REGINA MELO SILVEIRA

Rede Elástica de Distribuição de Vídeo Baseado em Virtualização de Serviços

São Paulo

2016

FT-3664

REGINA MELO SILVEIRA

Rede Elástica de Distribuição de Vídeo Baseada em Virtualização de Serviços

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para concurso de Livre Docência junto ao Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais

São Paulo

2016

À minha família, com muito amor.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não teria sido realizado sem o apoio de muitas pessoas que colaboram comigo de diferentes formas. Portanto, gostaria de agradecer explicitamente algumas delas, mas com certeza não estarão todos aqui.

Agradeço aos colegas do Larc, e em especial a Wilson pelo apoio e incentivo durante todos estes anos. As companheiras de inúmeras atividades acadêmicas Cíntia e Itana pelo companheirismo e amizade. Aos parceiros de atividades de pesquisa e ensino Marcos e Graça pela colaboração.

Agradeço aos colegas de departamento, em especial ao Saraiva e a Anna Helena pelo apoio e profissionalismo.

Agradeço a minha equipe de pesquisa e alunos Samuel, Michel, Lucas, Joana e Ricardo, cujo atuação foi imprescindível para os testes em ambiente experimental.

Aos meus parceiros de projeto e de grandes desafios Reinaldo, Samuel e Bruno, agradeço pelo estimulo e garra para inovar e empreender.

Ao Professor Antonio Carlos Hernandes pela oportunidade de atuar como assessora na Pró-reitoria de Graduação, dando-me nova visão da vida acadêmica e estimulante oportunidade de contribuir com o avanço da universidade.

Agradeço aos meus amigos Alex e Iza, pela ajuda incondicional em vários momentos.

Finalmente agradeço a minha família, meus anjos queridos, que estão sempre prontos a me apoiar e ajudar em qualquer situação e sem os quais nada disso faria sentido. Muito obrigada !

"Só existem dois dias no ano que nada pode ser feito.
Um se chama ontem e o outro se chama amanhã,
portanto hoje é o dia certo para amar, acreditar,
fazer e principalmente viver."
Dalai Lama

RESUMO

Os serviços baseados na Web têm demonstrado rápida variação em termos de número de usuários e acessos, dependendo do dia, do horário, ou ainda da oferta de conteúdo. Serviços de distribuição de conteúdo, especialmente os de distribuição de vídeo, estão sujeitos a essas variações, gerando um aumento na complexidade em termos de gerenciamento, operação e manutenção. Frente a este contexto, fica evidente a grande vantagem da utilização de sistemas que possibilitem o dimensionamento dinâmico de recursos para dar suporte ao atendimento de demandas tão variáveis. Portanto este trabalho propõe explorar a tecnologia NFV (Network Functions Virtualization) como meio de prover elasticidade ao serviço de distribuição de vídeo, utilizando técnicas de monitoramento em tempo real dos recursos utilizados para fornecer parâmetros ao provisionamento automático de novos recursos a fim de atender a dinamicidade do serviço. Além disso, é proposto um algoritmo de alocação e desalocação dinâmica de recursos para a criação de um serviço de distribuição elástico. Este algoritmo utiliza como parâmetro para o gatilho da alocação de recursos a taxa de consumo, definindo assim um limiar deslizante.

A proposta de integração do sistema de distribuição de vídeo (VDN) com as tecnologias de virtualização de rede e de funções ou serviços de rede, SDN e NFV, foram testados em um ambiente experimental mostrando sua viabilidade. O algoritmo proposto foi testado em ambiente de simulação a partir de dados de consumo de um sistema real de distribuição de vídeo e demonstrou ser eficiente para a alocação e desalocação de recursos.

Palavras chave: serviços de rede, distribuição de vídeo, virtualização, algoritmo de alocação de recursos.

ABSTRACT

Web-based services have shown rapid change in terms of number of users and access, depending on the day, time, or the provision of content. Content distribution services, especially video distribution, are subject to these variations, increasing complexity in terms of management, operation and maintenance. Given this context, it is evident the great advantage of using systems that enable dynamic scaling capabilities to support service demands so variable. This work explores the NFV technology (Network Functions Virtualization) as a means to provide elasticity to the video distribution service, by using real-time resources monitoring techniques to obtain parameters to automatic provision new resources to meet the service dynamics.

Furthermore, it proposes an algorithm for dynamic resource allocation and deallocation enabling the creation of an elastic distribution service. This algorithm uses a parameter to trigger the allocation of resources consumption rate, thus defining a sliding threshold.

Keywords: network services, video distribution, virtualization, resource allocation algorithm.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Visão geral da arquitetura de uma CDN..... 28
Figura 2: Visão de alto nível da arquitetura para NFV 39
Figura 3: Exemplo de NFV usando FG 40
Figura 4: Arquitetura proposta pela ETSI para o módulo MANO da NFV..... 42
Figura 5: Infraestrutura básica de uma VDN 50
Figura 6: Infraestrutura de VDN com módulo Supervisor 52
Figura 7: Representação do gatilho deslizante de acordo com taxa de requisição 54
Figura 8: Algoritmo de alocação e desalocação de recursos para uma VDN 55
Figura 9: Ambiente de distribuição de vídeo da USP 58
Figura 10: Ambiente de publicação de vídeo do IPTV-USP 59
Figura 11: Ambiente de consumo de vídeo do IPTV-USP 60
Figura 12: Sistema de visualização dos dados monitorados 61
Figura 13: Ambiente de proposto para a integração da infraestrutura da VDN com NFV baseado em OpenStack 64
Figura 14: Topologia de teste da rede virtualizada 66
Figura 15: Comutadores conectados ao controlador SDN 66
Figura 16: Informações do comutador antes da transmissão 67
Figura 17: Informações do comutador após da transmissão 68
Figura 18: Tempo de uma transmissão HTTP com a criação do circuito virtual sob demanda ou circuito virtual predefinido 69
Figura 19: Dados de monitoração do sistema IPTV-USP, mostrando curvas de consumo de CPU, interface de rede, memória e disco 71
Figura 20: Gráficos do recurso consumido e recurso alocado para CPU e interface de rede 72
Figura 21: Gráfico do recurso consumido e recurso alocado para interface de rede 73
Figura 22: Perfil de consumo de recursos em uma transmissão ao vivo 74
Figura 23: Simulação da alocação de CPU durante transmissão ao vivo 75
Figura 24: Simulação da alocação de interface de rede durante transmissão ao vivo..... 76

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
4k	Resolução de vídeo de alta definição (3840×2160)
8k	Resolução de vídeo de alta definição (7680 × 4320)
AS	Autonomous System
ATIS	Alliance for Telecommunications Industry Solutions
ATM	Asynchronous Transfer Mode
ATM Forum	Asynchronous Transfer Mode Fórum
BB Forum	Broadband Fórum
CBR	Constante Bit Rate
CDN	Content Delivery Network
CSP	Communication Service Provider
DiffServ	Differenciated Service
DNS	Domain Name System
DVMRP	Distance Vector Multicast Routing Protocol
FR	Frame Relay
FTP	File Transfer Protocol
GMPLS	Generalized Multi Path Label Switch
GSLB	Global Servver Load Balancing
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
IaaS	Infrastructure as a Service
IETF	Internet Engineering Task Force
IntServ	Integrated Service
IP	Internet Protocol
IPTV	Internet Protocol TV
IRTF	Internet Research Task Force
ISDN	Integrated Service Digital Network
ISP	Internet Service Provider
ITU-T	*International Telecommunication Union*
MANO	Management and Orquestration
MBS	Maximum Burst Size
MOSPF	Multicast Open Shortest Path First
MPLS	Multi Path Label Switch
NFV	Network Functions Virtualization
NFV ISG	Network Functions Virtualization Industry Specification Group
NFVI	Network Functions Virtualization Infrastructure
NFVO	Network Functions Virtualization Orchestrator
OCP	Overlay Communication Protocol
OTT	Over-the-top
P2P	Peer-to-peer
PCR	Peak Cell Rate
PIM	Protocol Independent Multicast
PoP	Point of Presence
PPGEE	Programa de Pós-graduação da Engenharia Elétrica
PTT	Ponto de troca de tráfego
QoE	Quality of Experience

QoS	Quality of Service
QoT	Quality of Transmission
RSVP	Resource Reservation Protocol
RTCP	Real Time Control Protocol
RTP	Real Time Protocol
RTSP	Real Time Streaming Protocol
SCR	Sustained Cell Rate
SDN	Software Defined Networking
SLA	*Service-Level Agreement*
TCP	Transmission Control Protocol
UDP	User Datagram Protocol
UHD	Ultra High Definition
UNI	User-Network interface
URL	Uniform Resource Locator
VBR	Variable Bit Rate
VDN	Vídeo Delivery Network
VIM	Virtualized Infrastructure Manager
VNFM	Virtual Network function Manager
VoD	Vídeo on Demand

