completa de uma SDN possui os seus próprios desafios comerciais e econômicos.

Sinha et al. (2017) apresentam ainda, que na transição das redes legadas para o uso definitivo da SDN, são enfrentados desafios de restrições orçamentais, interrupção dos serviços e falta de confiança entre os administradores. Sem que haja uma transição eficiente, os benefícios da SDN não podem ser alcançados completamente, pois durante a fase de transição existe maior propensão a falhas e rupturas.

No seu trabalho, Vissicchio et al. (2016), demonstram que a presença simultânea de SDN e protocolos tradicionais de encaminhamento pode criar anomalias que acabam por comprometer o objetivo do destaque para SDN. Foram concebidas técnicas para adaptar os fluxos de tráfego à rede dinâmica, atualizando as políticas de encaminhamento e implementação de forma crescente da SDN em redes híbridas, evitando ao mesmo tempo essas anomalias. Foi avaliado a aplicabilidade da abordagem desenvolvida através de simulações. Ao acrescentar apoio à capacidade de gestão e de evolução, as técnicas utilizadas fazem das redes

híbridas não só um meio para a transição, mas também um ponto de desenho interessante que pode fundir as vantagens da SDN e dos paradigmas tradicionais.

Para Jefia et al. (2018), embora a SDN tenha sido descrita como a solução chave para as questões atualmente enfrentadas pela rede em expansão de infraestruturas, a mesma é ainda considerada como estando na sua fase inicial. Tais benefícios como custo reduzido, configuração melhorada, desempenho melhorado e muitos outros são uma realidade, por outro lado, várias questões ainda requerem atenção e se apresentam como desafios a serem vencidos, à medida que a SDN se torna amplamente adotada e novas soluções estão a ser propostas.

Jefia et al. (2018) destacam como principais desafios apresentados pela SDN, os aspectos da escalabilidade, flexibilidade e desempenho, segurança e interoperabilidade, acerca da escalabilidade os autores afirmam que este demonstrou ser um dos maiores desafios colocados pela SDN. Duas sub-questões podem ser derivadas deste único desafio, nomeadamente: escalabilidade do controlador e, escalabilidade do nó de rede. Já sobre a flexibilidade se diz respeito a capacidade das redes para se adaptarem as novas características e sem precedentes, tais como; aplicações e rede serviços e o desempenho consiste na velocidade em que os nós da rede no plano de dados processam a informação do plano de controle.

Outro estudo que chama atenção para as dificuldades da implementação de redes híbridas SDN, é o de Sandhya et al. (2017). Nele os autores afirmam que diferentes abordagens de implementação têm diferentes inconvenientes, mas em geral, é possível destacar as seguintes desvantagens da hibridação, a dificuldade da gestão de um plano de controle heterogêneo, em decorrência da interação entre múltiplos planos de controle, fazendo com que a atualização da rede e os procedimentos possam não ser seguros, possibilitando a ocorrência de anomalias no processo de reconfiguração.

Sandhya et al. (2017) também chamam a atenção para a questão da escalabilidade do controlador, pois o mesmo nó tem a capacidade limitada de dispositivos, embora na SDN híbrida devido as despesas gerais de interoperabilidade. Assim, a implantação incremental do SDN requer mais controladores SDN e isto poderia aumentar as latências.

Diante do que foi apresentado até o momento, é possível perceber que a adoção de redes híbridas na maioria dos casos corresponde a uma necessidade do processo de implantação de redes SDN. Ainda que se façam presentes diversas

dificuldades, como apresentam os diversos estudos, a adoção de redes híbridas é extremamente viável e vantajosa quando são observados os devidos cuidados destinados a suplementar essas dificuldades que se apresentam, inclusive a elevada demanda de pessoal e recursos financeiros.

Em resumo, é possível consolidar como as principais vantagens na implementação de redes SDN híbridas:

- Encaminhamento eficiente do tráfego em granularidade de nível de fluxo (PATIL; SUBHEDAR, 2019), (TAJIKI et al., 2018);
- Proporciona rápida fluidez do tráfego, otimizando gastos com manutenção e aquisição de hardware (TAJIKI et al., 2018);
- Maximiza as operações gerais do ambiente de rede, a qualidade dos serviços prestados e a taxa de transmissão de dados (MA et al., 2017);
- Possibilita a alteração do tráfego de forma dinâmica a partir dos requisitos atuais da rede (HASAN et al., 2016), e;
- Automatização dos dispositivos e maior controle sobre rede (ROTHENBERG, 2013).

Da mesma forma, as principais dificuldades na implementação de redes SDN, de acordo com a literatura, são:

- Dificil adaptação às novas características, tais como, aplicações e serviços de rede (JEFIA et al., 2018);
- Falta de segurança (HUANG et al., 2018);
- Necessidade de maior interoperabilidade em uma arquitetura híbrida SDN;
- Dificuldade da gestão simultânea de múltiplos planos de controle, dificultando a atualização e a segurança no processo de reconfiguração (SANDHYA et al., 2017) e;
- Falta de escalabilidade dos controladores SDN e dos nós de rede, levando ao aumento das latências (JEFIA et al., 2018) (SANDHYA et al., 2017).

3.6 CONCLUSÕES

Neste capítulo foi possível estabelecer o devido entendimento do que vem a ser uma rede híbrida, assim como suas principais indicações. Ficando claro que uma

rede híbrida é aquela que dispõem de mais de um tipo de rede na sua concepção, possibilitando a conexão das mesmas, de modo que o usuário possa utilizar todos os recursos disponíveis em cada uma delas. Destacando que essa rede possui como principal característica a sua adaptabilidade, o que a torna ideal para ser utilizada em redes de grandes portes.

As vantagens e os desafios na implementação das redes híbridas são elementos também abordados nesse capítulo. A partir de diversos estudos voltados para o tema desta pesquisa, foi possível relacionar diversas características que torna as redes SDN híbridas vantajosas, dentre as quais é possível citar: melhor encaminhamento do fluxo de tráfego; redução dos custos com manutenção, justamente por conta dessa melhor qualidade do fluxo de tráfego; dispositivos operando de forma automática e possibilitando a alteração do tráfego a partir dos requisitos atuais da rede.

Os estudos realizados por esta pesquisa, apontam também para os desafios existentes no processo de implantação das redes SDN híbridas, dentre os quais é possível relacionar aqueles que mais se destacam: falta de escalabilidade do controlador e da escalabilidade de nó; falta de interoperabilidade, haja vista a necessidade de implementação de uma rede de arquitetura híbrida SDN, que permita a operação simultânea da arquitetura tradicional, da SDN e dos nós da rede híbrida, e; a dificuldade de gerir um plano de controle heterogêneo, em função da interação entre diversos planos de controle.

Portanto, o que se conclui a partir do que pôde ser visto através dos diversos estudos realizados, é que a rede SDN híbrida é extremamente vantajosa para o uso de empresas que possui grandes redes. No entanto, existe uma série de desafios que precisam ser tratados para que a implementação da rede híbrida ocorra com sucesso e não comprometa as atividades da empresa.

4 MIGRAÇÃO PARA REDES HÍBRIDAS: ESTUDO EXPERIMENTAL

4.1 INTRODUÇÃO

Ao tempo em que surgem novas tecnologias computacionais, passa a ocorrer a substituição das tecnologias existentes: protocolos são substituídos por outros ou atualizados para novas versões, arquiteturas são redesenhadas e novas funções são disponibilizadas ao ambiente. Promover a migração de uma tecnologia ou um protocolo existente para uma estrutura moderna, consiste em uma ação determinada pela influência de uma funcionalidade, por atualização de características já presentes no ambiente atual ou por conta da resolução de determinada problemática (Barbosa, 2018).

É possível que a execução de um novo sistema de *software* possa ser realizada desde o início, em um ambiente limpo, sem a existência de nenhum eventual legado. Essa forma de implementação é denominada de *greenfield*. O cenário mais habitual é o de reutilização ou reescrita de componentes do sistema, considerando o que já se encontra implementado, qualificando o que é denominado de *brownfield*.

Segundo Barbosa (2018), diversos fatores exigem análise e discussão quando se está a avaliar a possibilidade de migrar determinada tecnologia, dentre as quais:

- Qual será o custo do processo de migração?
- Quanto esforço técnico será necessário para tal?
- Se todas as funções do atual sistema serão capazes de funcionar no novo sistema?
- Quais são os prós e os contras de cada abordagem.

Esses elementos produzem questionamentos cujas respostas devem se dar passo a passo, de forma a orientar a tomada de decisão.

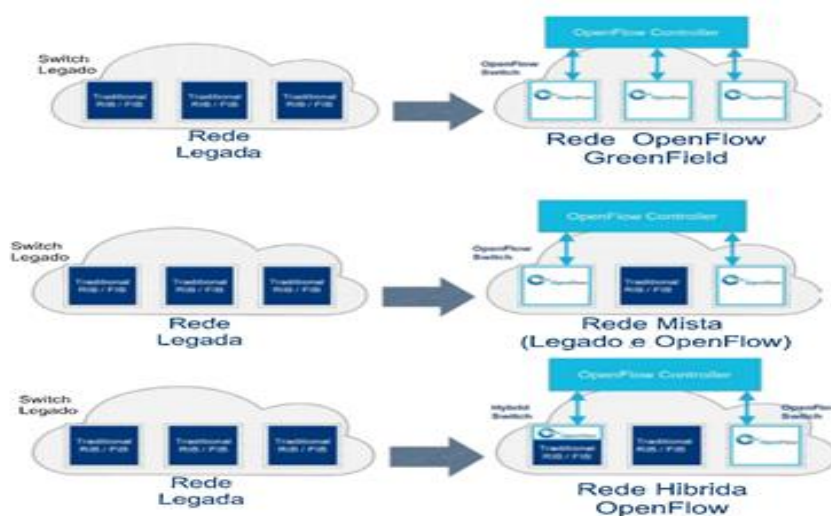
4.2 CONSIDERAÇÕES DE MIGRAÇÃO

Os casos de utilização da migração SDN dividem-se em três categorias principais: *legacy-to-greenfield*, *legacy-to-mixed* e *legacy-to-hybrid*. Os cenários *Greenfield* são os menos complexos porque não há necessidade de apoiar integração ou interoperabilidade com uma infraestrutura de rede existente, ao contrário dos cenários *legacy-to-mixed*, e *legacy-to-hybrid* (ONF, 2014).

Com cenários *legacy-to-mixed*, os novos dispositivos, tais como aqueles baseados em SDN, são implantados e coexistem com *switches/routers* tradicionais e são integrados com plano de controle legado. Os controladores *SDN* e os dispositivos tradicionais precisam trocar informações de encaminhamento através de um plano de controle legado. No cenário *legacy-to-hybrid*, ambos os dispositivos legados e SDN são integrados com controladores *SDN* (ONF, 2014).

A ONF (2014) aponta a importância das categorias de migração SDN ilustradas na Figura 6, sendo relevantes e aplicáveis a múltiplas redes, segmentos e camadas.

Figura 6 - Abordagens de migração



Fonte: ONF (2014).

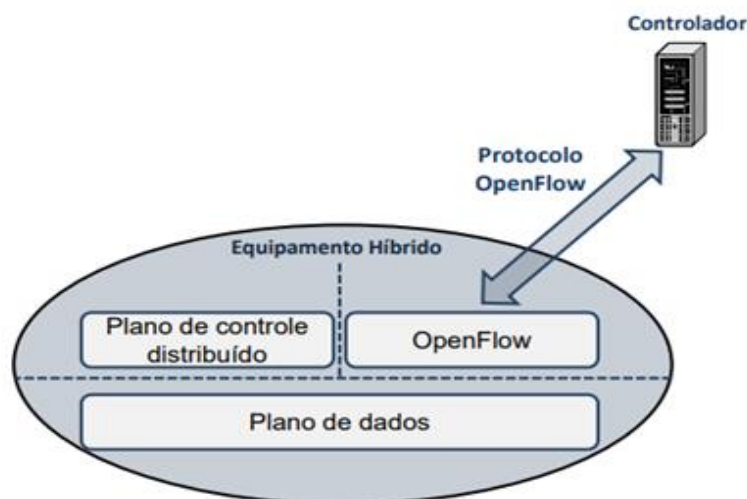
Portanto, a habilitação de novos serviços é uma importante motivação para a migração para redes híbridas baseadas em SDN. Estes serviços atingem a conectividade de ponta a ponta, seja na sobreposição de redes virtuais, abrangendo vários segmentos de rede, e/ou cruzando diversas camadas de tecnologias de rede. Algumas ou todas essas situações poderiam eventualmente ser abordadas por uma migração para *redes SDN*.

Em decorrência da grande diversidade de casos emergentes de utilização da SDN, existe a necessidade da avaliação dos casos de utilização do *OpenFlow* em diferentes tipos de rede para melhor compreender estratégias, ferramentas e métodos de migração únicos, que possam ser específicos para cada serviço ou tipo de rede.

As redes híbridas podem ser classificadas tanto pela coexistência de diferentes paradigmas e tecnologias de rede, como no caso de redes SDN híbridas, conforme ilustrado na Figura 7. Nessas redes, os equipamentos de rede SDN possuem duas linhas de processamento para o envio de pacotes: a padrão, que utiliza uma tabela de

encaminhamento construída com a informação obtida do plano de controle distribuído clássico (ex: informação obtida por protocolos como OSPF, ISIS, LDP, RSVP e BGP), e a linha de processamento construída e controlada pelo controlador SDN utilizando *OpenFlow*. (RODRÍGUEZ, 2014).

Figura 7 - Equipamento SDN Híbrido



Fonte: Rodríguez (2014).

4.3 ABORDAGEM DE MIGRAÇÃO PARA REDES HÍBRIDAS

De acordo com a *Open Networking Foundation* (ONF) (2014), as Redes Definidas por Software (SDN) têm sido bem aceita pela indústria como a forma de transformar empresas, centros de dados, fornecedores de serviços, transportadoras e redes de campus. O objetivo desta transformação da SDN é permitir novos serviços diferenciados de forma cada vez mais rápida, simplificação da rede, e minimizar o custo total de propriedade. Os principais atributos de uma rede que migra para o SDN são a programabilidade, heterogeneidade e capacidade de manutenção. A SDN irá também facilitar a rearquitetura necessária para responder à crescente demanda na rede em decorrência da dinâmica de conectividade.

Embora a implantação da SDN num novo centro de dados seja relativamente simples, a maioria dos operadores não dispõem de um ambiente *greenfield*. Conseqüentemente, o planejamento da migração se torna essencial para traçar o caminho em direção à SDN (ONF, 2014).

4.3.1 Etapas de migração para redes SDN

Apesar da rede SDN ser capaz de apresentar soluções para uma série de problemas existentes nas redes tradicionais, é possível que muitos administradores optem por não promover a migração, haja vista as dificuldades que podem se apresentar, como já tratado em capítulo anterior. A complexidade de uma migração já se apresenta no momento em que as empresas dependem das configurações atuais, presentes nos equipamentos, destinados ao funcionamento da comunicação de rede (BARBOSA, 2018).

Segundo Barbosa (2018), desenvolver um programa para um controlador SDN fundamentado em regras pré-existentes em determinada rede, considerando que a mesma possa possuir um elevado número de equipamentos e um alto grau de complexidade, não consiste em um trabalho de fácil execução.

Diante desse contexto, a *Open Networking Foundation* (ONF) formou um grupo de trabalho destinado a discutir e orientar os processos de migração para SDN. Vale destacar que a *Open Networking Foundation* (ONF) consiste de um consórcio sem fins lucrativos geridos por uma operadora, a qual faz uso de um modelo de negócios de código aberto que tem por objetivo promover as redes SDN, além de padronizar o protocolo *OpenFlow* e tecnologias correlacionadas. Geralmente os operadores e administradores de Rede não dispõem de ambientes *Greenfield* para efetivação das SDNs, aspecto que indica a importância de um plano de migração pré-determinado com validade, pois, quanto mais administradores decidam migrar, maior a necessidade de que exista práticas adequadas que permitam uma migração com determinada facilidade (ONF, 2018).