SUMÁRIO

Capítulo 1 - Introdução 13
1.1. Motivação 16
1.2. Objetivos 19
1.3. Organização 20
Capítulo 2 - Serviços de Distribuição de Vídeo: Evolução e Estado da Arte 21
2.1 Visão Geral 21
2.2 Garantia de entrega 22
2.3 Redes de Distribuição de Conteúdo 25
2.3.1 Detalhamento da Arquitetura 27
2.4 Distribuição de Conteúdos Utilizando Outras Tecnologias de Rede 33
2.5 Considerações do Capítulo 34
Capítulo 3 - Virtualização de Funções de Rede (NFV) 36
3.1 NFV 36
3.2 Integração de NFV e SDN 43
3.3 Utilização de NFV e SDN em serviço de entrega com CDN 44
3.4 Padronização 46
3.5 Trabalhos Relacionados 47
Capítulo 4 - Proposta de Algoritmo de Alocação Dinâmica de Recursos 49
4.1 Cenário Considerado 49
4.2 Formalização do Algoritmo 51
4.3 Considerações do Capítulo 55
Capítulo 5 - Estudo de Caso 57
5.1 Ambiente de Distribuição de Vídeo da USP 57
5.2 Ambiente virtual para testes de SDN 62
5.3 Ambiente para teste CDN/SDN/NFV 63
5.4 Considerações do Capítulo 63
Capítulo 6 - Análise de Resultados 65
6.1 Testes da Integração da VDN e SDN 65
6.2 Integração do ambiente VDN-SDN com NFV 70
6.3 Teste de Validação do Algoritmo de Alocação e Desalocação 71
6.4 Considerações do Capítulo 77
Capítulo 7 - Conclusões e Considerações Finais 78
Referências 81
ANEXO A: Ambiente Físico de Experimentação 89
ANEXO B: Código utilizado na simulação com R 91

Capítulo 1

Introdução

Desde sua implementação inicial, a partir do projeto ARPANet (HAUBEN, 2010), o uso da Internet vem mudando significativamente. A rede de comutação de pacotes, que desde o final da década de 70 utiliza a suíte de protocolos TCP/IP (KUROSE; ROSS, 2012), foi elaborada para a transmissão de dados de forma descentralizada e permitindo diferentes rotas para a conexão de dois nós finais (ou *hosts*). Basicamente a Internet passou de uma ferramenta de utilização específica pela comunidade científica, posteriormente para instrumento de divulgação institucional e comercial pelas organizações empresariais, em seguida passou a ser aplicação de uso intenso por uma sociedade "tagarela", ávida por comunicação, utilizando comunidades sociais interativas e finalmente como um amplo repositório para intenso consumo de conteúdo, com grande potencial para a substituição da TV em um futuro bem próximo.

Copiando a citação de Frank (FRANK, 2013) ao parafrasear Bronfman, conhecido produtor musical americano:

> *"What would the Internet be without 'content'? It would be a valueless collection of silent machines with gray screens. It would be the electronic equivalent of a marine desert—lovely elements, nice colors, no life. It would be nothing."*

Neste contexto novos serviços passaram a ser oferecidos aos usuários através da Web, combinando acesso ubíquo e mobilidade, gerando mudança no perfil das demandas de serviço de rede. A tendência de consumo de informação utilizando diferentes dispositivos e aplicações, como *downloads*, jogos, áudio *streaming*, vídeo ao vivo e sob demanda, passaram a gerar

grande volume de tráfego. Os requisitos para atendimento a estas aplicações diferem bastante, especialmente para as mídias contínuas. O termo mídia contínua refere-se ao fato de que seus dados devem ser reproduzidos dentro de um intervalo de tempo bem definido (FLUCKIGER, 1995). Por conseguinte, tais aplicações caracterizam-se por apresentar uma sensibilidade ao atraso e à variação deste atraso, onde falhas no cumprimento destes requisitos de tempo degradam substancialmente a qualidade da mídia percebida, mesmo que todos os seus dados tenham sido corretamente entregues. Dessa forma, as aplicações de mídia contínua exigem alguma melhoria sobre o serviço de entrega de melhor esforço (KUROSE, 1993). Portanto, exatamente a abordagem minimalista das redes IP responsável pelo sucesso da Internet tornou-se também um obstáculo para o desenvolvimento de novas aplicações (UCHOA; SILVEIRA, 2009).

Há cerca de quinze anos observou-se que a rede apresentava limitações com relação a pontos de congestionamento, ineficiência dos protocolos de roteamento e transporte, problemas com redes inacessíveis por falhas ou quedas de enlaces, descentralização elevada do gerenciamento dos recursos e heterogeneidade dos softwares utilizados no cliente final (REXFORD; DOVROLIS, 2010). Tais limitações são inerentes ao funcionamento da Internet e estão fora de controle de uma única instituição.

Por outro lado, a distribuição de vídeo através da Internet tem se tornado cada vez mais frequente. Segundo relatório anual da CISCO (2015), até o final de 2018 79% do tráfego da Internet será constituído por fluxos de vídeo, e se considerado o compartilhamento de vídeo através de redes P2P (*peer-to-peer*), representará 90% do tráfego total. A popularidade crescente de serviços como o Netflix[1] e o Youtube[2] dão subsídios a estas estimativas. Além disso, deve ser previsto um aumento continuo das aplicações interativas, multilíngues e dos grandes volumes gerados por aplicações de vídeo 2D e 3D de altas resoluções, já que é clara a tendência de escalada em termos da resolução de vídeo, visto que estão planejadas transmissões 4k nos eventos esportivos deste ano e do uso de TV UHD (*Ultra High Definition*) 8k (4320p) em 2020 (NAMIKI *et al.*, 2011). Em termos de comportamento do usuário deve-se considerar a

[1] www.netflix.com
[2] www.youtube.com

tendência a alta mobilidade e alta interação, com aplicações que permitam a edição e inclusão de registro e anotações em quadros do vídeo (WANG *et al*, 2005) e ainda vídeo com realidade aumentada (VAN KREVELEN; POELMAN, 2010). Além disso, observa-se crescente preocupação em monitorar o comportamento do usuário para assim oferecer conteúdos cada vez mais aderentes as suas expectativas (SHAFIQ *et al.*, 2014)(CHIGAMI *et al.*, 2014).

Portanto, observa-se uma lacuna tecnológica entre o limite da capacidade da Internet e o desempenho necessário para as atuais e futuras aplicações distribuídas, de forma que esta continue crescendo e alavancando cada vez mais negócios. Por esta razão, estratégias e artifícios que permitissem otimizar a entrega de dados, áudio e vídeo começaram a ser elaborados, garantindo a adaptação da Internet às necessidades atuais e futuras (NYGREN; SITARAMAN; SUN, 2010). A comunidade científica da área é unânime em afirmar que estamos vivenciando um momento de mudança de paradigmas da Internet, visto que atuais tendências no uso da Web exigem uma evolução no funcionamento da rede.

Os padrões de tráfego induzido pelas aplicações emergentes são altamente dinâmicos, e gerenciar o atendimento a estes serviços requer gerenciamento de banda e gerenciamento de recursos de forma flexíveis. O surgimento da computação em nuvem, onde usuários solicitam acesso sob demanda a *software*, armazenamento e infraestrutura tem aumentado a necessidade de provisionamento de banda e recursos, tanto físicos como virtuais, sob demanda (LEAVITT., 2010).

As redes de distribuição de conteúdos (CDN - *Content Delivery Network*) (FRANK, 2013) surgiram neste contexto e tendem a modificar o modelo de negócios usado na Internet até então. As primeiras CDNs surgiram há cerca de doze anos e já se observa uma evolução em relação ao seu uso. Segundo Pathan (2010), a primeira geração tinha como objetivo fazer a entrega eficiente de conteúdos Web estáticos e dinâmicos, a segunda geração objetivava melhorar o desempenho da rede para serviços de vídeo sob demanda e ao vivo; enquanto a terceira geração tem como principal foco a interação das comunidades sociais e o acesso de aplicações via dispositivos móveis.

A estrutura básica de uma CDN envolve três principais atores: o provedor de conteúdo, o provedor de CDN e o usuário final. De uma forma

geral o provedor de conteúdo é o cliente do provedor de CDN, que faz a entrega para o usuário final, ou usuário Web, que por sua vez é cliente do provedor de conteúdo. O provedor de conteúdo delega a entrega destes, identificados e endereçados a partir de uma URL, para que o provedor de CDN atenda as requisições dos usuários. Para tanto, o provedor de conteúdo ou aplicação deve manter um sistema origem que inclui servidor web, servidor de aplicação, base de dados com todos os objetos digitais a serem distribuídos. No caso de distribuição de vídeo, o provedor de conteúdo deve prover instalações para a captura e codificação dos fluxos de vídeo ao vivo e equipamentos para armazenamento de vídeo sob demanda. É função dos servidores da CDN coletar os conteúdos dos servidores de origem de seus clientes e disparar o processo de replicação deste em sua estrutura de forma a otimizar sua entrega aos clientes finais, ou consumidores Web. De acordo com o propósito específico da CDN surgem algumas variações de nomenclatura, como a rede de distribuição de vídeo (VDN – *Video Delivery Network*) (GHAREEB; CESAR; KSENTINI, 2009), cuja infraestrutura e funcionamento é basicamente o mesmo.

Além das tendências relacionadas às CDNs, computação em nuvem, redes de *datacenter* e aplicações conhecidas como "*big data*" apresentam requisitos bastante dinâmicos. Contudo, a rede atual não oferece tal flexibilidade para se adaptar a essas novas tendências. Neste cenário, a virtualização dos serviços de rede (NFV – *Network Functions Virtualization*) (MIJUMBI *et al.*, 2015), associado a rede definida por software (SDN – *Software Defined Networking*) (NUNES *et al.*, 2014)(KREUTZ *et al.*, 2015), demonstra ser uma solução atrativa em termos de agilidade e flexibilidade para atender a estes novos requisitos.

1.1. Motivação

Uma VDN é uma rede para entrega de vídeo, que é definida a partir da operação colaborativa de um conjunto de elementos de rede espalhados pela Internet, onde conteúdos são replicados por vários servidores Web espelhos de forma a melhorar a eficiência de entrega destes aos usuários finais.

Estas redes surgiram a fim de superar as limitações da Internet em prover conexão com qualidade de serviço (QoS – *Quality of Service*) e consequentemente, aos olhos do usuário, prover qualidade de experiência (QoE – *Quality of Experience*) compatível com as expectativas deste quando acessa um vídeo na Web (NAM at al., 2014) (HAßLINGER; HARTLEB, 2011). A VDN pode ser vista como uma rede virtual sobreposta (ou rede *overlay*) criada através de uma camada de *software* sobre a rede física existente (KOPP *et al.*, 2010, 2011)(UCHOA *et al.*, 2007a, 2007b, 2008, 2009).

Uma VDN é uma infraestrutura complexa em termos de gerenciamento e operação, principalmente devido às características dinâmicas das requisições realizadas pelos usuários. A alocação de novos recursos é uma tarefa manual e demorada, que muitas vezes utiliza equipamentos dedicados. Por este motivo, em uma infraestrutura deste tipo normalmente opta-se pela alocação excedente de recursos, o que aumenta o custo e diminui a eficiência do capital investido, tornando o negócio pouco competitivo.

A proposta de virtualização de recursos, seja de rede ou de serviços de rede, baseia-se em cinco principais razões (JAIN; PAUL, 2013):

- Compartilhamento: considera o princípio de que se um recurso é maior do que o necessário para atender um único usuário ou processo, é melhor dividi-lo para que atenda vários deles.
- Isolamento: apesar do compartilhamento, o uso do recurso virtualizado deve manter o isolamento, ou seja, privacidade e confidencialidade das informações, de cada usuário ou processo.
- Agregação: a partir da virtualização é possível considerar o princípio de que se um recurso é insuficiente para atender um usuário ou processo deve ser possível agregá-lo a outros de forma que estes funcionem com um recurso de maior capacidade.
- Dinamicidade: para atender demandas com rápida variação da taxa de requisições de recurso é necessário a configuração, ou reconfiguração, rápida dos recursos. É mais fácil configurar recursos virtuais do que recursos físicos.

- Melhoria no gerenciamento: dispositivos virtuais são mais facilmente gerenciáveis já que são baseados em *software* com interfaces padronizadas.

Consequentemente estas são as razões que motivam o investimento em mecanismo de virtualização. A ideia das SDNs surgiu com o propósito de virtualizar a camada de rede, permitindo flexibilizar o mecanismo de encaminhamento de pacotes a partir da segmentação entre o plano de controle e o plano de dados. Este novo paradigma promove a simplificação do gerenciamento e operação da rede, assim como propicia inovações e evoluções (NUNES *et al.*, 2014). Da mesma forma a tecnologia NFV tem como objetivo a virtualização das funções ou serviços de rede, desacoplando a camada de hardware da camada de software, que implementa e gerencia tais funções (MIJUMBI *et al.*, 2015). Apesar de não ser mandatório o uso de NFV com SDN, estas duas tecnologias são bastante complementares. Clougherty (2014) chega a mencionar que NFV é a "*killer application*" para a SDN.

O primeiro serviço de rede que rapidamente absorveu a tecnologia NFV foi a computação em nuvem, principalmente devido ao fato que seu modelo de negócios ser baseado na oferta de recursos computacionais sob demanda, a medida da necessidade dos usuários (JAIN; PAUL, 2013). No entanto, o *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI), organização que tem encabeçado os esforços de padronização da tecnologia NFV, tem demonstrado que sua utilização trará benefícios para diversos outros serviços de rede, como por exemplo para a distribuição de conteúdo, apesar de ressaltar também os inúmeros desafios ainda existentes para isso. Dentre os desafios, possibilitar a alocação dinâmica dos recursos de forma eficiente e orquestrada, a fim de obter economia de escala, é sem dúvida um deles (ETSI, 2012). Segundo Mijumbi (2015b), apesar da utilização de NFV para computação em nuvem já ser uma realidade, a ação de disparo da alocação de recursos ainda é realizado manualmente. Sendo assim, os algoritmos de alocação de recursos devem definir quando recursos físicos ou virtuais adicionais devem ser colocados em operação e disparar o processo de disponibilização dos mesmos.

A principal motivação para esta proposta é que, no cenário atual, as demandas de distribuição de vídeo podem apresentar comportamento

imprevisível, visto que muitos vídeos tornam-se "*memes*", termo utilizado na Internet para o fenômeno de viralização de um conteúdo, cujo interesse se espalhe entre vários usuários rapidamente, alcançando grande popularidade. Sendo assim o principal problema tratado neste trabalho é o processo de alocação e desalocação de recursos adicionais em uma infraestrutura para um serviço de VDN.

Esta solução pode trazer grande benefício às empresas de provisão de serviço de acesso à Internet (ISPs – *Internet Services Provider*) com interesse em distribuir conteúdos através de CDNs ou VDNs, empresas que operam CDNs específicas para distribuição de vídeo, como é o caso do YouTube[3] e da NetFlix[4], ou redes acadêmicas de distribuição de vídeo, como a da RNP (Rede Nacional de Ensino e Pesquisa), no serviço video@RNP[5], ou da Universidade de São Paulo, nos serviços IPTV[6] e e-Aulas[7], possibilitando melhor uso de seus recursos.

1.2. Objetivos

O objetivo deste trabalho é propor um algoritmo de alocação e desalocação dinâmica de recursos baseado em virtualização de serviços de rede de forma a permitir a operação eficiente de uma rede de distribuição de vídeo (VDN). O uso deste algoritmo e da tecnologia NFV permitirá a implantação de uma VDN Elástica, que se adéque as demandas das requisições dinâmicas do serviço de distribuição, evitando a alocação indevida de recursos.

O algoritmo deve atuar de forma integrada ao módulo de gerenciamento e orquestração (MANO) da NFV e os serviços de gerenciamento de uma VDN, de modo que através de monitoramento, seja possível definir o momento em que devem ser disparadas ações de alocação e desalocação de recursos para o serviço de distribuição de vídeo. O diferencial do algoritmo está no fato de não utilizar um limiar fixo, mas sim deslizante, de acordo com a demanda

[3] www.youtube.com
[4] www.netflix.com
[5] www.video.rnp.br
[6] www.iptv.usp.br
[7] www.eaulas.usp.br

momentânea. Desta forma, a partir da verificação de demanda excedente, poderá ser feita a alocação de novos recursos para a rede dinamicamente, tornando-a mais eficiente tanto em termo de operação e manutenção como custo.

1.3. Organização

Esta tese está organizada conforme segue. O capítulo 2 apresenta uma breve revisão da evolução do estado da arte em distribuição de vídeo incluindo resultados de pesquisa anteriores relacionados a este tema, desenvolvidos em conjunto com orientados de mestrado e doutorado no PPGEE. O capítulo 3 trata da tecnologia NFV e sua integração com SDN e com a arquitetura de uma CDN, dando suporte teórico a este trabalho. O capítulo 4 introduz o algoritmo de alocação e desalocação de recursos para uma VDN baseada em NFV. Em seguida, os capítulos 5 e 6 descrevem um estudo de caso para a aplicação do algoritmo proposto e a análise dos resultados, respectivamente. Finalmente, no capítulo 7 são feitas as considerações finais desta tese.

Capítulo 2

Serviços de Distribuição de Vídeo: Evolução e Estado da Arte

Este capítulo apresenta uma breve revisão da evolução e estado da arte em distribuição de vídeo, primeiro apresentando uma visão geral da área, depois destacando tecnologias, arquitetura, mecanismos, protocolos e os principais órgãos de padronização relacionados.

2.1 Visão Geral

A evolução das tecnologias de rede e as aplicações oferecidas aos usuários da Internet estão diretamente relacionadas, portanto é possível fazer um paralelo entre elas (FLUCKIGER, 1995). Desde o desenvolvimento da tecnologia digital, especialmente com o surgimento da ideia da rede digital de serviços integrados (ISDN – *Integrated Services Digital Network*) começaram a surgir os serviços de transmissão de vídeo. No entanto, as tecnologias propostas, como o Frame Relay e o ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) (STALLINGS, 1992), não se integravam adequadamente as aplicações IP, exigindo grande adaptação, e consequentemente, perda de desempenho. Além disso, o alto custo dos equipamentos ATM e o advento da tecnologia Gigabit Ethernet, fez com que esta tecnologia tivesse um espaço bastante limitado no mercado.

Mas, apesar do insucesso comercial da tecnologia ATM na rede pública de dados, alguns dos conceitos propostos em sua especificação foram inspiradores para o surgimento de outras tecnologias de rede como o MPLS (*Multi Protocol Label Switch*) (BLACK, 2002a) e o GMPLS (*Generalized Multi*

Protocol Label Switch) (BLACK, 2002b), que incorporaram conceitos de qualidade de serviço (QoS) para o atendimento à entrega de serviços específicos, como os interativos e de tempo contínuo (fluxos de áudio e vídeo).