É imprescindível que antes de uma decisão de migração, tenha-se em mente a necessidade de estabelecer os objetivos a serem alcançados com a implementação da rede SDN, como: quais as capacidades existentes que devem ser mantidas; quais vantagens serão alcançadas com a migração, a exemplo de redução de custos e flexibilidade. Desse modo, a partir de objetivos definidos, pode-se estabelecer quais as opções para migração que se encontram disponíveis e, quais ações inaugurais que se encaminham a esse propósito.

Os passos para migração baseado nos trabalhos de Barbosa (2018) e no documento desenvolvido pelo grupo de trabalho criado pela ONF (2018), contemplam, de forma geral, a migração para redes híbridas SDN. Portanto, esses passos são

adaptados e integrados nesta seção para contemplar redes híbridas genéricas, a seguir:

Etapa 1: Identificar as características da rede legada e determinar os requisitos essenciais da rede alvo. Nem todos os requisitos da rede tradicional podem ser satisfeitos, pelo menos inicialmente, pela rede definida por software;

Etapa 2: Se a migração for para uma rede SDN híbrida, obter informação acerca do protocolo OpenFlow, suas especificidades e funcionalidades, bem como sobre os dispositivos de *hardware* que detém suporte a esses modelos e sobre a cobertura desse suporte;

Etapa 3: Realizar o planejamento físico e lógico da migração das funcionalidades atuais da rede considerando a capacidade da versão de OpenFlow definida, com vista a manter a totalidade dos recursos e serviços disponibilizados, sem que haja perda de desempenho e/ou capacidade. Ainda que a perda nula nem sempre seja possível, é necessário planejar para que a perda seja a mínima possível;

Etapa 4: Promover a simulação do funcionamento da rede em um ambiente onde os equipamentos sejam reais. Ainda que simulação com equipamentos virtuais seja válida, no sentido de adequar o plano de migração e legitimar configurações e *softwares*, é natural que em uma rede real surjam problemas adicionais, especialmente no que concerne à compatibilidade com a especificação do OpenFlow, por exemplo. A simulação em ambiente real permite posicionar o ambiente em contato com os problemas de infraestrutura e cabeamento possíveis de acontecer no cotidiano;

Etapa 5: Preparar a rede para a migração, ou seja, a rede poderá ser deslocada para um estado inicial, intermediário padrão a partir do qual o resto da migração poderá prosseguir;

Etapa 6: Realizar uma migração parcial da rede legada para a rede híbrida. Uma fração dos dispositivos e/ou usuários, já com características de produção, passa a fazer uso dos serviços e recursos da tecnologias envolvidas na rede híbrida. Nessa fase, é relevante consolidar o desempenho e a disponibilidade das funcionalidades almejadas, assim como averiguar a integração, compatibilidade e comunicação com os equipamentos das diferentes tecnologias envolvidas, sejam eles da mesma rede ou de redes distintas;

Etapa 7: Realizar processo de migração completamente. Uma vez que as fases parciais são consolidadas e o projeto de migração é dado seguimento, esse deve ser executado até o ponto planejado;

Etapa 8: Realizar atividades de análise e diagnóstico das funcionalidades, conectividade e desempenho da rede migrada encontram-se em consonância com o desejado na fase de planejamento, e;

Etapa 9: Realizar de forma periódica tarefas de monitoramento e manutenção da rede migrada.

Uma vez identificadas as principais etapas propostas para a migração, no âmbito deste trabalho, ilustramos nas próximas seções as etapas de 1 a 8 através da simulação de cenários experimentais.

4.4 CENÁRIOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção são apresentados os experimentos realizados utilizando o emulador *Graphical Network Simulator 3 (GNS3)*, de forma a ilustrar o processo de migração de uma rede MPLS para rede SDN, e a utilização de redes híbridas no contexto da indústria 4.0.

Vale ressaltar, que todo o trabalho realizado em um processo de migração para redes SDN, especialmente, quando se utiliza o processo de redes híbridas, tem como objetivo a adoção de uma rede mais eficiente, sem que se perca os benefícios existentes da rede original, bem como não ocorra também a paralisação total do sistema para implantação da rede SDN. No caso deste estudo, o que leva a necessidade de tal processo é o fato de que, com o advento da Indústria 4.0, que consiste na conexão de toda uma cadeia produtiva através das novas Tecnologias de Informação e Comunicação (TICs), verifica-se o surgimento de novos padrões, modelos e protocolos de gestão de dados que maximizam cada vez mais as demandas.

A Indústria 4.0 requer a integração de diferentes tecnologias e paradigmas, tais como: máquinas inteligentes, robôs, Internet das Coisas (do acrônimo em inglês, IoT), realidade Virtual e Aumentada, Inteligência Artificial, *Big Data* e virtualização para o desenvolvimento de produtos e serviços customizados.

Da mesma forma, essas novas tecnologias também devem ser integradas através de uma plataforma que suporte o autogerenciamento e flexibilidade, o que

pode ser encontrado nas redes SDN. A utilização de SDN vem ao encontro das necessidades da Indústria 4.0, ao se apresentar como uma ferramenta fundamental para a implantação das tecnologias, atendendo a diversos desafios a exemplo da capacidade de adaptação da rede SDN, assim como da eficácia energética que é capaz de aprimorar toda a comunicação entre os equipamentos.

Nas próximas seções são apresentados os detalhes que envolveram os experimentos realizados.

4.4.1 Caracterização do experimento

Os cenários de simulação realizados foram estruturados de acordo com a especificidade de cada tecnologia, porém mantendo o número de dispositivos, largura de banda, protocolo de roteamento, de forma a garantir igualdade de condições. A análise de todos os cenários acontece com carga leve e com contingenciamento.

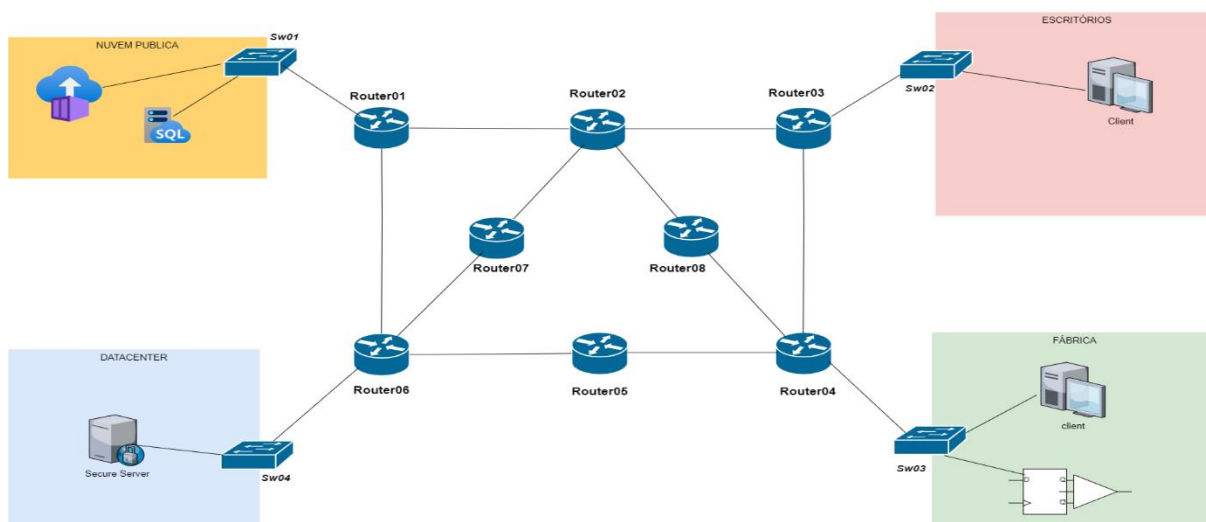
As estratégias, topologias e mecanismos implementados nos experimentos desse estudo se baseiam em dois cenários diante das especificidades de cada rede: a rede legada MPLS e outra rede híbrida, onde a rede MPLS e a rede SDN coexistem.

4.4.2 Rede Legada MPLS

Nesta seção é apresentada a topologia usada no cenário de rede legada MPLS, e que servirá como base para realização da migração para rede híbrida, ilustrado na Figura 8.

No contexto ilustrado na Figura 8, o cenário de referência para a prototipação e experimentação MPLS empregado neste trabalho é composto por roteadores, 4 *switches* 3725 e três terminais/*hosts*. Basicamente a topologia é formada por três redes distintas interligadas por roteadores de borda, executando a comunicação através do protocolo OSPF (*Open Shortest Path First*), que por sua vez viabiliza a troca de informações entre os Sistemas Autônomos (*Autonomous System - AS*).

Figura 8 - Topologia de Rede MPLS
TOPOLOGIA DE REDE MPLS



Fonte: Própria do autor desta dissertação (2021).

Além do descrito, são seguidas as mesmas políticas de gerência técnica e compartilhadas políticas internas e externas bem definidas de roteamento. Assim como a utilização do protocolo MPLS (*Multi-Protocol Label Switching*), que é uma tecnologia de construção de serviço de túnel de dados para redes de telecomunicações de alto desempenho para comutação e troca de informações entre os roteadores de núcleo (YASINI, 2018).

4.4.3 Definição das aplicações usadas

Para as experimentação dos cenários de redes ilustrados nesta seção, foram utilizadas as soluções de software apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Definições das Aplicações utilizadas

Software	Versão	Sistemas
Oracle VM Virtualbox	VirtualBox-6.0.14-133895-Win	Windows 10
GNS3	GNS3-2.2.3-all-in-one-regular	Windows 10
Controlador Ryu		Debian
Jperf	2.0.2	Windows 10
Open vSwitch	2.4	
OpenFlow	1.3	
Windows 7	Professional	
Windows Server	2012 R2	

Fonte: Própria do autor desta dissertação (2021).

Oracle VM Virtualbox: É o software de virtualização de código aberto e oferece uso ilimitado sob os termos da versão GNU (*General Public License*). O Oracle Virtual Box oferece aos usuários a capacidade de criar um grande número de máquinas virtuais (VMs) em computadores com processadores x86 executando diversos sistemas operacionais, tais como Windows, Mac, Linux com bom desempenho. Além de disponibilizar vários de recursos que facilitam a organização e o gerenciamento das VMs e de todos os seus componentes (CPU, memória RAM, HD, rede e etc.) (VOJNAK, et al., 2019).

GNS 3: Conhecido como simulador gráfico de redes ou *Graphical Network Simulator 3*, trata-se de um software que permite a criação de topologias de rede complexas através de interface gráfica (MOTHASIN et al, 2016). O GNS3 foi utilizado nos experimentos desse trabalho, com o objetivo de criar uma topologia gráfica do ambiente virtualizado, uma vez que o software tem suporte nativos para interação com o Oracle VM Virtualbox.

Ryu: É uma implementação python de código aberto de um controlador SDN com uma arquitetura baseada em componentes. Ele possui um conjunto de APIs bem definidas para o desenvolvimento de aplicativos de rede e tem sido amplamente utilizado pela comunidade de pesquisa (SHALIMOV et al., 2013).

Jperf: É um aplicativo *front-end* baseado em java, utilizado para testar largura de banda, podendo realizar injeção de pacotes tanto tcp quanto udp, para medir o desempenho das redes (SHIHAB et al., 2017).

Open vSwitch: é um switch virtual multicamadas de qualidade de produção licenciado sob a licença Apache 2.0 de código aberto. Ele foi projetado para permitir a automação massiva da rede por meio de extensão programática, ao mesmo tempo em que oferece suporte a interfaces e protocolos de gerenciamento padrão (GNS3, 2021).

Openflow: Protocolo aberto utilizado para implementação SDN.

Windows 7 e Server: Sistemas operacionais proprietário da Microsoft para utilização nos hosts.

Para todos os experimentos realizados foram enviados pacotes TCP e UDP entre os dispositivos na rede para medir taxa de transferência, *jitter* e perda de

pacote por um período de 4min. A ferramenta JPerf foi usada para trocar dados, com TCP e UDP, através das portas 1433, 5060 e 1000.

Tabela 2 - Tabela de tráfegos utilizados

Aplicação	Protocolo Transporte	Porta Comunicação	Tempo	Vazão
Stream Video	UDP	1000	4min	Disponível
Banco de Dados	TCP	1433	4min	Disponível
VoIP	UDP	5060	4min	Disponível

Fonte: Próprio do autor desta dissertação (2021).

Na Tabela 2, são apresentados os tipos de tráfego que foram utilizados nos cenários de experimentação para rede mpls e rede hibrida mpls/SDN. Em ambos os cenários foram utilizados um único sentido do tráfego, ou seja, todos os envios de fluxo foram iniciados no *host* cliente (windows7) com destino ao *server01* (windows 2012r2) utilizando duas classes de serviços: a) tráfego melhor esforço na qual enviamos cada fluxo individualmente na rede num periodo de tempo de 4min e b) tráfego com contingenciamento enviando todos os fluxos de voip, *streaming* de video e banco de dados ao mesmo tempo a iniciar em 1s com duração maxima de 4min.

4.4.4 Métricas analisadas

Para que seja possível aferir a qualidade de uma rede, são utilizadas algumas métricas segundo a RFC 2544 (1999) que descreve testes que podem ser usados para avaliar o desempenho de dispositivos de rede, e a forma como os resultados devem ser apresentados. O respectivo documento foi baseado na RFC 1242 (1991), que introduz as terminologias para interconexão de dispositivos de rede.

Tabela 3 - Métricas de tráfego

Métrica	Descrição
Largura de Banda	Número de bits que podem ser transmitidos na rede em um certo período de tempo. É a capacidade máxima de transferência da rede.
Vazão (<i>throughput</i>)	Largura de banda efetiva que determina o desempenho da rede.
Jitter	Variação no atraso
Perdas de pacote	É o número de quadro que foram transmitidos e não chegaram no seu destino.

Fonte: Própria do autor desta dissertação (2021).

4.4.5 Simulação do cenário legado MPLS

O experimento realizado para simular o cenário MPLS, consistiu na utilização do simulador GNS3 usando os seguintes equipamentos: roteadores; *switches* tradicionais; servidor Windows 2012 R2; estação Windows 7 e Linux distribuição ubuntu, usando o virtualbox. As topologias representam redes reais utilizando os roteadores e switches da Cisco, visto que o simulador reproduz a configuração e comportamento desses equipamentos.

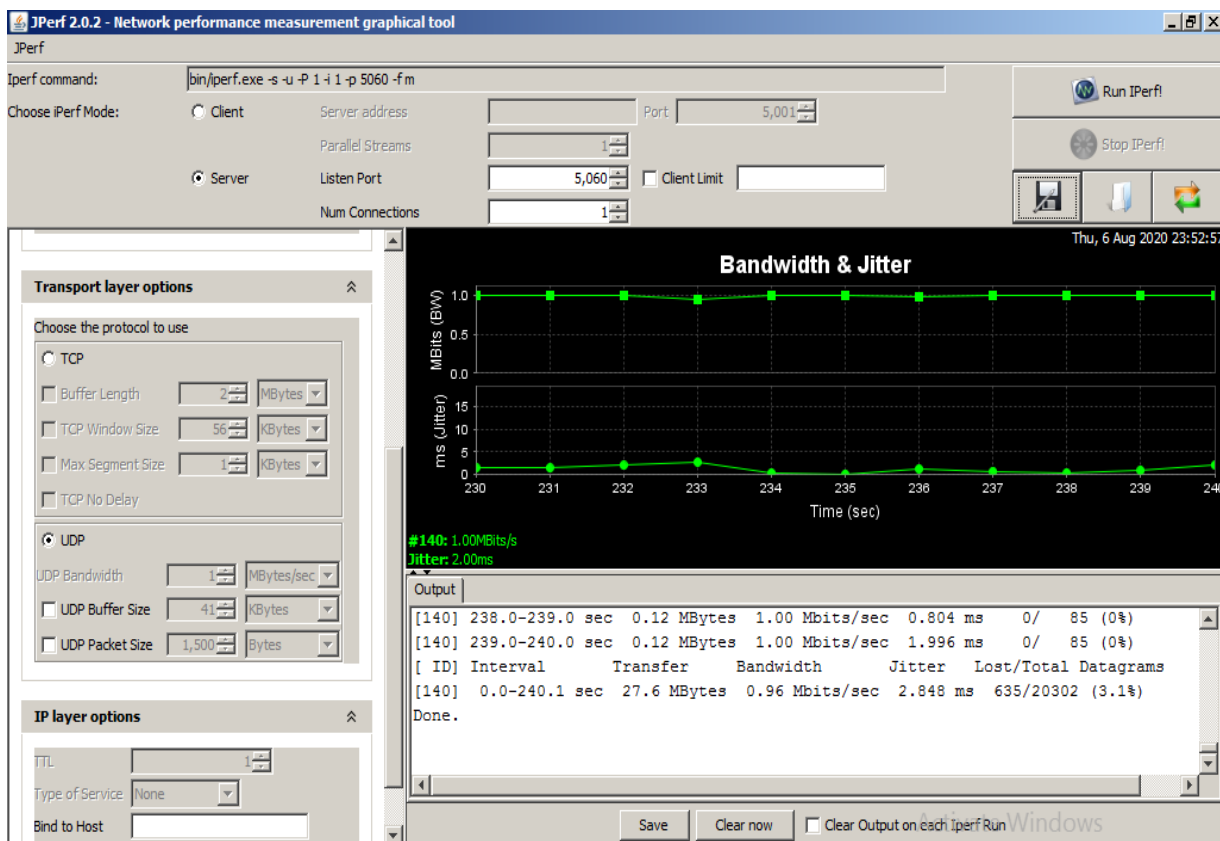
Em termos de hardware, todos os experimentos e simulações foram realizados em um computador com um processador Intel Core i7 de sétima geração, com 16GB de memória RAM, com o sistema operacional Windows Server 2012 R2. Nesse cenário, foram utilizadas duas configurações de simulação, sendo a primeira a simulação de um tráfego melhor esforço e a segunda a simulação de um tráfego de contingenciamento para demonstrar como os tráfegos de voip, banco de dados e *streaming* de video se comportam nesse tipo de rede MPLS.