Como tecnologias para sistemas autônomos (AS – *Autonomous System*), elas influenciam fortemente o mercado de telecomunicação para o oferecimento de serviços em geral, incluindo o de entrega de fluxos de vídeo. No entanto, o grande desafio destas empresas, como provedoras de serviço de rede (ISPs) é a otimização da entrega de conteúdo aos seus usuários. O mercado atual altamente competitivo estimula a busca por soluções que apresentem um retorno de investimento alto e que apresente flexibilidade e facilidade nos processos de evolução, manutenção e operação dos sistemas (YUE, 2013).

2.2 Garantia de entrega

A ideia de garantia de entrega surgiu na década de 90 com a tecnologia ATM (ORZESSEK AND SOMMER, 1998)(STALLINGS, 1998) padronizada pelo ITU-T (*International Telecommunication Union*) com a colaboração do ATM Forum. Graças a sua arquitetura, a utilização de circuitos virtuais e a comutação de pequenos pacotes de dados, denominados células, a rede ATM é capaz de transmitir diferentes tipos de tráfego, como voz, vídeo e dados, simultaneamente. No entanto, a maneira como a rede lida com cada um desses tráfegos depende das características do fluxo de dados e dos requisitos da aplicação. Desta forma é definido um conjunto de parâmetros de qualidade de serviço (QoS), assim como um conjunto de parâmetros de perfil de tráfego para cada aplicação, que são usados para a definição dos recursos alocados no circuito virtual. Os parâmetros de QoS são caracterizados pela taxa de transmissão, taxa de atraso e variação de atraso, taxa de erro e de perda de bits. Os perfis de tráfego considerados são: tráfego constante (*CBR – Constante Bit Rate*), tráfego variável (VBR – *Variable Bit Rate*), taxa de células de pico (PCR – *Peak Cell Rate*), taxa de célula sustentada (SCR - *Sustained Cell Rate*) e tamanho máximo da rajada (MBS – *Maximum Burst Size*). A

classificação dos possíveis tipos de tráfegos na rede, ou seja, das categorias de serviço, é feita pela "Interface Usuário-Rede" (UNI).

Apesar do bom desempenho apresentado pela tecnologia, a proposta do serviço de vídeo sob demanda (VoD – *Video on Demand*) (ATM Forum, 1995), estimulou pesquisas sobre estratégias de recodificação do fluxo e vídeo em caso de restrição de recursos (SILVEIRA; RUGGIERO, 2000, 2001, 2001a) e otimização do processo de controle de admissão (CHENG; CHANG, 1997) (ELEFTHENADIS; ANASTASSIOU, 1995).

No entanto, a falta de adequação das aplicações elaboradas especificamente para rede IP à tecnologia ATM, mesmo contando com o uso de mecanismos de integração das duas tecnologias de rede, como o *Classical IP* e *Lan Emulation* (NEWMAN; LYON; MINSHALL, 1996), mostraram significativa perda de desempenho, justificando novos investimentos na elaboração, especificação e implementação de mecanismos que garantissem QoS na rede IP.

Inspirados na tecnologia ATM, surgiram diversos mecanismos para redes de comutação de pacotes baseadas no protocolo IP, tendo como objetivo garantir a entrega de outros tipos de informações, como fluxos de vídeo e voz, atendendo aos requisitos de cada tipo de tráfego e permitindo o atendimento a serviços de entrega diversos. Estes mecanismos baseiam-se em classificação e priorização de tráfego, reserva de recursos e gerenciamento de filas de entrada e saída dos roteadores. É o caso dos mecanismos de Serviços Integrados (IntServ), Serviços Diferenciados (DiffServ) e os escalonadores de fila com o uso de diferentes algoritmos de priorização (WANG, 2001) (KUROSE, 1993).

Outros conceitos correlatos à QoS surgiram e trabalhos relacionados a qualidade de atendimento da rede passaram a considerar mecanismo de tratamento do tráfego relacionado aos parâmetros de QoE (*Quality of Experience*) (NAM, 2014)(GORAN; HADZIALIC; BEGOVIC, 2014) e QoT (*Quality of Transmission*) (CUGINI, 2008). Atender a estes requisitos tornou se um grande desafio, principalmente devido à dinâmica de uso da rede.

Observando que o desempenho do protocolo TCP para a transmissão de fluxo contínuo não era satisfatório, principalmente devido ao seu longo "*handshake*" e seu controle de fluxo, o uso de um protocolo mais simples, como

o UDP (*User Datagrama Protocol*) era a opção para a transmissão de áudio e vídeo. Os protocolos em tempo real, como o RTP (*Real Time Protocol*), o RSVP (*Resource Reservation Protocol*) e o RTCP (*Real Time Control Protocol*), foram especificados para dar suporte ao UDP, garantindo sincronismo e melhor controle do fluxo na camada de aplicação e do serviço oferecido (KUROSE; ROSS, 2012). No entanto, o uso do UDP e dos protocolos auxiliares na rede pública não foram muito bem aceitos, pois o uso indevido de tais protocolos expunha as vulnerabilidades da rede. Estratégias de segurança utilizando firewalls passaram a filtrar estes protocolos bloqueando-os, inviabilizando seu amplo uso. Sendo segurança de rede uma preocupação premente, atualmente os firewalls são normalmente configurados para deixar passar somente pacotes para a porta 80, isso é, que utilizam o protocolo HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*).

Desta forma, a solução foi oferecer fluxos de áudio e vídeo utilizando o protocolo HTTP na camada de aplicação, isto é, retornando ao uso do protocolo TCP na camada de transporte, e nos dias de hoje esta estratégia é utilizada por todos os serviços deste tipo (MOK; CHAN; CHANG, 2011). Serviços de entrega desta natureza são conhecidos comercialmente hoje como OTT (*over-the-top*) (Seppanen; Varela, 2013). No entanto, para viabilizar a entrega utilizando estes protocolos é necessário ter uma rede muito mais eficiente, que consiga minimizar os atrasos, garantindo agilidade na entrega (YUE, 2013).

Os impactos econômicos desta evolução são muitos. Como exemplo, com a possibilidade da transmissão de áudio e vídeo pela infraestrutura da Internet, os provedores de serviço de Internet (ISP – *Internet Service Provider*), também chamados hoje de provedores de serviço de comunicação (CSP – *Communication Service Provider*), deixaram de atender serviços específicos de entrega de fluxos contínuos que usavam enlaces dedicados com garantia de entrega, e consequentemente deixando de obter lucro com este tipo de serviço. Por outro lado, para oferecer áudio e vídeo pela Internet é necessário ter mais recursos disponíveis, o que significa investimentos maiores, mas com poucos ganhos (YUE, 2013).

2.3 Redes de Distribuição de Conteúdo

As redes chamadas de *overlay*, ou sobrepostas, foram as precursoras das CDNs, concebidas para suprir a impossibilidade de fazer transmissão multicast, ou multidifusão, na infraestrutura da Internet. Existem alguns protocolos de camada de rede para multicast, como o MOSPF (*Multicast Open Shortest Path First*), DVMRP (*Distance Vector Multicast Routing Protocol*) e o PIM (*Protocol Independent Multicast*) (COSTA; DUARTE, 2002). No entanto, são protocolos elaborados para sistemas autônomos. A proposta de protocolos multicast para a rede pública esbarra em vários problemas como descreve Lao et al (LAO et al., 2007): (1) falta de um protocolo de roteamento interdomínio escalável; (2) problema da escalabilidade de estado quando se tem um grande número de grupos; (3) requisito de implantação global de roteadores com capacidade de *multicast* IP e (4) questões de segurança da rede. Estes problemas, aliados a falta de um modelo de cobrança, a dificuldade de configuração dos roteadores, e principalmente à necessidade de cooperação entre os sistemas autônomos, fazem com que os provedores de serviço de Internet (ISP) relutem em implantar e prover serviços de *multicast*. Atualmente, o serviço de *multicast* é apenas encontrada em redes privadas, onde todos os interessados obtêm o serviço de um mesmo provedor.

Para superar este problema é proposta a rede *overlay*. As funcionalidades de *multicast* são deslocadas dos roteadores, ou seja, da camada de rede, para uma nova rede virtual construída em nível de aplicação sobre as redes tradicionais (UCHÔA; SILVEIRA, 2007) (EL-SAYED, 2004). Nos últimos anos, várias pesquisas tem mostrado a viabilidade deste tipo de estratégia (CHU et al., 2000)(FRANCIS, 2007)(CHAWATHE et al., 2000)(JANNOTTI et al., 2000)(PENDARAKIS et al., 2001)(CASTRO et al., 2002) (CHAWATHE, 2003)(HUA et al., 2003)(LAO et al., 2007)(UCHôA; SILVEIRA, 2007)(UCHôA et al., 2007, 2008, 2009).

Uma CDN pode ser definida como uma rede sobreposta de servidores atuando de forma colaborativa, com o objetivo de entregar conteúdos digitais aos clientes, atendendo a requisitos de qualidade de serviço. Os conteúdos que podem ser disponibilizados através das CDNs são: conteúdos estáticos

(páginas HTML, imagens, documentos), transmissão multimídia (áudio, vídeo, etc) e/ou outros serviços diversos (transferência de arquivos, serviços de diretório).

O termo CDN surgiu nos anos 90 com a necessidade de criar meios de prover desempenho e escalabilidade aos serviços Web, a fim de evitar que websites com grande volume de acessos apresentassem problemas de congestionamento e consequente indisponibilidade. Este tipo de problema ficou conhecida pelo termo *flash crowd* (ARLITT; JIN, 2000) ou *SlashDot effect* (ADLER, 1999), que consiste em um aumento repentino e significativo da demanda a um determinado conteúdo, ocasionando a indisponibilidade do mesmo.