4.4.6 Tráfego melhor esforço

A Figura 9 representa a taxa de transferência do voip (UDP) na rede MPLS sem contingenciamento por um período de tempo de 4min, a largura de banda não foi especificada. O gráfico 1 apresenta a taxa de transferência média alcançada de 0.96 Mbits/seg durante este experimento. Pode ser visto na Figura 9, que o total transferido foi de 27.6 MBytes. O resultado mostra valores de *throughput* significativamente altos e constantes no que diz respeito à largura de banda máxima disponível, isso se deve

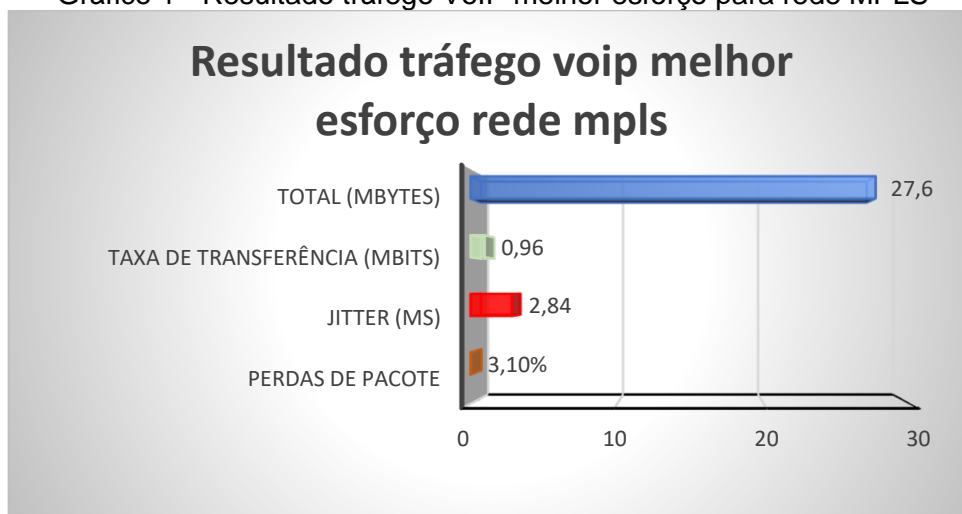
ao design do protocolo, uma vez que nenhum mecanismo de *handshake* e correção de erros na forma de retransmissão de pacotes perdidos e defeituosos é necessário. O *jitter* obteve um valor médio de 2.84 ms com perda de pacote de 3,1% durante o tempo total de execução deste experimento.

Figura 9 - Tráfego voip UDP melhor esforço para rede MPLS



Fonte: Própria do autor desta dissertação (2021).

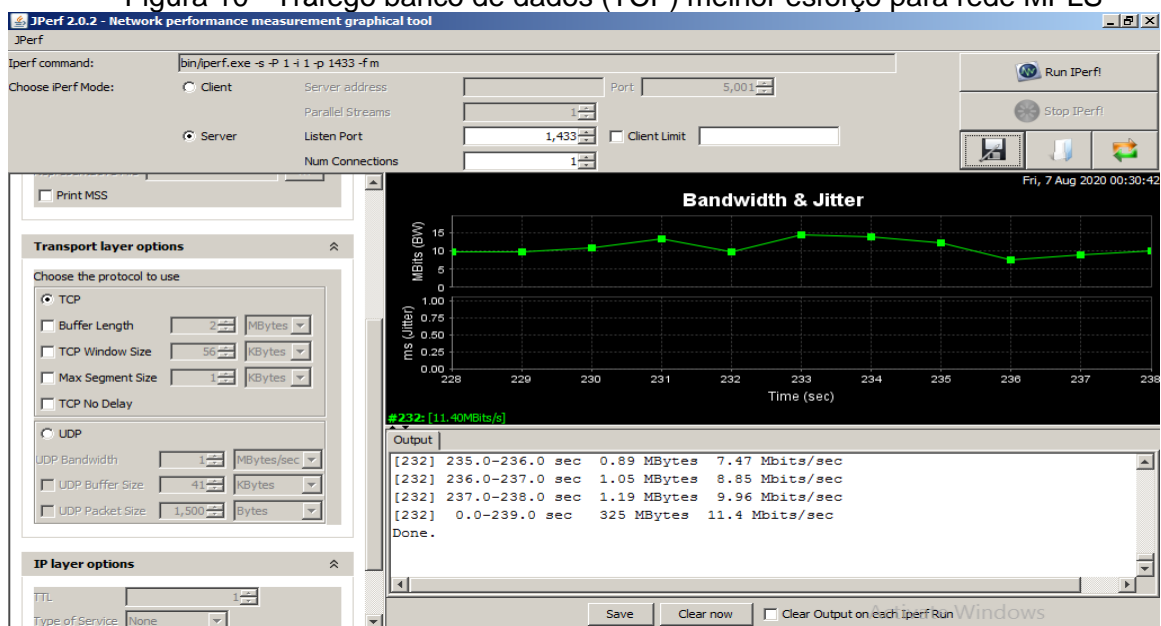
Gráfico 1 - Resultado tráfego VoIP melhor esforço para rede MPLS



Fonte: Própria do autor desta dissertação (2021).

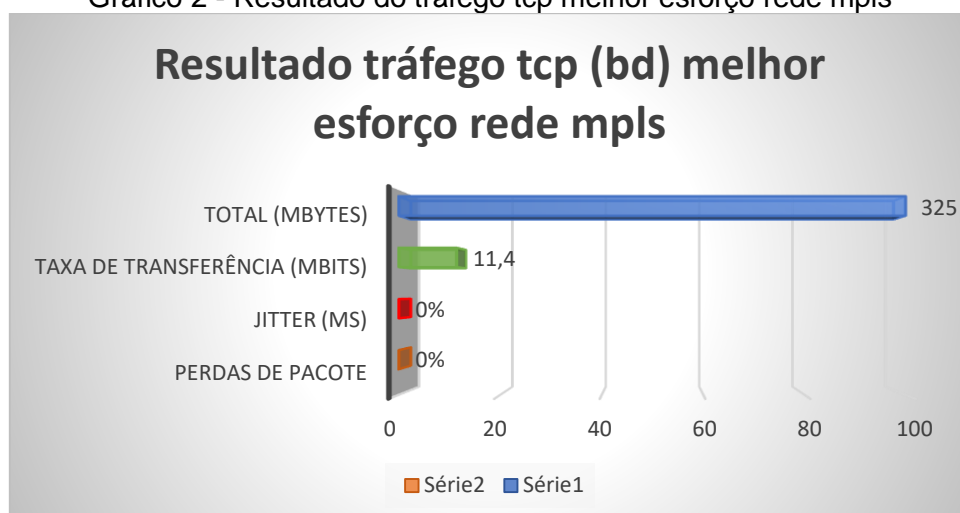
A Figura 10 demonstra a taxa de transferência de banco de dados (TCP) na rede MPLS sem contingenciamento por um período de tempo de 4min, com a largura de banda não definida. O gráfico 2 apresenta a taxa de transferência de 11.4 M bits/seg durante este experimento. Pode ser visto na Figura 10, que o total transferido foi de 325 MBytes. Diante das características do protocolo tcp não foi gerado *jitter* e perda de pacote.

Figura 10 - Tráfego banco de dados (TCP) melhor esforço para rede MPLS



Fonte: Própria do autor desta dissertação (2021).

Gráfico 2 - Resultado do tráfego tcp melhor esforço rede mpls

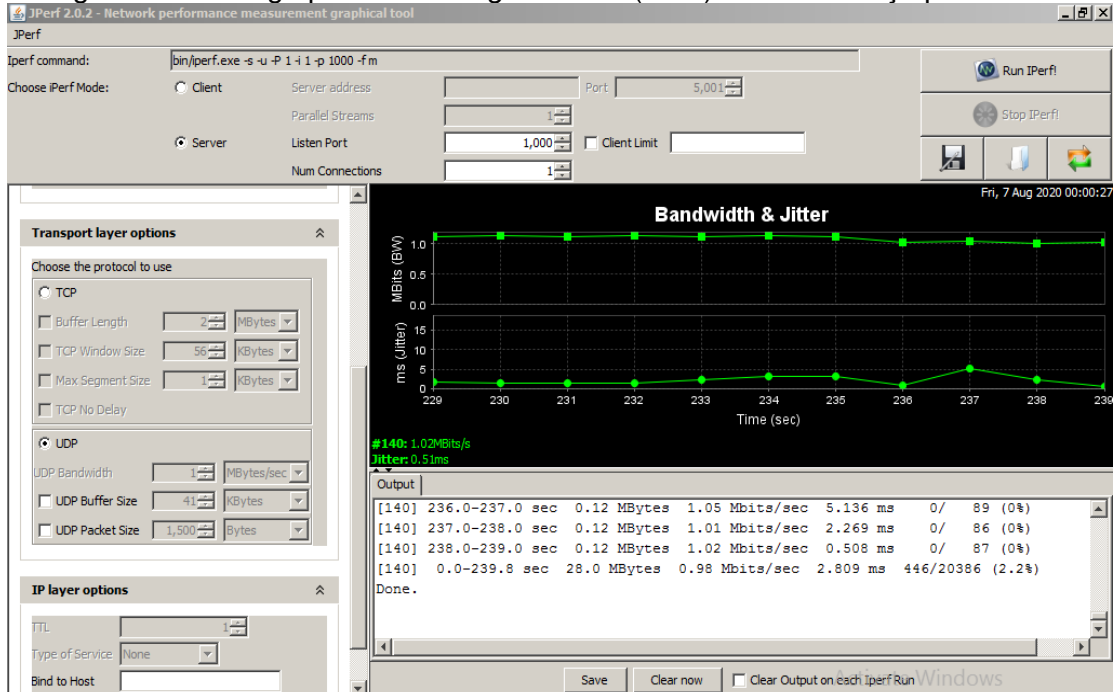


Fonte: Própria do autor desta dissertação (2021).

A Figura 11 representa a taxa de transferência para *streaming* de video (UDP) na rede MPLS sem contingenciamento por um período de tempo de 4min, a largura

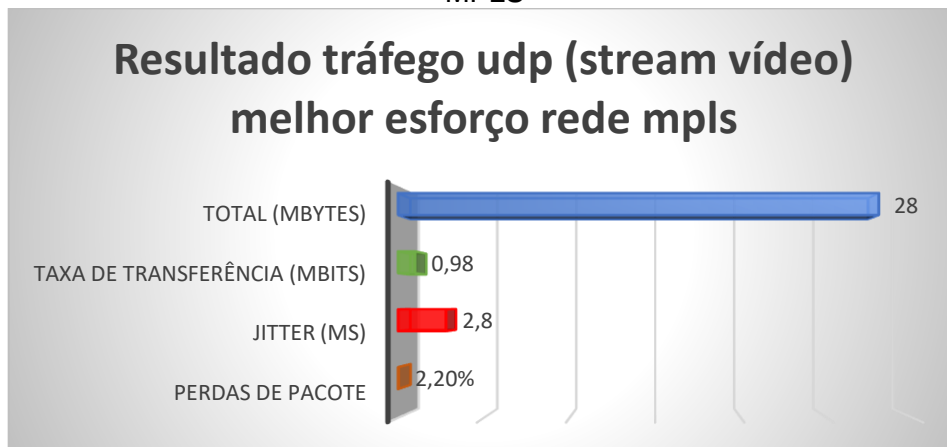
de banda não foi especificada. O Gráfico 3 apresenta a taxa de transferência média alcançada de 0.98 Mbits/seg durante este experimento. Pode ser visto na Figura 11, que o total transferidos foi de 28.0 Mbytes. O *jitter* ficou com valor médio de 2.80 ms com perda de pacote de 2,2% durante o tempo total de execução deste experimento.

Figura 11 - Tráfego para *streaming* de vídeo (UDP) melhor esforço para MPLS



Fonte: Própria do autor desta dissertação (2021).

Gráfico 3 - Resultados tráfego para *streaming* de vídeo (UDP) melhor esforço rede MPLS



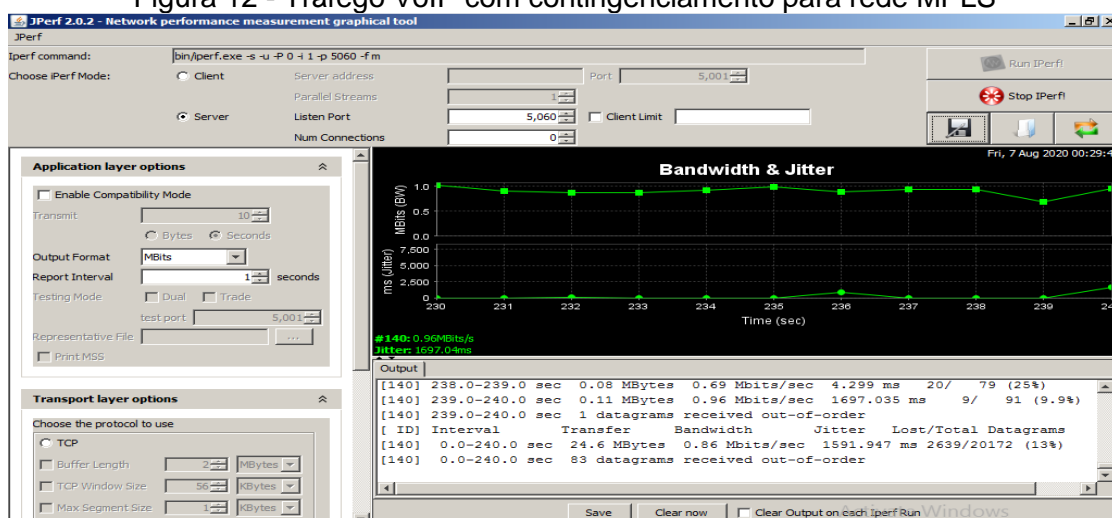
Fonte: Própria do autor desta dissertação (2021).