O principio fundamental do funcionamento das CDNs é fazer um balanceamento de carga entre diversos servidores com réplicas do conteúdo original, direcionando usuário para um servidor mais próximo deste, de forma a minimizar a largura de banda utilizada e reduzir a latência no acesso ao conteúdo.

Podemos diferenciar dois tipos de estratégias de definição de CDNs, que são conhecidas como (KUROSE 2013):

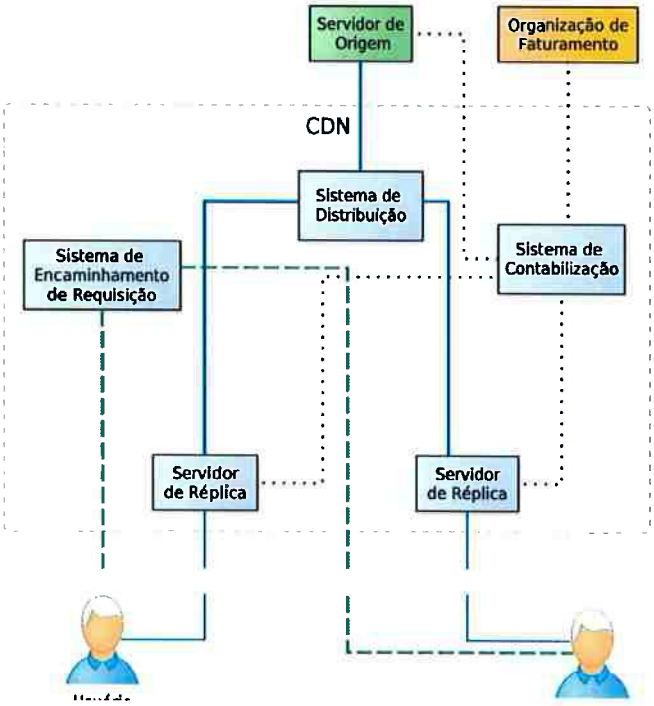
- *Enter deep* - onde o provedor de CDN aloca cluster de servidores em diversos *Internet Service Providers* (ISPs), a fim de se posicionar o mais perto possível do usuário final. A situação ideal seria ter servidores alocados nos ISPs de cada usuário final, minimizando assim a necessidade de desempenho nas comunicações de longas distâncias.
- *Bring home* – estabelecendo grandes infraestruturas de armazenamento e distribuição, interligados por um *backbone* e trazendo a conexão de ISPs até esta infraestrutura. Normalmente estas instalações ficam próximos de PTT (Pontos de Troca de Tráfego) ou PoP (Pontos de Presença), facilitando assim a conexão com os ISPs e empresas de comunicação.

2.3.1 Detalhamento da Arquitetura

As CDNs são constituídas por um conjunto de elementos de rede que podem ser organizados de forma centralizada, hierarquizada ou descentralizada. A arquitetura básica de uma CDN, segundo Buyya *et al.* (2008), é composta por diversos componentes ilustrados na figura 1 e descritos a seguir.

- Componente de entrega de conteúdos - que consiste do servidor de origem, que mantém os conteúdos, e um conjunto de servidores de réplica (também conhecidos como servidores de borda) que são os servidores que efetivamente entregam os conteúdos aos clientes.
- Componente de distribuição - responsável por replicar o conteúdo do servidor de origem, disponibilizado pelos clientes da CDN, para os servidores de borda e garantir a consistência dos conteúdos em todo o sistema.
- Componente de solicitação de rota - faz o redirecionamento das requisições dos clientes aos servidores de borda apropriados;
- Componente de contabilização – mantém o registro das requisições dos clientes e estatísticas de uso, as quais podem ser utilizadas para cobrança dos serviços prestados e controle do consumo dos conteúdos pelo cliente da CDN.

Figura 1: Visão geral da arquitetura de uma CDN. (Adaptado de (Buyya, Pathan e Vakali, 2008))



Além disso, existem diversas questões que devem ser tratadas na definição da arquitetura de uma CDN:

- A distribuição dos servidores de borda na CDN é uma questão que envolve tanto a definição da localização geográfica em que será colocado o servidor como também a quantidade de servidores em cada localidade. As abordagens mais comuns são minimizar a distância entre os servidores, utilizar as informações de topologia e padrões de carga de trabalho, colocar servidores perto dos clientes que geram maior carga ou criar uma estrutura em árvore.
- O mecanismo utilizado para redirecionar o cliente para o servidor de borda mais apropriado. Os mecanismos mais comuns são: GSLB (*Global Server Load Balancing)*, resolução de DNS (*Domain Name System*), redirecionamento HTTP, reescrita de URL e IP Anycast.
- Escolha do servidor de borda para atendimento. Um dos pontos fundamentais nesta questão é definir quais métricas serão consideradas para selecionar o servidor de borda mais adequado para atender uma

determinada requisição (ex: pela distância até cliente, carga atual do servidor, etc);

- Replicação de conteúdo em servidores. Os principais métodos são: todo conteúdo é amplamente replicado, modo empírico - o administrador do site empiricamente seleciona o conteúdo a ser replicado, baseado na popularidade - os conteúdos mais populares são replicados, baseado em objetivos - de acordo com métricas variadas, como o número acessos ou largura de banda, baseado em clusters.
- A forma de distribuição dos conteúdos nos servidor de borda, que podem ser não-cooperativo *pull-based* – o servidor de borda ao receber uma requisição de conteúdo, se este não tiver no seu cache, solicita o conteúdo ao servidor de origem, cooperativo *pull-based* – os servidores de borda cooperam entre si para obter o conteúdo solicitado, no caso deste não estar presente no cachê, cooperativo *push-based* – o servidor de origem envia o conteúdo de forma pró-ativa e os servidores de borda cooperam entre si na replica e na distribuição do conteúdo.

Portanto, podemos observar que definir a arquitetura de uma CDN é uma tarefa bastante complexa, e todas estas definições vão impactar significativamente no desempenho, funcionamento e operação da infraestrutura implementada.

A crescente demanda por serviços de entrega de conteúdo, aliado as tecnologias de computação em nuvem, que transformaram o mercado de infraestrutura de redes em um mercado *commodities*, tornou o mercado de distribuição de conteúdo altamente competitivo. Mediante este cenário, os novos participantes deste mercado estão oferecendo novas maneiras de oferecer serviços de distribuição de conteúdo, descritas a seguir.

CDNs Independentes - são os serviços tradicionais de CDN. Elas têm uma forte base de clientes de produtores de conteúdo e são responsáveis por entregar o conteúdo de seus clientes os usuários finais em todo o mundo de forma que atualmente são os maiores players da Internet tanto em infraestrutura como em volume de tráfego. Em geral, existem três abordagens principais para a construção de uma CDN Independente (FRANK, 2013):

Centralizado - abordagem utilizada por pequenas CDNs e aplicações em Cloud Computing. Os principais benefícios desta abordagem são: (i) a economia de escala que um único local oferece, (ii) a flexibilidade que o *multi-homing* oferece e (c) as oportunidades de conectividade que os ISPs oferecem. As desvantagens são o potencial para um único ponto de falha, e a capacidade limitada para garantir baixa latência para os usuários localizados em diferentes redes ao redor do mundo;

Baseado em *Datacenter* - abordagem na qual são implantados servidores em vários *Datacenters* de grande porte. Ele novamente aproveita a economia de escala, melhorando a confiabilidade e a disponibilidade. No entanto, a utilização de vários *datacenters* implica em novos desafios relacionados com a distribuição e sincronização de conteúdo. Esta abordagem é utilizada por empresas provedoras de serviço de CDN como *Limelight Networks*[8], *EdgeCast*[9] *e BitGravity*[10];

Infraestrutura distribuída - abordagem onde é implantada uma infraestrutura altamente distribuída e potencialmente dentro de redes de terceiros. Nesta, o grande número de servidores espalhados por inúmeras redes oferecem alta disponibilidade e replicação de conteúdo, ao mesmo tempo, é possível manter parte da infraestrutura muito perto dos usuários finais. Além disso, nesta abordagem, é possível balancear o tráfego em todos os locais, reagir melhor aos picos de carga e entregar conteúdo com melhor latência. No entanto, ao utilizar recursos altamente distribuídos, os desafios tornam-se ainda mais complexos. Atualmente a empresa *Akamai*[11] é a única CDN independente que usa essa abordagem em uma escala global.

CDNs operadas por ISPs - O potencial para a geração de receita com o serviço de distribuição de conteúdo tem motivado diversos ISPs a construir e operar as suas próprias infraestruturas de distribuição de conteúdo. Por exemplo, grandes provedores como a *AT&T*[12] e *Verizon*[13] construíram suas

[8] www.limelight.com
[9] www.edgecast.com
[10] www.bitgravity.com
[11] www.akamai.com
[12] www.att.com

próprias CDNs com os mesmos princípios arquitetônicos das CDNs Independentes. No entanto, devido às limitações decorrentes da abrangência da sua própria rede, essas CDNs não são implementados de forma distribuída através de múltiplas redes e, portanto, não são soluções que operam globalmente.