4.4.7 Tráfego com contingenciamento

A Figura 12 representa a taxa de transferência do UDP na rede MPLS com contingenciamento por um período de tempo de 4min, a largura de banda não foi

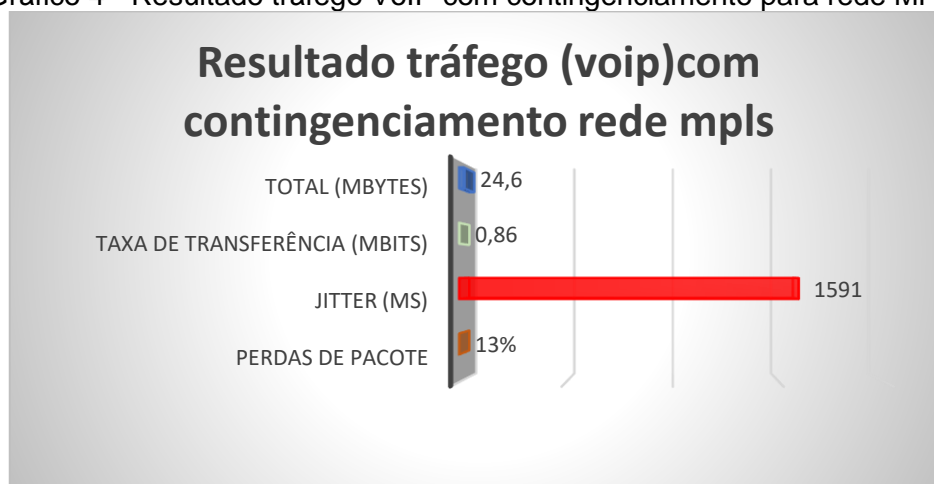
especificada. O gráfico 4 apresenta a taxa de transferência média alcançada de 0.86 Mbits/seg durante este experimento. Pode ser visto na Figura 12, que o total transferido foi de 24.6 Mbytes. As taxas de *jitter* e perdas de pacotes ficaram respectivamente em 1.591 ms e 13% são relativamente altas, pois foram iniciados outros tráfegos de banco de dados e *streaming* de vídeo simultaneamente durante o tempo total de execução. É possível verificar a ocorrência de muita fragmentação dos pacotes.

Figura 12 - Tráfego VoIP com contingenciamento para rede MPLS



Fonte: Própria do autor desta dissertação (2021).

Gráfico 4 - Resultado tráfego VoIP com contingenciamento para rede MPLS

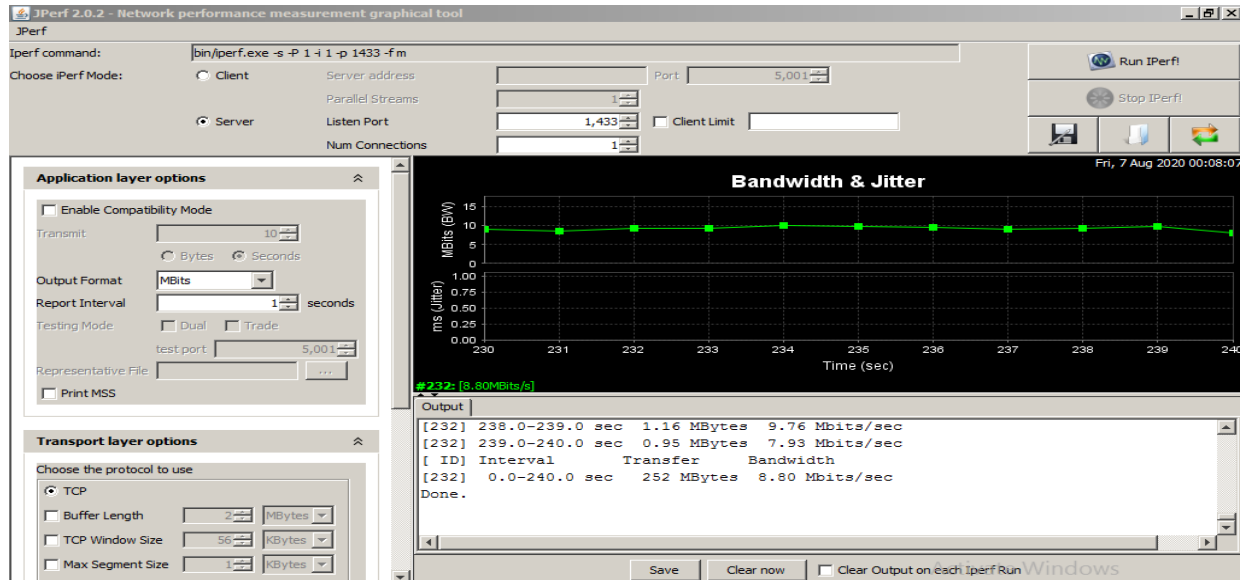


Fonte: Própria do autor desta dissertação (2021).

A Figura 13 representa a taxa de transferência do TCP na rede MPLS com contingenciamento por um período de tempo de 4min, com a largura de banda não definida. O gráfico 5 apresenta a taxa de transferência de 8.80 Mbits/seg durante este experimento. Pode ser visto na Figura 13, que o total transferido foi de 252 MBytes no

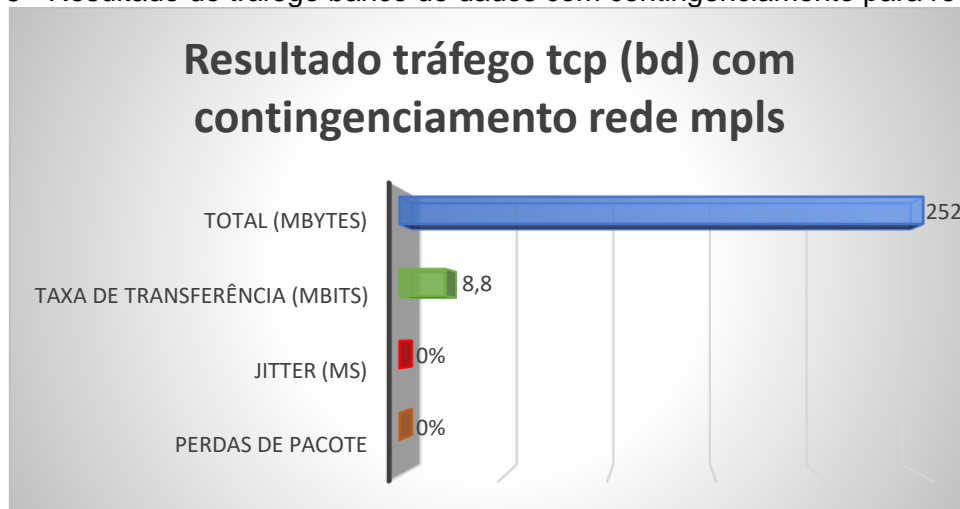
período de tempo de 4min. Diante das características do protocolo tcp não foi gerado jitter e perda de pacote.

Figura 13 - Tráfego de banco de dados com contingenciamento para MPLS



Fonte: Própria do autor desta dissertação (2021).

Gráfico 5 - Resultado do tráfego banco de dados com contingenciamento para rede MPLS

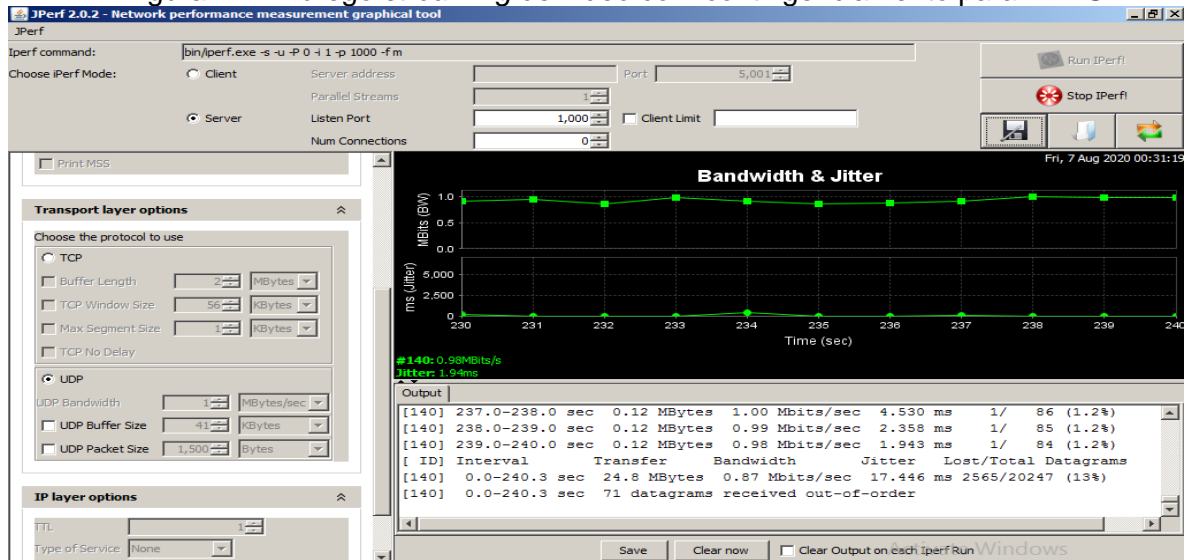


Fonte: Própria do autor desta dissertação (2021).

A Figura 14 representa a taxa de transferência do de *streaming* de vídeo (UDP) na rede MPLS com contingenciamento por um período de tempo de 4min, a largura de banda não foi especificada. O gráfico 6 apresenta a taxa de transferência média alcançada de 0.87 Mbits/seg durante este experimento. Pode ser visto na Figura 14, que o total transferido foi de 24.8 MBytes. As taxas de *jitter* e perdas de pacotes ficaram respectivamente em 17.44 ms e 13%, pois foram iniciados outros tráfegos de

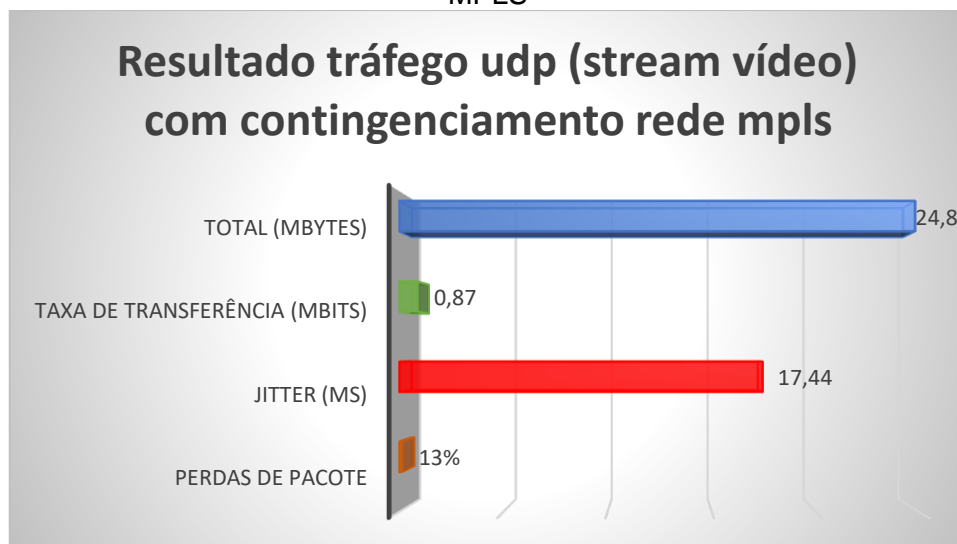
banco de dados e VoIP simultaneamente durante o tempo total de execução. É possível verificar a ocorrência de fragmentação dos pacotes.

Figura 14 - Tráfego *streaming* de vídeo com contingenciamento para MPLS



Fonte: Própria do autor desta dissertação (2021).

Gráfico 6 - Resultado do tráfego de *streaming* de vídeo com contingenciamento para rede MPLS



Fonte: Própria do autor desta dissertação (2021).

4.4.8 Cenário híbrido

Com os resultados obtidos da rede legada MPLS e buscando um cenário de melhoria destas redes, foi proposto uma metodologia para a migração para redes SDN através da adoção de redes híbridas. Esse processo de hibridização da rede visa proporcionar uma entrega dos fluxos com melhor qualidade, dentre outros benefícios

das redes híbridas, descritos anteriormente.

4.4.9 Ilustrando a migração

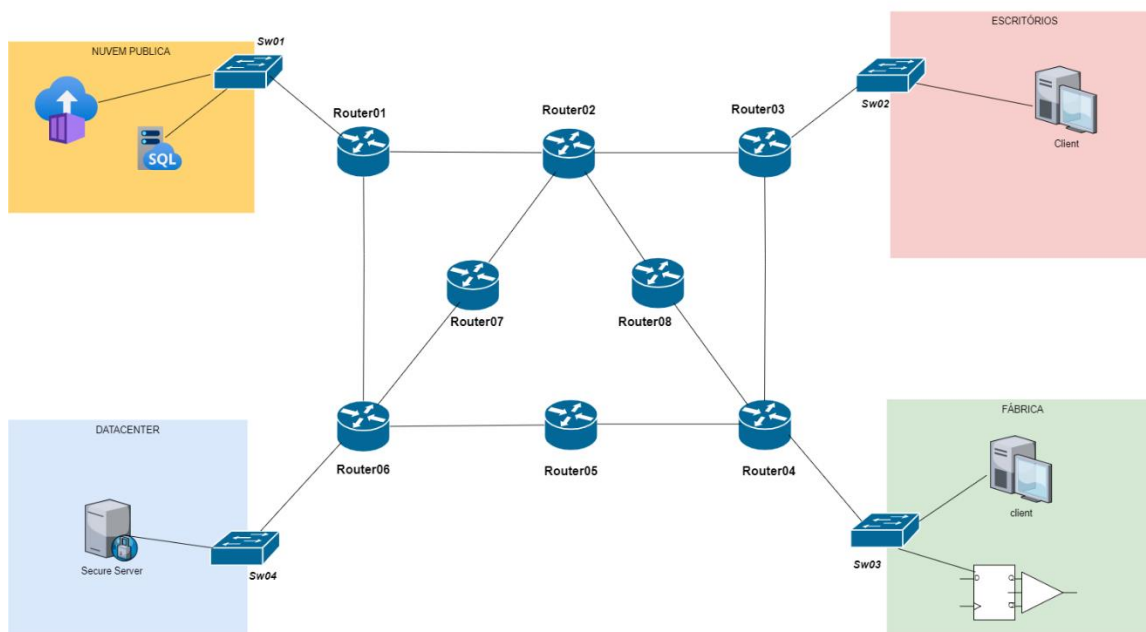
Etapa 1: Levantamento e identificação dos requisitos da rede a ser migrada.

Nesta etapa é necessário identificar as características da rede legada e determinar os requisitos essenciais da rede alvo.

Características físicas da rede: roteadores com processador de 1,6 GHz, 4GB de RAM e interfaces Ethernet; o cabeamento utilizado foram cabos par-trançado cat6.

Características lógicas da rede: O tráfego associado a aplicações de acesso a banco de dados, *streaming* de video e voz sobre ip (voip).

Figura 15 - Ilustração de uma topologia de rede MPLS
TOPOLOGIA DE REDE MPLS



Fonte: Própria do autor desta dissertação (2021).

Requisitos identificados: A rede deve possuir alta disponibilidade uma vez que topologia permite múltiplos caminhos entre a origem e destino; a rede deve oferecer alta performance e robustez na utilização do OSPF como protocolo de roteamento interno e MPLS para o roteamento externo. A utilização de MPLS permite que a rede tenha melhor desempenho fazendo comutação de pacotes e segmentação do tráfego da rede para maior segurança. Com a migração para rede SDN, os requisitos de disponibilidade, performance, robustez e segurança deverão se mantidos (ou melhorados), além de um melhor gerenciamento da rede proporcionado pelo

controlador SDN.

Etapa 2: Planejar o melhor cenário de migração.

Nesta etapa é necessário obter informação acerca do protocolo OpenFlow, suas especificidades e funcionalidades, bem como sobre os dispositivos de *hardware* necessários para a migração.

Neste experimento entendemos que a classificação mais adequada para migração seria a *sobreposição SDN*. Através dessa técnica, é construída uma sobreposição no topo da rede legada e alguns dispositivos são escolhidos e substituídos na rede por dispositivos SDN a fim de viabilizar a migração para rede híbrida e facilitar o gerenciamento de tráfego.

Para estabelecer a comunicação entre os *switches* SDN adicionados na rede e o controlador RYU, foi utilizado o protocolo *openflow* versão 1.3 que tem como diferencial das versões anteriores o controle dos pacotes por fluxo, análise de métricas e tabela de características, para menor impacto possível na operacionalização da rede.

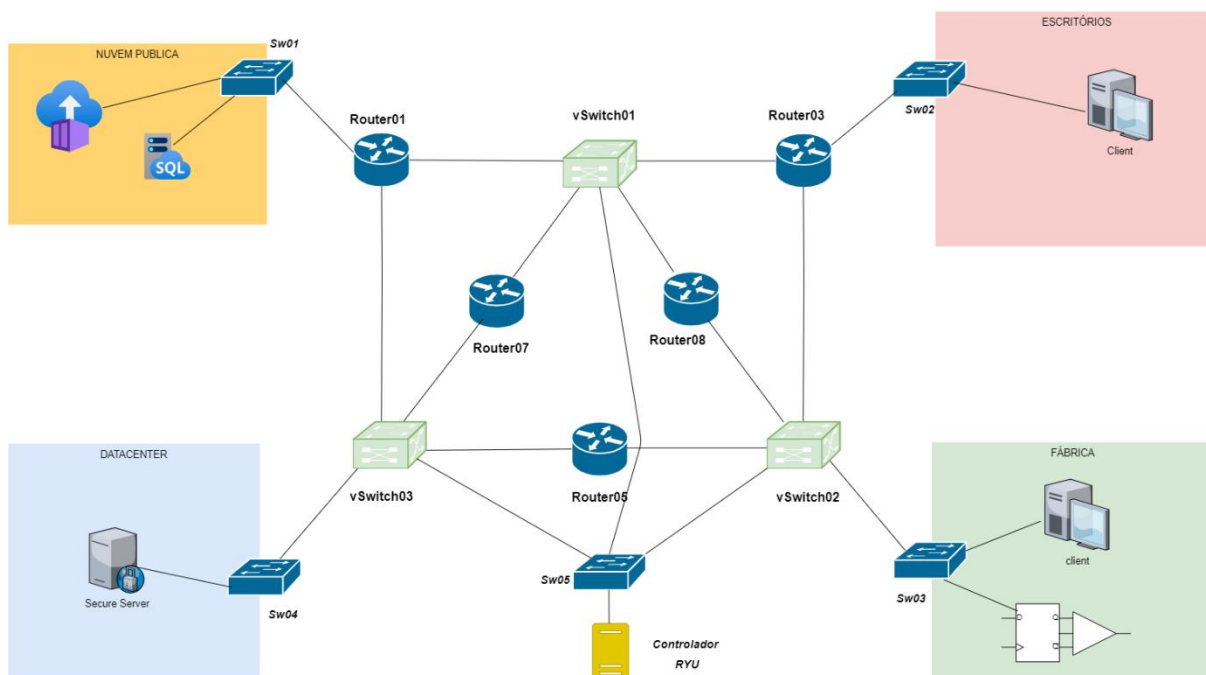
Etapa 3: Realizar o planejamento físico e lógico da rede alvo.

Nesta etapa é necessário realizar o planejamento físico e lógico com vista a manter a totalidade dos recursos e serviços sem que haja perda de desempenho, ainda que nem sempre seja possível porém ao menos minimizada.

Características físicas da rede: roteadores e *switches* SDN com processador de 1,6 GHz, 4GB de RAM e interfaces Ethernet; o cabeamento utilizado foram cabos par-trançado cat6. Como é possível notar, as características físicas da rede legada foram mantidas, de forma que a migração para SDN possa ser minimamente invasiva.

Características lógicas da rede: O tráfego associado são os mesmo da rede MPLS: banco de dados, *streaming* de video e voz sobre ip (voip).

Figura 16 - Ilustração de uma topologia de rede híbrida
TOPOLOGIA DE REDE HÍBRIDA



Fonte: Própria do autor desta dissertação (2021).

Requisitos identificados: Planejar o local de inserção dos *switches* SDN em pontos relevantes na qual obrigatoriamente todos os tráfegos proveniente da origem ao destino passem por algum *switch* SDN. Para que fosse possível manter todos os critérios de alta disponibilidade, performance e robustez foram mantidos os protocolos de roteamento dinâmicos OSPF e MPLS.

Etapa 4: Promover a simulação do funcionamento da rede em um ambiente

De forma a validar o projeto da migração, e também proporcionar maior controle sobre a mesma, evitando possíveis impasses financeiros ou técnicos, cabe realizar a simulação do funcionamento dos equipamentos em um ambiente de teste para legitimar configurações e a operação da rede híbrida.

Requisitos identificados: Visando viabilizar os experimentos realizados nesta dissertação, todas as simulações foram realizadas utilizando o software GNS-3, controlador Ryu, roteadores, *switches* SDN e Jperf para geração de tráfego.

Etapa 5: Preparar a rede para migração de forma faseada.

Nesta etapa é realizada a preparação para a migração, na qual a rede poderá ser deslocada para um estado intermediário a partir do qual será possível prosseguir.

Requisitos identificados: Nesta etapa foi realizada a *configuração física* do controlador e dos *switches* SDN e ligação dos cabos conforme definido na etapa 3. Nesse ponto, foi importante a agregação incremental do controlador e dos switches SDN, um a um, de forma a validar a integração do equipamento com a rede legada, sem afetar de forma disruptiva o funcionamento da rede.

Etapa 6: Implementar as configurações no controlador e nos *switches* SDN, validando a sua integração com a rede legada.

Nesta etapa é realizada a *configuração lógica* dos equipamentos (*Switches* SDN e Controlador Ryu), isso envolve endereçamento lógico, configuração e conexão do protocolo *openflow* versão 1.3 com o controlador Ryu. Nesse momento, foi detectada a necessidade de implementar um aplicativo que viabilizasse a integração (comunicação) entre os dispositivos SDN e a rede legada. O software implementado funciona como um monitor de eventos *openflow* de entrada e resposta aos recursos, objetivando orquestrar a rede e adicionar visibilidade ao operador. Em eventos relacionados a resposta de recursos, o controlador os utiliza como gatilho para instalar regras básicas de encaminhamento nos *switches*, e em caso dos eventos dos pacotes de entrada é realizado uma análise do conteúdo original de forma a identificá-los como pacotes MPLS. Caso afirmativo, encaminha-os para todas as portas exceto a de origem.

Requisitos identificados: Já com características de produção, os usuários passam a fazer uso dos serviços e recursos das tecnologias disponíveis na rede. Nessa fase, é relevante consolidar o desempenho e a disponibilidade das funcionalidades almeçadas, assim como averiguar a integração, compatibilidade e comunicação com os equipamentos das diferentes tecnologias envolvidas, sejam eles da mesma rede ou de redes distintas. É importante notar que as Etapas 5 e 6 são correlacionadas já que as integrações física e lógica são realizadas concomitantemente para cada equipamento agregado.

Como ilustrado na Figura 16, o cenário de rede híbrida adotado neste trabalho, representa a hibridização de uma rede legada MPLS através da agregação incremental dos dispositivos SDN e do controlador RYU.

Etapa 7: Planejamento da validação da migração.

Nesta etapa são propostas as estratégias para a validação da migração realizada de acordo com os objetivos (performance, segurança, qualidade de serviço,

etc.) da organização. Para isso, é importante a definição das métricas a serem aferidas de forma a validar se os requisitos e expectativas de manutenibilidade e funcionalidade da rede híbrida MPLS/SDN foram atingidos.

Requisitos identificados: A validação das expectativas e funcionalidades serão aferidas através das métricas de largura de banda, vazão, *jitter* e perdas de pacote.

Etapa 8: Realizar as atividades de análise e diagnóstico.

Nesta etapa devem ser coletadas e aferidas as métricas definidas para a avaliação da rede híbrida, avaliadas as conexões, funcionalidades e desempenho da rede.

Requisitos identificados: No ambiente em produção, os administradores de rede utilizam ferramentas como Jperf para geração de tráfego, com objetivo de extrair gráficos de métricas, tais como: largura de banda, vazão, jitter e perda de pacotes, de forma a validar o estado da rede.

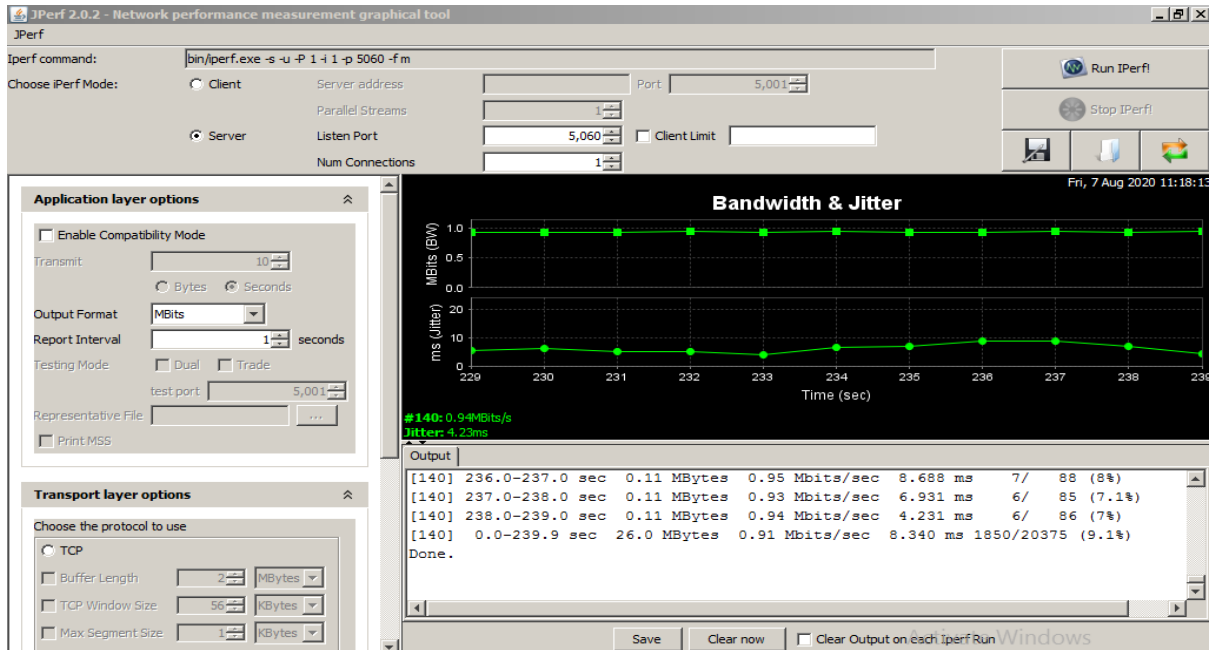
Nesse experimento utilizamos a classificação da rede denominada de sobreposição SDN na qual alguns dos dispositivos escolhidos na rede são substituídos por dispositivos SDN a fim de facilitar a aplicação e melhor gerenciamento de tráfego. O controlador vê a sobreposição SDN como uma rede real, conforme ilustrado na Figura 16.

Esta etapa é ilustrada através dos resultados de análise apresentados nas seções 4.4.10 e 4.4.11.

4.4.10 Tráfego sem contingenciamento da rede híbrida

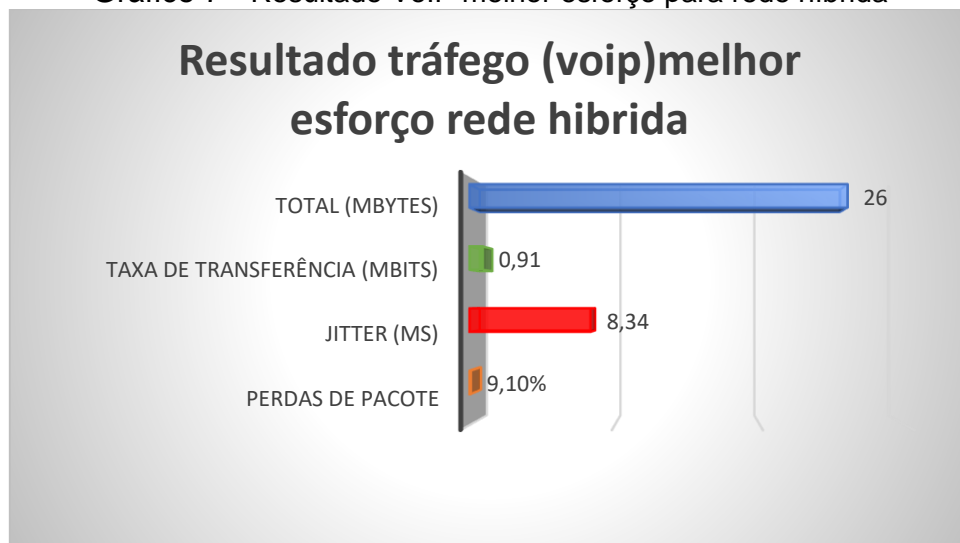
A Figura 17 representa a taxa de transferência do UDP na rede híbrida por um período de tempo de 4min, a largura de banda não foi especificada. O gráfico 7 apresenta a taxa de transferência alcançada de 0.91 Mbits/seg durante este experimento. Pode ser visto na Figura 17, que o total transferido foi de 26.0 MBytes. As taxas de *jitter* e perdas de pacotes ficaram respectivamente em 8.34 ms e 9.1%.

Figura 17 - Tráfego VoIP melhor esforço para rede híbrida



Fonte: Própria do autor desta dissertação (2021).

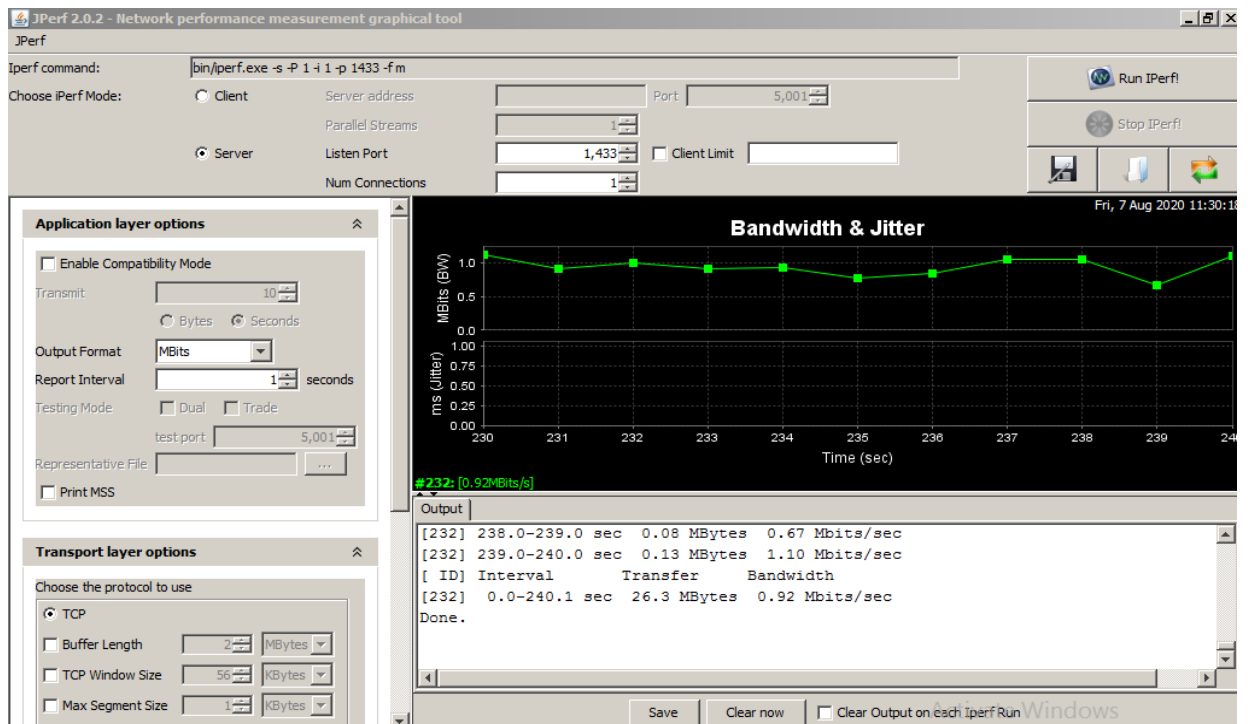
Gráfico 7 - Resultado VoIP melhor esforço para rede híbrida



Fonte: Própria do autor desta dissertação (2021).