CDNs Federadas - Para superar o problema das CDNs que não possuem abrangência global, o grupo de trabalho *Content Distribution Network Interconnection* (CDNI) (LEUNG; LEE, 2014) do IETF (*Internet Engineering Task Force*) está trabalhando na recomendação para a integração de diversas CDNs a fim de formar uma federação de CDN. Por meio desta solução, é possível evitar o custo de implantação de servidores em uma escala global. Deste modo, CDNs menores, geralmente operadas por ISPs, se juntam para fornecer um serviço de CDN de maior alcance aos provedores de conteúdo (KADLIC, 2014)(PUOPOLO, 2011)(BALACHANDRAN, 2013).

CDNs Licenciadas - As CDNs licenciadas têm surgido como uma solução para combinar os benefícios da uma grande base de provedores de conteúdo de uma CDN independente com a base de usuário final de um ISP. A CDN licenciada é uma parceria entre uma CDN independente e um ISP, em que a CDN licencia o software de distribuição de conteúdo para o ISP, enquanto o ISP opera os servidores. A receita derivada de produtores de conteúdo é dividida entre as duas partes. Assim, uma CDN pode expandir sua abrangência na rede de um ISP sem investir em hardware, e o ISP não precisa investir no software para uma distribuição de conteúdo, além de não precisar negociar diretamente com os produtores de conteúdo.

CDNs Híbridas - Uma CDN híbrida é constituída por uma rede P2P em que tanto as aplicações nos usuários finais como os servidores da CDN, atuam como pares. Além disso, a CDN oferece um serviço de seleção de pares que utilizam também critérios de proximidade topológica, o que beneficia o gerenciamento de tráfego na rede. Além disso, a disponibilidade de conteúdo pode ser gerenciada pela CDN dado o fato de haverem servidores da CDN dedicados para atuar como par. O estudo de Huang (2008) mostrou que até 80% do tráfego de distribuição de conteúdo pode ser realizado através dos

[13] www.verizondigitalmedia.com

usuários finais, sem degradação significativa no tempo total de download. Atualmente a *Akamai* já oferece uma solução de CDN híbrida aos seus clientes, o *NetSession*[14] (ADITYA, 2012). Esta solução tem como alvo a distribuição de arquivos muito grandes, tais como atualizações de *software*. Outro exemplo é o *Xunlei* (DHUNGEL, 2012), um agregador de aplicativos muito popular na China. Ele é usado para fazer *download* de vários tipos de arquivos, incluindo vídeos, programas, e até mesmo e-mails, suportando vários protocolos tais como HTTP, FTP (*File Transfer Protocol*) e RTSP (*Real Time Streaming Protocol*).

Meta-CDNs - Atualmente, grandes produtores de conteúdo estabelecem contratos com várias CDNs para entregar seu conteúdo. Neste contexto surgiram as Meta-CDNs, que atuam como *brokers* na seleção da CDN. As Meta-CDNs geram métricas de desempenho para estimar qual é a melhor CDN para cada caso, levando em consideração também o custo da entrega. Para isso, as Meta-CDNs colocam pequenos arquivos em diversas CDNs e incorporam no código-fonte de sites populares. Assim, quando os usuários visitam esses sites, são geradas estatísticas de acesso que alimentam as métricas de desempenho.

Cloud-CDNs - Esta é uma outra arquitetura que tem sido recentemente alvo de estudos, procurando fazer uma integração mais transparente e otimizada entre a infraestrutura de borda da CDN e os armazenadores e servidores que proveem serviços dispostos como uma nuvem. O principal objetivo desta proposta é diminuir os custos, aumentar a escalabilidade, melhorar a proximidade do conteúdo com o usuário final e melhorar o gerenciamento do consumo do conteúdo para o cliente das CDNs (LIN *et al.*, 2011). Um exemplo de Cloud-CDN é o serviço de distribuição da *Amazon*.

Como indicado estas arquiteturas são amplamente difundidas e encontram-se em uso no mercado, atendendo características específicas de negócios. Para lidar com as crescentes demandas, várias empresas de telecomunicações tem se associado para criar CDNs federadas (FCDNs), que envolve muitos fornecedores diferentes e, portanto, domínios distintos. Embora benéfico em termos de aumento da capilaridade e escalabilidade da prestação

[14] www.akamai.com/us/en/solutions/products/media-delivery/netsession-interface-overview.jsp

de serviços, a interação entre elementos FCDN de diferentes fornecedores traz muitos novos desafios. Entre eles, um que tem recebido pouca atenção até agora refere-se a segurança, um serviço essencial para impedir a utilização abusiva dos recursos FCDN. Com o objetivo de resolver esta questão Pimentel (2015) apresenta o Protocolo de Comunicação Overlay (OCP), um mecanismo de segurança que permite a comunicação de sinalização segura em FCDNs. OCP leva em conta todos os elementos envolvidos no processo de entrega de conteúdo, abordando ataques de falsificação de rotas e esconde a estrutura da rede de potenciais atacantes.

2.4 Distribuição de Conteúdos Utilizando Outras Tecnologias de Rede

A utilização de outras tecnologias de rede também traz a tona questões relacionadas a mecanismos para a melhoria do desempenho para a entrega de conteúdo. Para as redes sem fio, utilizando tecnologia IEEE 802.11, na qual existem muito desafios visto as características de interferência do sinal, topologia mutável e mobilidade, muitos trabalhos têm sido elaborados com o intuito de garantir QoS na distribuição de fluxos de vídeo. Boas *et al.* (2012) fazem uma análise do desempenho do padrão IEEE 802.11e, que especifica mecanismos de garantia de QoS, com o padrão IEEE 802.11a utilizando gerenciamento de fila e priorização de tráfego. Mecanismos de roteamento otimizado para redes ad hoc em malha também tem sido um tema bastante recorrente para melhorar o desempenho da rede em transmissões de vídeo. Santos *et al.* (2015) demonstram que o uso de roteamento multicaminho melhora o atraso fim-a-fim e a confiabilidade da conexão. Souza *et al.*(2014) analisam parâmetros de QoS em cenário utilizando rede ad hoc com transmissão de vários fluxos de vídeo simultâneos com protocolos de roteamento distintos.

Apesar das muitas evoluções na área das redes ópticas, ainda há muito a ser desenvolvido em termos de plano de controle e gerenciamento dos recursos (SÓCRATES-DANTAS et al., 2013, 2014a). Para o melhor aproveitamento dos recursos, foi proposto o uso de redes ópticas elásticas (EON – *Elastic Optical Network*) que proporcionam a utilização de banda de

forma otimizada através de um melhor ajuste entre os requisitos de largura de banda de conexão e ocupação do espectro, permitindo obter canais ópticos de granularidade mais adequada as demanda geradas nas redes atuais. Isso é feito a partir do uso de grades de modulação e comprimentos de onda flexíveis (GERSTEL, 2012).

Apesar dos recursos das redes ópticas parecerem bastante amplos para acomodar qualquer tipo de tráfego, tais redes sofrem com os aspectos de alocação e fragmentação de recursos (SÓCRATES-DANTAS et al., 2014b). Sendo assim, há esforços no desenvolvimento de mecanismos que também garantam QoS para estas redes. Sócrates-Dantas *et al.* (2014c) propõem um método de diferenciação de serviço com alocação de recursos baseada em priorização de tráfego para redes WDM (*Wavelength-division Multiplex*). Em (SÓCRATES-DANTAS et al., 2011) é proposto um mecanismo de diferenciação de serviços (DiffServ QoS) aplicado ao plano de controle PCE (*Path Computation Element*) utilizando uma técnica de alocação de recursos e agregação de tráfego para redes WDM considerando os problemas envolvidos na aplicação desta tecnologia em redes de multicamadas e multidomínio.

2.5 Considerações do Capítulo

A entrega de conteúdos em uma estrutura global e distribuída é de grande complexidade e traz desafios com relação a sua arquitetura, operação e gerenciamento, principalmente quando consideramos um ambiente heterogêneo e imprevisível da Internet. O gerenciamento e a recuperação de dados precisam ser feitos de forma eficiente e escalável através de inúmeros clusters de servidores, muitas vezes alocados em centros de dados de terceiros. Além disso, alterações nas configurações e atualizações de software precisam ser feitos de forma segura, rápida e consistente, sem causar descontinuidade no serviço (NYGREN; SITARAMAN; SUN, 2010). Os provedores de conteúdo precisam manter o controle sobre o consumo de seus conteúdos através da distribuição do provedor de distribuição, o que faz

necessário ter uma interface de gerenciamento, com ferramentas de estatísticas e consumo para cada provedor de conteúdo.

A grande variedade de arquiteturas de CDNs e os investimentos realizados neste tipo de infraestrutura é consequência do ganho de desempenho obtido com estas. No entanto, as demandas variáveis geradas pelo grande volume de usuários fazem com que a alocação de recursos seja feita sempre de forma excedente, o que diminui os ganhos com o serviço.

Com a atual diversidade de perfil de tráfego e dinâmica da rede, o gerenciamento, controle e a alocação de recursos são grandes desafios em todas as tecnologias de rede.

Capítulo 3

Virtualização de Funções de Rede (NFV)

Neste capítulo são discutidas as características da tecnologia NFV, seus benefícios, sua arquitetura e a integração com as tecnologias SDN e CDN. Os avanços das atividades de padronização também serão descritos. Em seguida é feito um levantamento dos trabalhos relacionados a esta tese.

3.1 NFV

Atualmente, um dos grandes desafios na oferta de serviços por parte de provedores de rede é a variação da demanda dos mesmos, exigindo que o provedor aloque recursos de forma superdimensionada para cada um deles. Além disso, o processo de alocação de recurso adicional é lento, pois requer a instanciação de novas máquinas e a instalação e configuração de sistemas.

A virtualização das funções da rede (NFV) é a possibilidade de implantar várias funções de rede (ex.: roteamento, CDN, firewall) através de software e utilizando hardware de baixo custo (servidores de mercado) (ETSI NFV ISG, 2013). As funções podem ser instanciadas em vários locais da rede dependendo da conveniência, sem a necessidade da instalação de novo equipamento.

A virtualização das funções de rede pode trazer vários benefícios, incluindo (MIJUMBI *et al.*, 2015):

- Estímulo a inovação para a criação de novos serviços de rede baseados em software, propiciando maior dinamismo para a oferta de novos serviços de rede;

- Aumento da flexibilidade e diminuição da complexidade do hardware necessário em uma operadora de rede, eliminando a necessidade de hardware de rede específico;
- Diminuição dos tempos gastos com implementação, implantação, testes e integração de um novo serviço de rede;
- Melhoria do desempenho e da escalabilidade de um serviço;
- Facilitar e otimizar a configuração e mudança de topologia da rede dinamicamente de acordo com a demanda;
- Redução do custo de equipamentos e do consumo de energia através de equipamentos mais simples que podem trazer economia de escala para a indústria de TI;
- Diminuição do tempo necessário para que um novo equipamento de rede chegue ao mercado (*time to market*), diminuindo o ciclo de inovação;
- Diminui custo de operação e manutenção do parque de equipamentos de uma operadora de rede;
- Melhoria do gerenciamento dos componentes do serviço de rede através de interfaces padronizadas e abertas entre as funções de rede virtualizadas e a infraestrutura providas por diferentes fornecedores.

No entanto, para atender adequadamente a demanda dos serviços NFV, é necessária uma arquitetura escalável associada a uma infraestrutura robusta. Além disso, dado a natureza deste serviço, na transmissão de vídeo, é notável a necessidade de alocação de recursos adicionais para atender adequadamente quando ocorrem picos de demanda. Para isso, a equipe de operações tem sob sua responsabilidade um número considerável de ações que devem ser realizadas para que este dimensionamento seja realizado de forma estável, como: monitoração, alocação e reconfiguração de novos recursos.

Para tratar esta questão, surgiu recentemente o conceito de serviços elásticos (SZABÓ, 2015), que propõe um modelo de gestão de recursos mais eficiente, flexibilizando o uso da infraestrutura computacional e automatizando

os processos de configuração, diminuindo custos de operação. Segundo Dustdar (2011) o conceito de elasticidade pode ser aplicado não só para provisionamento de recursos computacionais, mas também para qualidade de serviço (QoS) e custo da oferta de um serviço. No entanto, aqui será aplicada tal conceito somente para a função de provisionamento de recursos. A ideia central é dinamizar e automatizar estas operações de forma que a continuidade do serviço não dependa tanto de ações de profissionais e ainda traga diminuição de custos com infraestrutura. Considera-se que uma implementação NFV para alcançar o sucesso deve suportar as seguintes características: virtualização, abstração, programabilidade e orquestração.

Alinhado com este tipo de modelagem de serviços, está sendo definida uma nova arquitetura para construção de serviços de rede, o qual permite implantar funções como roteamento, firewall e CDN, utilizando uma infraestrutura padronizada que pode ser alocada dinamicamente, evitando a necessidade de instalação de equipamentos específicos para cada função (ETSI NFV ISG, 2014a). Além disso, estas funções podem ser instanciadas em vários locais da rede dependendo da conveniência. De modo geral, esta abordagem visa à implementação das funções de rede como entidades de software, que são executadas sobre uma infraestrutura denominada NFVI. A seguir é detalhada a arquitetura de uma infraestrutura para NFV. A figura 2 mostra uma visão de alto nível desta arquitetura, na qual são definidos os seguintes módulos (ETSI NFV ISG, 2014b):

- As funções de rede virtualizadas (VNFs – *Virtual Network Functions*): são as várias implementações de software das funções de rede para diferentes propósitos que são executados sobre a NFVI;
- A Infraestrutura de Virtualização de Funções de Rede (NFVI – *Network Functions Virtualization Infrastructure*): que inclui diversos recursos de hardware e a virtualização de cada um deles;
- Gerenciamento e orquestração NFV (MANO – *Management and Orchestration*): que inclui o gerenciamento e orquestração de todo

os módulos, tanto físicos como de software que dão suporte a virtualização.

O desacoplamento entre hardware e software na virtualização das funções de rede é realizado pela camada de virtualização, que abstrai os recursos de hardware da NFVI. As funções virtualizadas rodam sobre a camada de virtualização, que faz parte da NFVI, e pode envolver recursos de computação, armazenamento e rede. Além disso, as VNFs podem ser implementadas de forma independente ou como cadeia de VNFs, mantendo conectividade entre si para executar funções correlacionadas. Esse é o caso de funções associadas ao serviço Web, como: firewall, NAT e balanceamento de carga. Estas cadeias de funções são representadas como um grafo de encaminhamento de funções de rede virtualizadas, ou uma VNF-FG (*Virtualized Network Function - Forwarding Graph*). A figura 3 é um exemplo de serviço de rede fim-a-fim envolvendo serviços virtualizados, na qual é mostrado um conjunto de VNF encadeados, ou seja, uma VNF-FG.

Figura 2: Visão de alto nível da arquitetura para NFV (adaptada de (ETSI NFV ISG, 2014b))

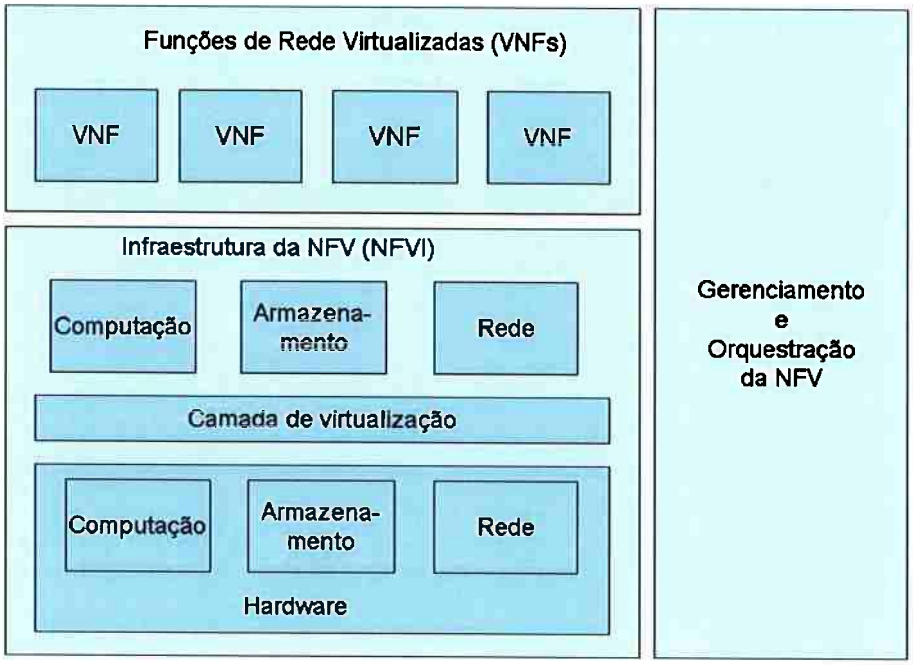
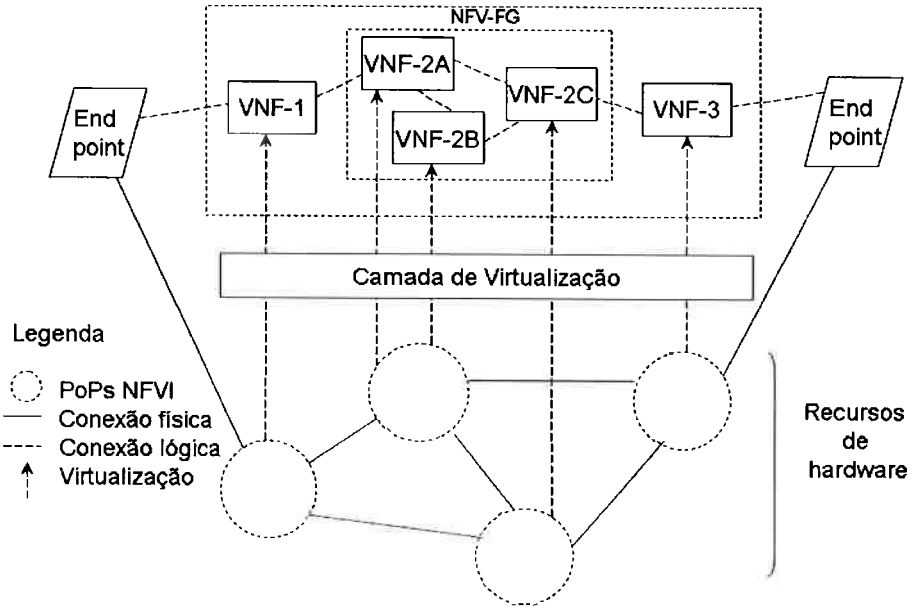


Figura 3: Exemplo de NFV usando FG ((adaptada de (ETSI NFV ISG, 2015))