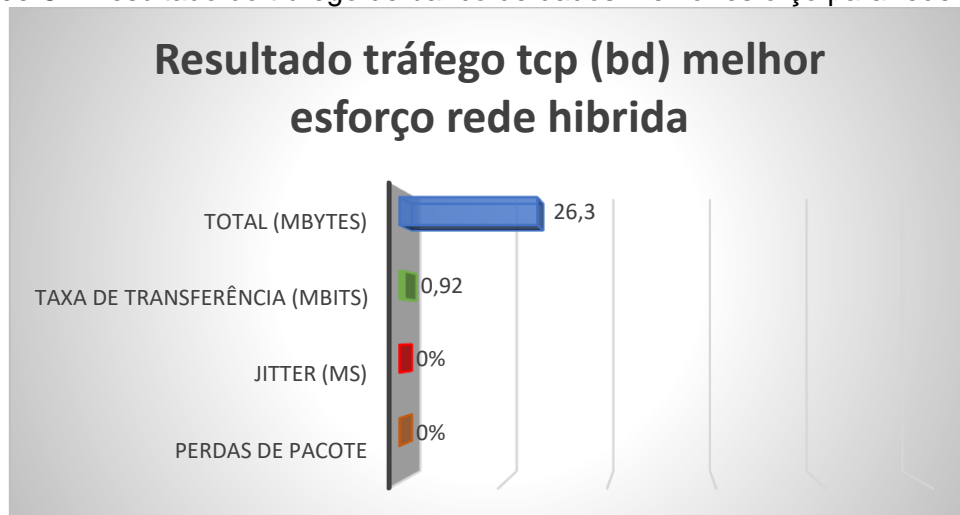
A Figura 18 representa a taxa de transferência do TCP para rede híbrida por um período de tempo de 4min, a largura de banda não foi especificada. O gráfico 8 apresenta a taxa de transferência alcançada de 0.92 Mbits/seg durante este experimento. Pode ser visto na Figura 4.13, que o total transferido foi de 26.3 MBytes.

Figura 18 - Tráfego para banco de dados melhor esforço para rede híbrida



Fonte: Própria do autor desta dissertação (2021).

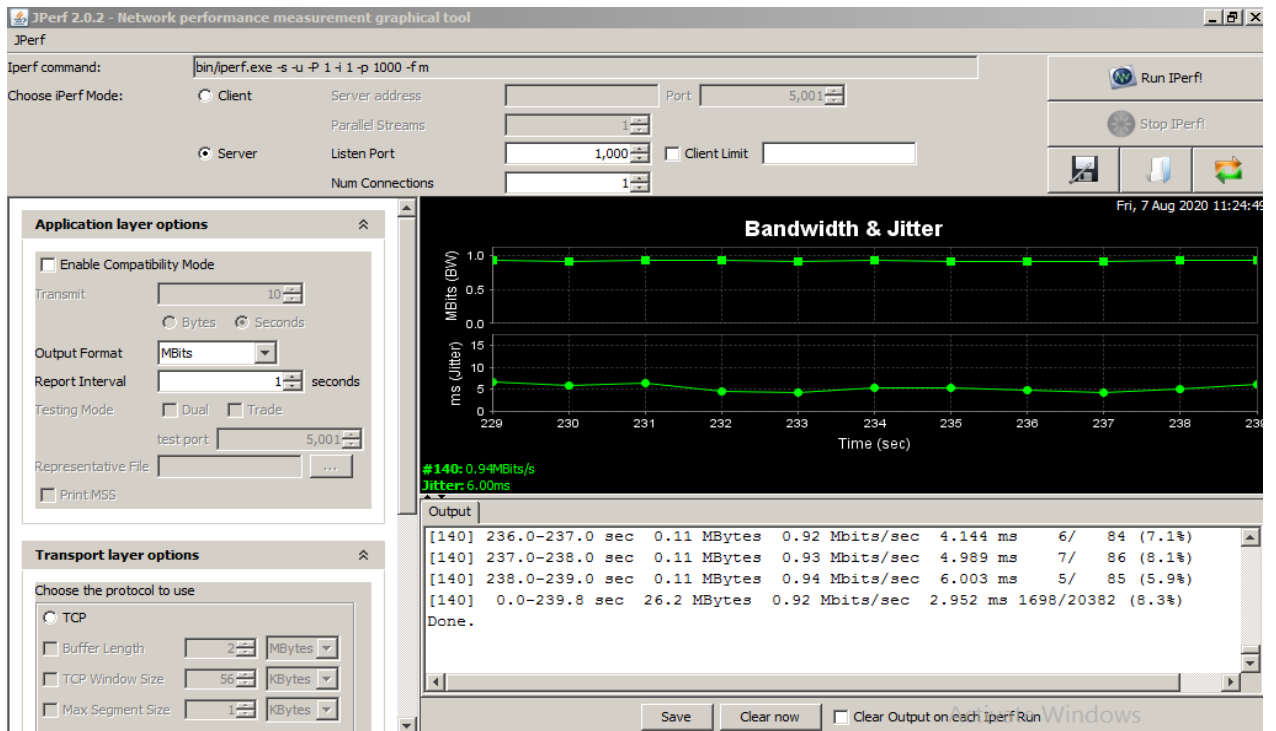
Gráfico 8 - Resultado do tráfego de banco de dados melhor esforço para rede híbrida



Fonte: Próprio autor, 2021.

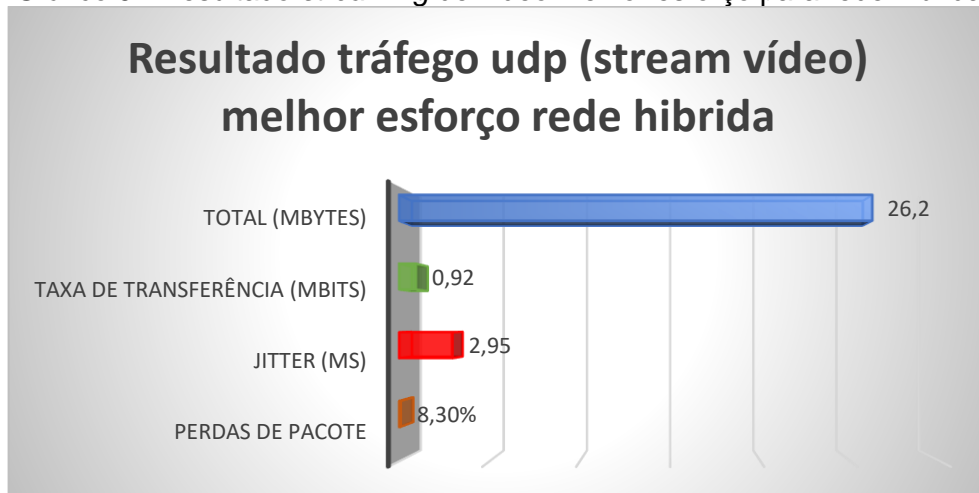
A Figura 19 representa a taxa de transferência do UDP na rede híbrida por um período de tempo de 4min, a largura de banda não foi especificada. O gráfico 9 apresenta a taxa de transferência alcançada de 0.92 Mbits/seg durante este experimento. Pode ser visto na Figura 18, que o total transferido foi de 26.2 MBytes. As taxas de *jitter* e perdas de pacotes ficaram em 2.95 ms e 8.3% respectivamente.

Figura 19 - Tráfego *streaming* de vídeo melhor esforço para rede híbrida



Fonte: Própria do autor desta dissertação (2021).

Gráfico 9 - Resultado *streaming* de vídeo melhor esforço para rede híbrida



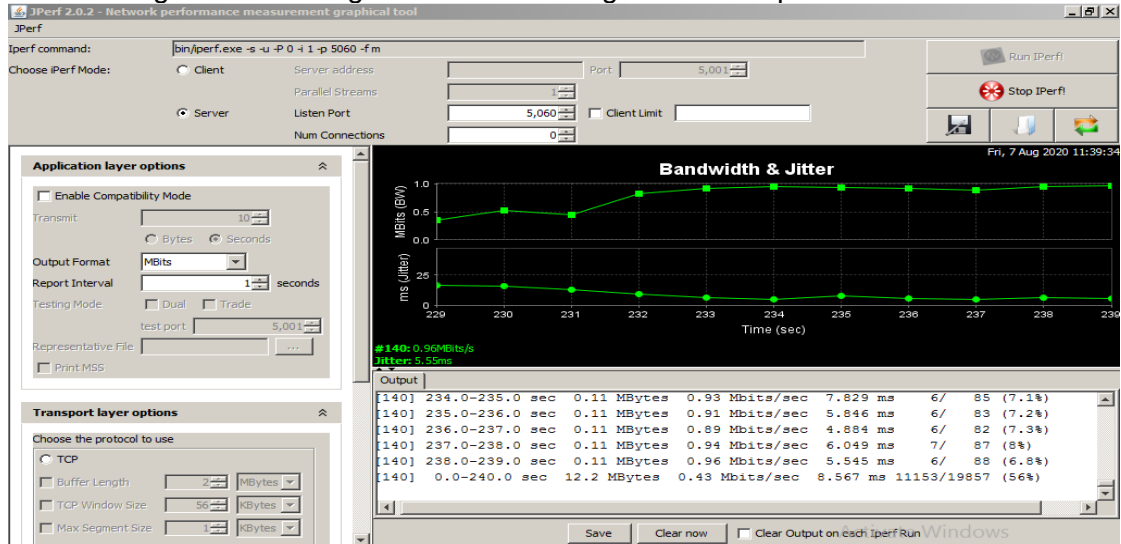
Fonte: Própria do autor desta dissertação (2021).

4.4.11 Tráfego com contingenciamento na rede híbrida

A Figura 20 representa a taxa de transferência do UDP na rede híbrida com contingenciamento por um período de tempo de 4min, a largura de banda não foi especificada. O gráfico 10 apresenta a taxa de transferência alcançada de 0.43 Mbits/seg durante este experimento. Pode ser visto na Figura 19, que o total

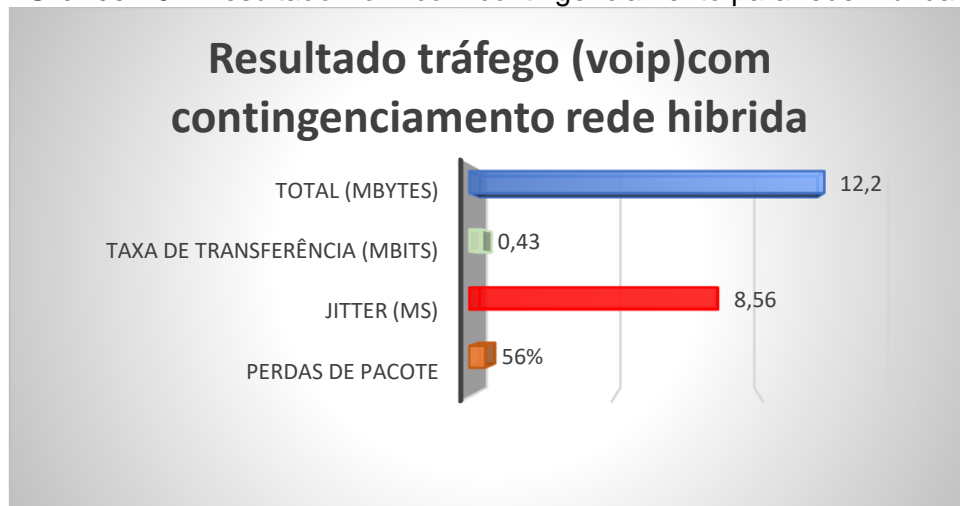
transferido foi de 12.2 MBytes. As taxas de jitter e perdas de pacotes ficaram respectivamente em 8.56 ms e 56%, pois foram iniciados outros tráfegos de banco de dados e voip simultaneamente durante todo o tempo do experimento.

Figura 20 - Tráfego VoIP com contingenciamento para rede híbrida



Fonte: Própria do autor desta dissertação (2021).

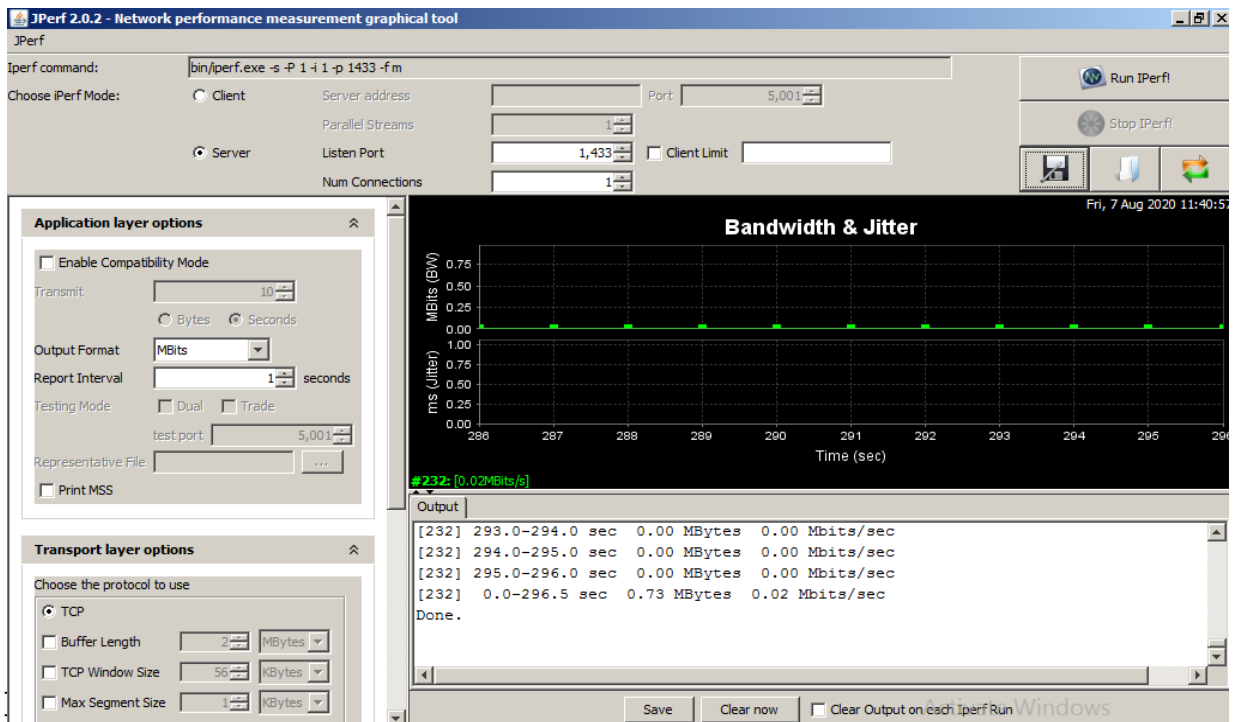
Gráfico 10 - Resultado VoIP com contingenciamento para rede híbrida



Fonte: Própria do autor desta dissertação (2021).

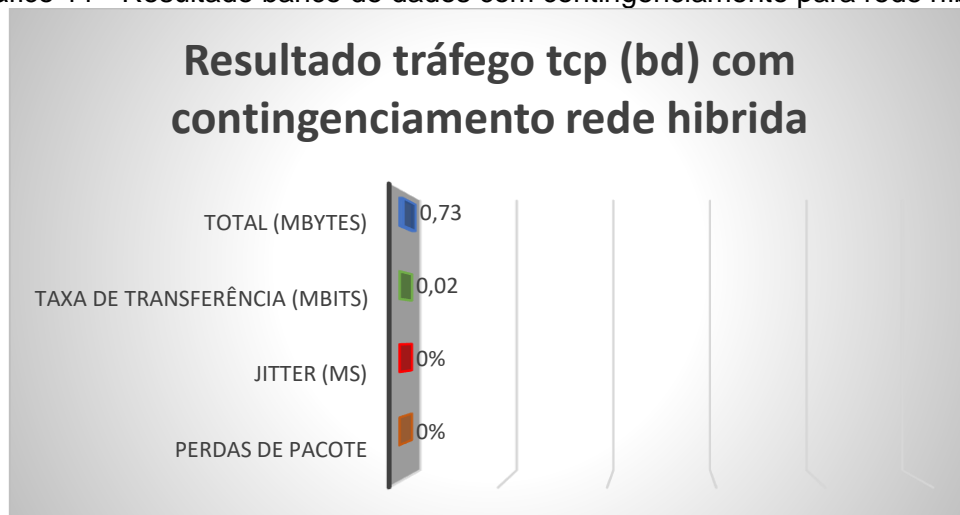
A Figura 21 representa a taxa de transferência do tcp na rede híbrida com contingenciamento por um período de tempo de 4min, a largura de banda não foi especificada. O gráfico 11 apresenta a taxa de transferência alcançada de 0.02 Mbits/seg durante este experimento. Pode ser visto na Figura 20, que o total transferido foi de 0.73 MBytes.

Figura 21 - Tráfego banco de dados com contingenciamento para rede híbrida



Fonte: Própria do autor desta dissertação (2021).

Gráfico 11 - Resultado banco de dados com contingenciamento para rede híbrida

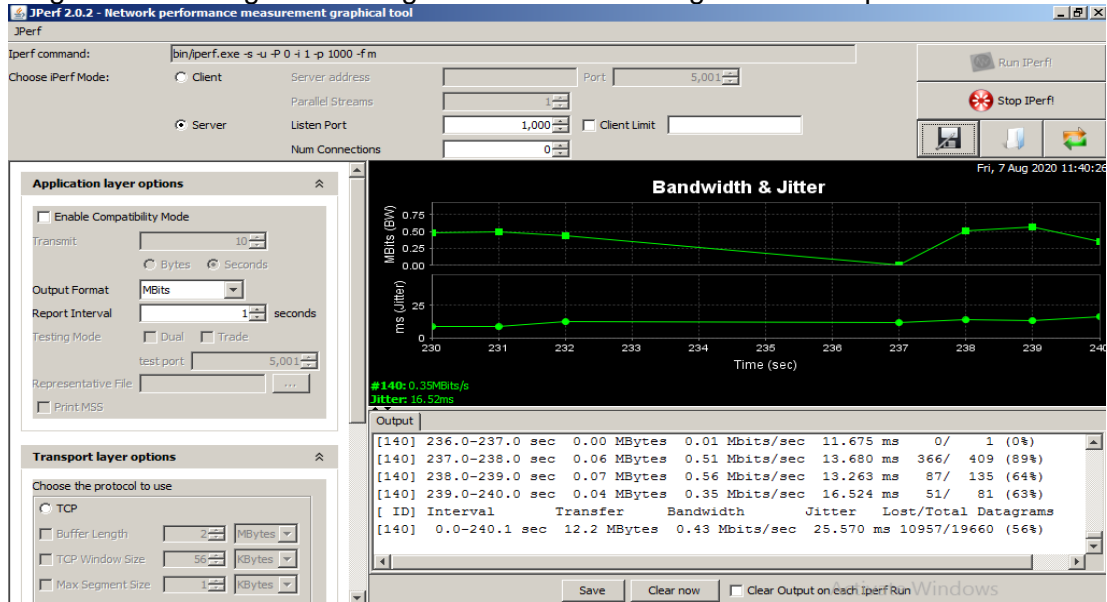


Fonte: Própria do autor desta dissertação (2021).

A Figura 22 representa a taxa de transferência do UDP na rede híbrida com contingenciamento por um período de tempo de 4min, a largura de banda não foi especificada. O gráfico 12 apresenta a taxa de transferência alcançada de 0.43 M bits / seg durante este experimento. Pode ser visto na Figura 21, que o total transferidos foi de 12.2 M bytes / seg. As taxas de jitter e perdas de pacotes ficaram

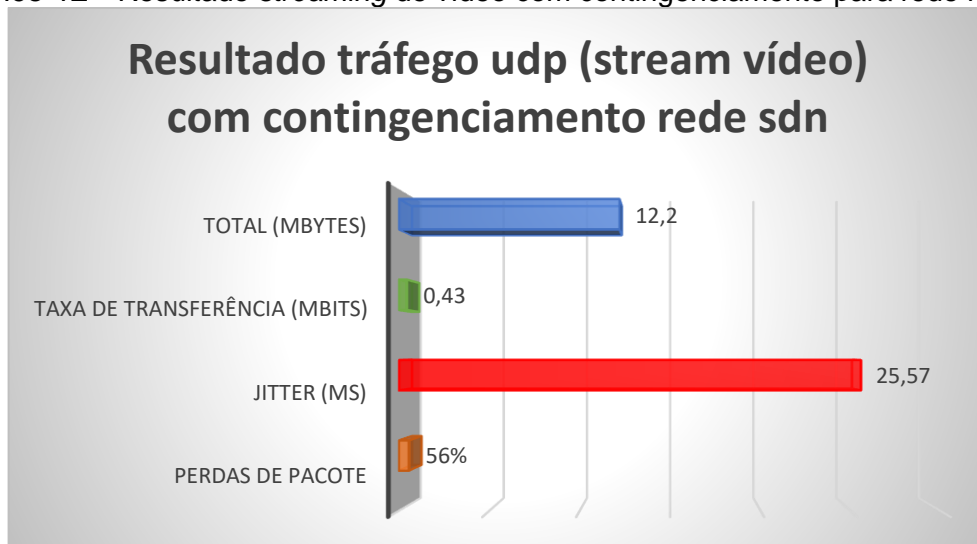
respectivamente em 25.57 ms e 56%, pois foram iniciados outros trafegos de banco de dados e voip simultaneamente durante todo o tempo do experimento.

Figura 22 - Tráfego Streaming de vídeo com contingenciamento para rede híbrida



Fonte: Próprio autor, 2021.

Gráfico 12 - Resultado *streaming* de vídeo com contingenciamento para rede híbrida



Fonte: Própria do autor desta dissertação (2021).

4.5 DISCUSSÃO

Há alguns anos as redes de computadores vem enfrentando grandes dificuldades proveniente principalmente no aumento do número de dispositivos,

aplicativos e volume de dados. Onde tornou-se mais evidente a dificuldade das redes em gerenciamento, escalabilidade e velocidade na entrega dos fluxos, mesmo com o advento da comutação por pacotes MPLS, engenharia de tráfego (ET) e qualidade de serviço (QoS). Essas abordagens minimizaram os problemas, porém ficaram distantes de ser a solução definitiva, principalmente pelo modo de operação desses serviços, conforme discutido no capítulo 2.

A grande inquietação que conduziu à realização desses experimentos, vem do aumento exponencial no número de dispositivos e aplicações, bem como o grande volume de informação trafegado na rede, conduzindo em muitos casos à necessidade de troca dos equipamentos para melhorar o desempenho e qualidade na entrega dos dados.

Como as redes industriais são consideradas ambientes críticos, não é possível efetuar qualquer simulação ou alteração com a fábrica em operação. Com a existência de simuladores e emuladores de rede, tal como o GNS3, tornou-se possível a experimentação de diversas tecnologias de rede incluindo SDN. É importante destacar que para todos os cenários propostos não foram utilizados nenhum dos recursos de ET ou QoS que permitem otimizar a entrega do fluxo de dados na rede tradicional MPLS, nem qualquer aplicação para orquestração nas redes SDN, uma vez que o objetivo deste trabalho é estudar a adoção de uma metodologia para a migração da rede tradicional para SDN, como uma forma de promover a coexistência de diferentes paradigmas de rede explorando as possíveis melhorias na qualidade da entrega de tráfego.

Com o uso do simulador GNS3, estima-se custo zero para a aquisição e configuração da infraestrutura para experimentação. Com o GNS3 o custo é determinado pela aquisição de um computador com configurações mínimas de memória de 12GB de RAM e Intel Core i5, monitor, teclado e mouse. Na utilização do GNS3, o aumento do número de *switches* nas simulações não afeta os custos, uma vez que se trata de um simulador de redes. Naturalmente, esse aumento é limitado pela capacidade de processamento e memória da máquina *host*.

Durante a fase experimental do projeto, quando o tráfego melhor esforço estava sendo transmitido na rede MPLS e na rede híbrida, foi possível destacar grande diferença no total de tráfego transferido de banco de dados 325 Mbytes e 26,3 Mbytes respectivamente, bem como a variação do atraso para voip com 2,84ms para 8,34ms para rede híbrida.

No momento da experimentação de tráfego com contingenciamento podemos citar como dados relevantes a diferença do total de tráfego de banco de dados com 252 Mbytes e 0,73 Mbytes para a rede híbrida, bem como o alto número de perda de pacotes chegando a 56% na rede híbrida para os tráfegos *voip* e *streaming* de vídeo.

Em relação à disparidade nos dados entre as redes, em grande parte ocorre devido à falta de orquestração no controlador de rede SDN, que gera uma latência adicional, pois os dispositivos SDN ao receber um determinado fluxo, consultam o controlador de forma a determinar que ação irão tomar. Como nestes cenários não existem nenhuma programação de priorização, a rede híbrida acaba degradando principalmente os tráfegos do tipo UDP que não são orientados à conexão e os pacotes perdidos não são retransmitidos ao destino.

Apesar dos fatores mencionados anteriormente, vale a pena destacar as vantagens que as redes híbridas oferecem, como forma de maximizar a visibilidade e controle de toda a rede, permitir a aplicação de políticas de acesso fundamentadas em grupos ou usuários, de forma a segmentar a rede e controlar o tráfego, diminuindo os perigos para contenção das ameaças na infraestrutura.

Neste sentido, é possível enumerar diversas vantagens para desenvolvimento de redes híbridas, de acordo com o que aponta a literatura:

- Aplicabilidade de política de tráfego em uma vasta variedade de dispositivos, maximizando dessa forma, a simplicidade de gestão da rede;
- Elevado desempenho, possibilitando a conectividade e a vazão do tráfego;
- Robustez e tolerância a falhas, possibilitando que a rede possua uma rápida reação a um possível desgaste no tráfego;
- Roteamento centrado ao usuário, de forma que a entrega do tráfego seja acompanhada das especificidades contextuais do ambiente computacional, a exemplo da localização geográfica do usuário, características de seus dispositivos de apresentação, etc.;
- Escalabilidade, escoltando dessa forma a maximização da demanda de tráfego na rede;
- Acelerada convergência, propiciando uma rede reativa e flexível com elevada responsividade;
- Provisionamento da rede como serviço (NaaS), flexibilizando os recursos da rede através da sua virtualização, e;

- Isolamento do tráfego, possibilitando a melhoria da utilização dos recursos computacionais da rede entre tráfegos heterogêneos.

No entanto, vale destacar a existência de algumas desvantagens no processo de hibridação, como a dificuldade de gestão de um plano de controle heterogêneo, em função da interatividade entre diversos planos de controle, permitindo que a atualização da rede, bem como os processos possam se apresentar inseguros, viabilizando a incidência de desequilíbrios no processo de reconfiguração.

Do mesmo modo, a implementação de redes SDN apresentam também algumas dificuldades, que podem ser resumidas do seguinte modo: difícil adaptação em decorrência das especificidades; ausência de segurança nos controladores; demanda por uma elevada interoperabilidade em uma arquitetura híbrida SDN; ausência de escalabilidade dos controladores SDN (JEFIA et al., 2018; HUANG et al., 2018; SANDHYA et al., 2017).

No processo de experimentação dos cenários, os desafios se apresentaram a partir da escolha do emulador ou simulador ideal para redes. Na maior parte das pesquisas voltadas a simulação de redes SDN, foram encontrados inúmeros exemplos como o MiniNet para simulação de redes, principalmente quando envolve SDN. Porém, o grande desafio foi encontrar uma solução que pudesse se aproximar das configurações de equipamentos reais, ao ponto de ser possível exportar a configuração do laboratório virtual e importá-la nos equipamentos físicos.

Para isso, foram realizados testes com duas soluções o EVE-NG e o GNS3. O EVE-NG atendia os requisitos de possuir equipamentos virtuais idênticos aos físicos, porém não foram encontrados *switches* SDN para configurar a topologia híbrida, além de comprometer a performance da máquina. No GNS3 foram obtidos os melhores resultados de performance e praticidade para encontrar os dispositivos de rede tradicionais e *switches* SDN, necessários para a montagem da topologia.

O simulador GNS3 também possibilita exportação direta da configuração para equipamentos físicos. No entanto, surgiram também outros desafios, como viabilizar a simulação de tecnologias como por exemplo MPLS e suas demais características, tais como tabelas LIB (Base de Informações do Rótulo) e LFIB (Base de Informação de Encaminhamento de Rótulo) existentes do protocolo. Além da simulação MPLS, a complexidade do experimento foi agregada para viabilizar a simulação em conjunto de Redes Definidas por *Software*, onde foi necessária a mudança de paradigma e, de

forma a conseguir alcançar o total de benefícios desta, foi necessário recorrer ao quesito programabilidade, tornando a rede cada vez mais inteligente e dinâmica.

Outro passo importante foi a definição do controlador SDN, ou seja, qual seria utilizado nos experimentos. Foram realizados testes com *OpenDaylight*, HP Van e Ryu. Este último foi escolhido pela sua simplicidade de instalação, requisito de *hardware* e operacionalização.

Por fim, a chave para o sucesso da migração da rede legada MPLS para a rede híbrida MPLS/SDN foi a criação de uma aplicação que viabilizasse a interoperabilidade entre os dispositivos legados e SDN, permitindo que o tráfego MPLS fosse transportado da origem ao destino.

4.6 CONCLUSÃO

Esse tipo de experimentação realizada abre novas possibilidades aos estudantes e profissionais da área de redes de computadores a aproximação entre a teoria e a prática. Esse tipo de ambiente permite novas perspectivas para construção de aprendizagem, bem como simplifica a busca por recursos para realização de laboratórios práticos.

Com a experimentação, foi possível perceber a importância das aplicações como um fator crítico na adoção de redes definidas por *software*, pois são responsáveis pela camada de orquestração, ou seja, a “inteligência” da rede. Através de abordagens para a adoção de redes híbridas, é possível justificar às organizações e ao mercado a utilização do novo paradigma em termos de ganho operacional e monetário.

O principal objetivo nesse capítulo foi, além de apresentar diretrizes para guiar o processo de migração da rede legada MPLS para híbrida MPLS/SDN, também demonstramos os resultados das análises de desempenho entre as redes. Portanto, durante as etapas de migração mantivemos os protocolos de roteamento de camada 3 como OSPF, MPLS fazendo a integração com SDN através do controlador.

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Nesta dissertação, foi apresentada uma abordagem genérica para a migração de redes tradicionais para redes SDN, através do conceito de redes híbridas de forma a proporcionar uma transição gradual entre as tecnologias envolvidas, sem afetar o nível de produtividade da empresa.

As conclusões gerais deste trabalho são apresentadas na seção 5.1, onde encontra-se disposto um resumo da pesquisa, os objetivos propostos e alcançados, determinados aspectos do desenvolvimento, vantagens e desvantagens da solução proposta, a relevância do trabalho realizado e uma análise do aprendizado obtido. Já na seção 5.2 encontram-se as perspectivas futuras vislumbradas.

5.1 CONCLUSÕES

A evolução tecnológica causou um impacto relevante em diferentes setores da sociedade, sobretudo modificando as características de produção que levaram ao surgimento do conceito de Indústria 4.0. Nesse segmento, é interessante observar como novas tecnologias e paradigmas computacionais proporcionaram uma maior integração entre áreas que tinham pouca interação no contexto industrial, como a engenharia mecânica e as tecnologias de informação e comunicação.

Em particular, quando se trata de comunicação baseada em redes para a Indústria 4.0, refere-se à utilização de diferentes tecnologias, redes e protocolos necessários para viabilizar a comunicação entre dois ou mais componentes da Indústria 4.0. Nesse sentido, as aplicações devem ser capazes de negociar as comunicações fim-a-fim e orquestrar os recursos da rede através do uso de interfaces compatíveis ou não com a Indústria 4.0.

A principal motivação que levou à proposta do trabalho realizado nesta dissertação, foi suprir a necessidade latente de garantir a interoperabilidade entre diferentes tecnologias e paradigmas computacionais emergentes na Indústria 4.0. A solução explorada neste trabalho se apoiou sobre os aspectos de migração das redes tradicionais, ou legadas, para o paradigma SDN, em particular descrevendo o processo de implementação de redes híbridas.

Com essa finalidade, foi necessário identificar os requisitos para a realização do processo de migração, observando suas vantagens e desvantagens e principalmente os recursos a serem adotados no processo.

Assim, o conceito de redes híbridas foi explorado através da literatura, de forma a descrever seu funcionamento e suas características, bem como os requisitos necessários para a constituição desse tipo de rede.

Foi realizada também, uma análise geral acerca da necessidade de migração, a qual foi chamada de “hibridização”, de modo que fosse possível avaliar todos os aspectos envolvidos no processo e identificar as vantagens e dificuldades a serem enfrentadas no decorrer da migração. Nesse sentido, foi construído um quadro que apresenta de forma mais didática as principais vantagens e os desafios que se apresentam no processo de migração.

Identificado esses aspectos, tratou-se de estabelecer a metodologia para migração, nesse momento houve uma dificuldade considerável, pois a literatura não apresenta um direcionamento padrão para a migração, apenas a *Open Networking Foundation (ONF)*, estabelece alguns requisitos a serem seguidos para a efetivação do processo. Desse modo, se buscou estabelecer um passo a passo para migração, a fim de orientar não apenas este estudo, mas também servir de parâmetro para trabalhos futuros que busquem atuar nessa perspectiva.

Nesse passo a passo para migração estão definidos os principais elementos a serem seguidos, a começar pela identificação e priorização dos requisitos da rede alvo; observação do tipo de migração a ser realizada; execução do planejamento físico e lógico da migração das funcionalidades da rede tradicional; simulação do funcionamento da rede; preparação da rede para migração; realização do processo completo de migração; promover as atividades de análise e diagnóstico das funcionalidades, conectividade e desempenho.

Nos cenários experimentais que compõem o estudo de caso, os mesmos se encontram estruturados em consonância com a especificidade de cada tecnologia, entretanto garantindo a largura da banda, o número de dispositivos e o protocolo de roteamento, para desse modo assegurar a equivalência de condições. A avaliação da totalidade dos cenários ocorre por meio de carga leve e com contingenciamento.

Os elementos de estratégias, topologias e mecanismos executados nos experimentos se encontram fundamentados em dois cenários frente as particularidades de cada rede: uma rede legada MPLS, e uma rede híbrida, coexistindo as redes MPLS e SDN.

No que diz respeito ao processo de construção do trabalho, vale destacar como o mesmo se encontra organizado, basicamente o mesmo está dividido em duas

partes: a primeira que consiste na pesquisa bibliográfica, onde é apresentado todo um conhecido que foi construído no sentido de fundamentar a parte prática da pesquisa. A construção dessa primeira parte da pesquisa ocorreu a partir de uma vasta pesquisa bibliográfica através de livros, artigos, dissertações, teses e outros documentos acerca do tema em questão. O levantamento dessas fontes ocorreu através de diversas bases de dados eletrônicas. Já a segunda parte da pesquisa, corresponde ao estudo experimental e diz respeito aos cenários de simulação executados, com vista a comprovação do problema de pesquisa apresentado.

Sem dúvida, é possível afirmar que a principal vantagem apresentada na realização deste trabalho, foi a possibilidade de alinhar a teoria com a prática, de forma a poder fundamentar o que a literatura apresenta com viável. Desse modo, foi possível demonstrar a possibilidade da utilização de redes híbridas no processo de migração de uma rede tradicional para a SDN, de forma a não ser necessário a paralização das atividades da empresa.

É possível destacar algumas limitações e dificuldades enfrentadas, especialmente na realização do experimento, que consistiram nos requisitos mínimos de hardware para experimentação (Core i5, 12gb RAM, HD 100GB), também envolveu o aprendizado relacionado a comandos de configurações dos dispositivos SDN, pois são bastantes diferentes dos atuais. E por se tratar de uma rede definida por software que tem como principal função a programabilidade, este quesito impacta e muito na dificuldade da maioria dos administradores de rede, que até antes desta tecnologia possuía esta obrigatoriedade.

A realização deste trabalho deixa algumas contribuições como legado, para novos estudos que venham a ser realizados sobre o tema. A princípio, demonstrar na prática a viabilidade das redes híbridas é fundamental para a motivação de novos estudos nesse sentido. Além disso, o passo a passo desenvolvido para um processo de migração de uma rede tradicional para a SDN consiste em um aporte relevante, haja vista a carência existente na literatura de modelos a serem seguidos em uma migração desse tipo.

5.2 PERSPECTIVAS FUTURAS

Nessa seção são apresentadas algumas das perspectivas futuras identificadas com o objetivo de direcionar a continuidade dessa pesquisa, sendo as principais perspectivas identificadas:

- Implementação de monitoramento inteligente, para o reconhecimento de outros protocolos de roteamento como: BGP, EIGRP, IS-IS;
- Implementação de uma interface gráfica para visualização da topologia da rede;
- Implementação de uma API para orquestração dos fluxos de dados e tabela de roteamento.

REFERÊNCIAS

- ANDRIOLI, Leandro; DA ROSA RIGHI, Rodrigo; AUBIN, Mateus Rauback. Analisando métodos e oportunidades em redes definidas por software (SDN) para otimizações de tráfego de dados. **Revista Brasileira de Computação Aplicada**, v. 9, n. 4, p. 2-14, 2017.
- BAHNASSE, A.; BADRI, A.;TALEA, M.; LOUHAB, F.; KHIAT, A. Towards a New approach for automating the simulation of QoS mechanisms in a smart digital environment. **Procedia computer science**, v. 134, p. 227-234, 2018.
- BARBOSA, Renan R. **Migração de redes tradicionais para SDN**. 2018. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Matemática e Estatística da Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2018.
- CAMERA, P. E. ;ZANETTI, A. B. Introdução à linguagem de programação P4, o futuro das redes. São Paulo: Sociedade Brasileira de Computação, 2019.
- CASADO, M.; FREEDMAN, M.; PETTIT, J.; LUO, J.; MCKEOWN, N.; SHENKER, S. Ethane: taking control of the enterprise **ACM SIGCOMM computer communication review**, v. 37, n. 4, p. 1-12, 2007.
- CHU, C.; XIY K.; LUOZ, M.CHAO, H. Congestion-aware single link failure recovery in hybrid SDN networks. *In*: IEEE CONFERENCE ON COMPUTER COMMUNICATIONS (INFOCOM), 2015. **Proceedings [...]** 2015. p.1086–1094.
- FERNANDEZ, Marcial P. Comparing openflow controller paradigms scalability: Reactive and proactive. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED INFORMATION NETWORKING AND APPLICATIONS, 27., 2013. **Proceedings [...]** 2013.
- GUEDES, Dorgival; VIEIRA, Luiz Filipe Menezes; VIEIRA, Marcos Menezes; RODRIGUES, Henrique; NUNES, Rogério Vinhal. **iniciários do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores-SBRC**, v. 30, n. 4, p. 160-210, 2012.
- HASAN, H.; COSMAS, J.; ZAHARIS, Z.; LAZARIDIS,P.; KHWANDAH, S. Creating and Managing Dynamic MPLS Tunnel by Using SDN Notion. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TELECOMMUNICATIONS AND MULTIMEDIA (TEMU), 2016. **Proceedings [...]** 2016.
- HUANG, X.; CHENG, S.; CAO, K.;CONG, P.;WEI, T.;HU, S. A Survey of Deployment Solutions and Optimization Strategies for Hybrid SDN Networks. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 21, n. 2, p. 1483-1507, 2018.
- JEFIA, A.; POPOOLA, S.; ATAYERO, A. Software-Defined Networking: Current Trends, Challenges, and Future Directions. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND OPERATIONS MANAGEMENT, 2018, Washington DC, USA. 2018. **Proceedings [...]** 2018.

KNAPP, Eric; LANGILL, Joel. **Industrial Network Security: Securing critical infrastructure networks for smart grid, SCADA, and other Industrial Control Systems.** [S.l.]: Syngress, 2014.

KREUTZ, D.; RAMOS, F.; VERISSÍMO, P.; ROTHENBERG, C.; AZODOLMOLKY, S.;UHLIG, S. Software-defined networking: A comprehensive survey. **Proceedings of the IEEE**, v. 103, n. 1, p. 14-76, 2015.

LEVIN, D.; SCHMID M.;SCHAFFERT, F.; FELDMANN, A. Panopticon: Reaping the benefits of incremental SDN deployment in enterprise networks. In: USENIX ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE (USENIX ATC 14), 2014. **Proceedings [...]** 2014.

LIMA, Alessandro Cordeiro de. **Qualidade de serviço dinâmico para diferentes tipos de fluxos em SDN.** Brasília: Universidade de Brasília. Instituto de Ciências Exatas. Departamento de Ciência da Computação Brasília, 2019.

LINS, Theo; SILVA, Mauricio; OLIVEIRA, Jose da; RABELO, Ricardo A. Software-Defined Networking for Industry 4.0. *In: AICT 2016: ADVANCED INTERNATIONAL CONFERENCE ON TELECOMMUNICATIONS*, 12., 2016. **Proceedings [...]** 2014.

MA, Y.; CHEN, Y.; CHEN, J. SDN-Enabled Network Virtualization for Industry 4.0 Based on IoTs and Cloud Computing. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED COMMUNICATION TECHNOLOGY (ICACT)*, 19., 2017. **Proceedings [...]** 2017. p. 199-202.

MORAES, Alexandre Fernandes de. **Redes de computadores fundamentos.** 8 ed. São Paulo: Editora Érica, 2020.

OPEN NETWORKING FOUNDATION. **SDN Migration Considerations and Use Cases.** [S.l.]: ONF Solution Brief November 21, 2014.

PATIL, S.; SUBHEDAR M. S. Optimizing MPLS Tunnel Creation Performance by Using SDN. In: **SOFT** Computing and Signal Processing. Springer, Singapore, 2019. p. 527-536.

PFAFF, Ben et al. The design and implementation of open vswitch. *In: SYMPOSIUM ON NETWORKED SYSTEMS DESIGN AND IMPLEMENTATION*, 12., 2015. **Proceedings [...]** 2015. p. 199-202.

PLATTFORM INDUSTRIE 4.0. **Network-based communication for Industrie 4.0.** 2016. [S.l.]: Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi), 2016.

QAZI, Zafar Ayyub et al. SIMPLE-fying middlebox policy enforcement using SDN. *In: ACM SIGCOMM 2013, CONFERENCE ON SIGCOMM*, 2013. **Proceedings [...]** 2013. p. 27-38

RAWAT, Danda B.; REDDY, Swetha R. Software defined networking architecture, security and energy efficiency: a survey. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 19, n. 1, p. 325-346, 2017.

REALE, R. F. AllocTC-sharing: A new modelo de alocação de largura de banda para redes DS-TE *In: IEEE NETWORK OPERATIONS AND MANAGEMENT SYMPOSIUM, 2011. Proceedings [...]* 2011. p. 1-4.
<https://doi.org/LANOMS.2011.6102265>.

REALE, R. F. Uma avaliação preliminar de comutação dinâmica do modelo de alocação de largura de banda. **International Journal of Computer Networks & Communications**, v. 6, n.3, p. 131-143, 2014.
<https://doi.org/10.1109/LANOMS.2011.6102265>.

RZYM, G. ; WAJDA, K. ; CHOŁDA, P. Analysis of PCE-based path optimization in multi-domain SDN/MPLS/BGP-LS network. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRANSPARENT OPTICAL NETWORKS (ICTON), 18., 2016. Proceedings [...]* 2016. p. 1-5

ROTHENBERG, Christian Esteve. Hybrid Networking Towards a Software Defined. *In: NETWORK Innovation through OpenFlow and SDN: Principles and Design. [S.l.]: CRC Press, 2014. p. 153-198. Disponível em:*
<https://www.dca.fee.unicamp.br/~chesteve/pubs/Hybrid-SDN-Book-Chapter-2013.pdf>
Acessado em: 01 maio 2021.

SADON, Sajaa Kh et al. Dynamic hierarchical bandwidth allocation using Russian Doll Model in EPON. **Computers & Electrical Engineering**, v. 38, n. 6, p. 1480-1489, 2012.

SANDHYA, Swamy, M. A survey: hybrid SDN. **Journal of Network and Computer Applications**, v. 100, p. 35-55, 2017.

SEZER, Sakir et al. Are we ready for SDN? Implementation challenges for software-defined networks. **IEEE Communications Magazine**, v. 51, n. 7, p. 36-43, 2013.

SILVA, Erik de Britto; MOURA, Henrique Daniel; MACEDO, Fernandes; VIEIRA, Luiz F. M. VIEIRA; Marcos A. M. Comparação de políticas de divisão de tráfego em Data Center empregando SDN. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES E SISTEMAS DISTRIBUÍDOS. SBC, 2020, Anais [...]* 2020.

SILVA, M.; OLIVEIRA, R. Software-Defined Networking for Industry 4.0. *In: AICT 2016: ADVANCED INTERNATIONAL CONFERENCE ON TELECOMMUNICATIONS, 12., 2016. Proceedings [...]* 2016.

SINHA, Yash; BHATIA, Siddharth; SHEKHAWAT, Virendra S. MPLS based hybridization in SDN. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOFTWARE DEFINED SYSTEMS (SDS), 4., 2017. Proceedings [...]* 2017.

STANCU, Alexandru L. ; HALUNGA, Simona; VULPE, Alexandru.; SUCIU, George. FRATU, Octavian; POPOVICI, Eduard. C. A comparison between several software defined network controller. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TELECOMMUNICATION IN MODERN SATELLITE, CABLE AND BROADCASTING SERVICES (TELSIKS), 12., 2015. Proceedings [...]* 2015.p.14-17. 2015.

- SUBHEDAR, Mansi S. ; PATIL, Snehal. Optimizing MPLS Tunnel Creation Performance by Using SDN. In: **SOFT** Computing and Signal Processing. Singapore: Springer, 2019. p. 527-536.
- TAJIKI, Mohammad; M. AKBARI, Behzad; MOKARI, Nader; CHIARAVIGLIO, Luca. SDN-Based Resource Allocation in MPLS Networks: a hybrid approach. **Concurrency and Computation: Practice and Experience**, v. 31, n. 8, p. e4728, 2018.
- TILMANS, O. ; VISSICCHIO, Stefano; VANBEVER, Laurent; REXFORD, Jennifer. Fibbing in action: Ondemand load-balancing for better video delivery. In: ACM SIGCOMM, 2016, CONFERENCE ACM. 2016. **Proceedings [...]** 2016. p. 619-620.
- TOURRILHES, Jean; SHARMA, Puneet; BANERJEE, Sujata; PETTITI, Justin. Sdn and openflow evolution: a standards perspective. **Computer**, v. 47, n. 11, p. 22-29, 2014.
- TRIVISONNO, Riccardo et al. Network resource management and QoS in SDN-enabled 5G systems. In: IEEE GLOBAL COMMUNICATIONS CONFERENCE (GLOBECOM). IEEE, 2015. **Proceedings [...]** 2015. p. 1-7.
- VANBEVER, L. ; VISSICCHIO, S. Enabling SDN in old school networks with software controlled routing protocols. In: OPEN Networking Summit 2014(ONS). [S.l. : s.n.], 2014.
- VIEIRA, Felipe Fernando da Silva; NASCIMENTO, Manoel Henrique Reis; FIGUEIREDO, Caio César Lacerda; NASCIMENTO, Aline Santos do. Unveiling the industry 4.0 concept and the use of its technologies. **Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications**, v. 5, n. 19, p. 21-28, 2019.
- VISSICCHIO, S. ; CITTADINI, Luca; VANBEVER, Laurent. XIE, Geoffrey G. Safe routing reconfigurations with route redistribution. In: IEEE INFOCOM 2014-IEEE Conference on Computer Communications. IEEE, 2014. **Proceedings [...]** 2014. p. 199-207.
- VISSICCHIO, Stefano; VANBEVER, Laurent; CITTADINI, Luca; XIE, Geoffrey G.; BONAVENTURE, Olivier. **Safe Updates of Hybrid SDN Networks**. 2017. Disponível em: https://vanbever.eu/pdfs/vanbever_hybrid_sdn_updates_ton_2017.pdf. Acesso em: 28 abr. 2021.
- VISSICCHIO, Stefano; VANBEVER, Laurent; BONAVENTURE, Olivier. Opportunities and Research Challenges of Hybrid Software Defined Networks. **ACM SIGCOMM Computer Communication Review**, v. 44, n. 2, p. 70-75, 2014.
- VMWARE. **Redes definidas por software**. 2021. Disponível em: <https://www.vmware.com/br/topics/glossary/content/software-defined-networking.html>. Acesso em: 01 maio 2021.

YASINI, Seyed Mohammad Javad. **Implementation of segment routing and Mpls traffic engineering in software defined network based on gns network Emulator and opendaylight sdn controller.** Milano: Dipartimento di Elettronica, Informazione e Bioingegneria Master of Science Telecommunications Engineering, 2018.