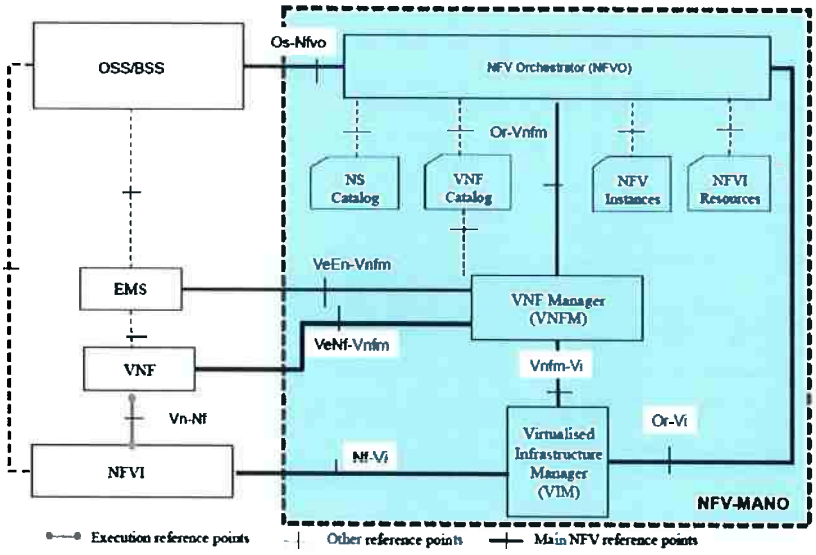
O módulo de gerenciamento e orquestração (MANO) do NFV engloba diversos desafios ainda a serem superados (MIJUMBI et al., 2015). É este módulo que deve prover inteligência, garantindo a correta operação do NFVI e das VNFs, para a implementação das funções de rede de forma dinâmica. MANO deve tratar da orquestração e ciclo de vida de gerenciamento tanto dos recursos físicos como virtuais para dar suporte a NFV.

O ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*), através do NFV Group, tem se dedicado a padronização para NFV assim como a troca de experiências de seu desenvolvimento e implementações iniciais. ETSI propôs recentemente um framework para o módulo MANO, que divide sua arquitetura em: Camada arquitetural NFV, Gerenciamento e orquestração NFV e Sistema de gerenciamento de rede.

A camada arquitetural inclui os módulos NFVI e VNFs, já mencionados anteriormente. O gerenciamento e orquestração NFV é segmentado em três blocos funcionais e o bloco repositório descritos a seguir (ETSI NFV ISG, 2014a):

- Gerenciador da Infraestrutura Virtualizada (VIM): gerencia e controla os recursos físicos e virtuais do NFVI de um único domínio. Portanto, em uma arquitetura NFV que envolva múltiplos domínios devem existir diversos VIMs. O VIM pode ser especializado para controlar os recursos de uma única função de rede ou pode ser genérico, controlando todos os recursos.
- Gerenciador VNF (VNFM): responsável pelo gerenciamento do ciclo de vida de uma VNF. Sendo assim, para cada VNF deve ter um VNFM associado. O VNFM pode atender um único ou múltiplos VNFs em um determinado domínio.
- Orquestrador NFV (NFVO): responsável por criar um serviço fim-a-fim. Suas atribuições se dividem em (i) orquetração dos recursos e (ii) orquestração do serviço. O primeiro é usado para prover serviço que permita o acesso aos recursos da NFVI independente do VIMs, como também faz a governança das instancias das VNFs que compartilham recursos da uma mesma infraestrutura NFVI. O segundo é responsável por criar o serviço baseado na composição de diferentes VNFs e a gerencia da topologia das instâncias dos serviços de rede.
- Repositório de Dados: são base de dados que mantêm as informações relacionadas ao MANO. Para tanto são considerados quatro tipos de repositórios: (i) o catálogo de serviços de rede é o conjunto de modelos pré-definidos, que define como o serviço deverá ser criado e instalado, assim como as funções que fazem parte deste para seu funcionamento e conectividade; (ii) o catálogo VNF é o conjunto de modelos das características operacionais dos VNFs disponíveis; (iii) o repositório de recursos do NFVI mantêm informações da disponibilidade e alocação da infraestrutura NFVI; e (iv) o repositório de instâncias NFV guarda as informações de todas as funções e serviços instanciados.

Figura 4: Arquitetura proposta pela ETSI para o módulo MANO da NFV (extraído de (ETSI GS NFV-MAN, 2014))



Segundo Lee (2015), em sua análise a respeito da arquitetura do VNFM proposto pelo ETSI, o módulo VIM gerencia os recursos virtualizados, mas não tem conhecimento sobre as VNFs ou sobre os serviços de rede (NS Network Services). Por outro lado, a VNFM gerencia o ciclo de vida dos VNF e mapeia os recursos necessários, mas também não tem conhecimento dos NS. Desta forma, a proposta de arquitetura deixa duas opções para gerenciamento dos recursos das VNFs:

i) Realizado pelo módulo NFVO, atuando como o orquestrador global de recursos. O módulo VNFM solicita recurso ao NFVO que repassa a solicitação de recurso para o VIM.

ii) Realizado pelo módulo VNFM, que solicita ao NFVO a concessão de gerenciar as requisições da VNF e passa tal requisição diretamente ao módulo VIM.

Portanto, alguns detalhes da arquitetura ainda não estão claros e muitas questões devem ser verificadas para garantir o melhor desempenho da implementação de NFV.

3.2 Integração de NFV e SDN

A Rede Definida por Software (SDN – *Software Defined Networking*) permite aos administradores de redes gerenciar o uso da rede através da abstração de funcionalidade de nível inferior. Isto é feito através da dissociação do plano de controle, o sistema que toma decisões sobre para onde o tráfego é enviado, e do plano de dados, o sistema que encaminha o tráfego para o destino selecionado (CASADO *et al.*, 2012). A grande vantagem desta abordagem é que simplifica a rede, permitindo a implementação de várias funcionalidades em software, o que também diminui os custos e flexibiliza o sistema permitindo a elaboração de métodos inovadores.

Uma das implementação de maior repercussão de SDN é o *OpenFlow* (MCKEOWN *et al.*, 2008), mantido atualmente pela *Open Networking Foundation*[15], é uma implementação de código aberto que tem sido utilizado pela comunidade acadêmica e por corporações para melhorar o desempenho de suas redes. Um bom exemplo de utilização comercial de *OpenFlow* é feita pela *Google*[16], que criou uma infraestrutura de *backbone* que interconecta seus *datacenters* utilizando o *OpenFlow*, permitindo assim criar um serviço de engenharia de tráfego centralizado, utilizando *switchs* de baixo custo (JAIN *et al.*, 2013).

Muitos trabalhos apresentam o uso do *OpenFlow* para a otimização da transmissão de vídeo em rede como uma excelente opção para a implementação de mecanismos de QoS através de software com baixo custo e eficiência. Uma destas propostas implementa um módulo que é denominado *OpenQoS* integrado ao controlador *OpenFlow*, que utiliza um mecanismo de diferenciação de tráfego o que permite tratar dinamicamente de forma diferenciada os fluxos de vídeo escolhendo a rota que mais se adequa aos parâmetros de QoS requisitados (EGILMEZ *et al.*, 2011). Em outro trabalho Egilmez propõe a utilização de codificação de vídeo escalável criando com isso

[15] www.opennetworking.org/
[16] www.google.com

diferentes camadas de qualidade de serviço e priorização, que serão usadas de acordo com as condições da rede (EGILMEZ *et al.*, 2012).

Outro trabalho propõe ainda a implantação de um módulo no controlador *OpenFlow* que manipula métricas de QoS. O protocolo proposto tem como objetivo garantir o entendimento mútuo entre o transmissor e o receptor na hora da solicitação de um vídeo e a procura de uma rota com qualidade de serviço. Basicamente é uma troca de mensagens que resulta no estabelecimento ou não de uma sessão. O autor propõe modificações ao protocolo *OpenFlow* para implementar a sua solução, acrescentado métricas de Qualidade de Serviço nas descrições das filas dos switches *OpenFlow* (OWENS, 2013).

NFV é bastante complementar ao SDN, mas não são necessariamente dependentes entre si (BHAUMIK et al., 2014). Apesar de parecerem conceitos semelhantes, NFV é a virtualização das funções de rede, enquanto SDN é a separação das funções de controle e encaminhamento (ETSI NFV ISG, 2012). Portanto, SDN pode facilitar a implementação de NFV, provendo o fatiamento da camada física e a virtualização da rede, o que facilita a operação e manutenção dos procedimentos da NFV. Desta forma, é fácil verificar que a combinação das duas soluções pode potencializar os benefícios.

3.3 Utilização de NFV e SDN em serviço de entrega com CDN

A utilização de NFV em uma infraestrutura de CDNs foi descrita em (ETSI NFV ISG, 2013) documento da ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*), grupo responsável pela proposta e especificação do conceito de NFV, demonstrando a sua aplicabilidade.

Um dos benefícios indicado por é que a virtualização de elementos de uma rede de distribuição de conteúdo pode conviver com elementos não virtualizados, permitindo que apenas os elementos mais críticos sejam virtualizados, garantindo a elasticidade do serviço. Mangili (MANGILI et al., 2014) demonstra que uma solução mista de elementos virtualizados e não

virtualizados podem reduzir drasticamente o custo de operação de uma rede de distribuição, chegando a 65% de economia.

Um (2014) demonstra ainda que é possível associar um algoritmo a rede de distribuição virtualizada que garanta o atendimento ao SLA (*Service-Level Agreement*) contratado pelo cliente de forma dinâmica. Giotis (2015) também mostra resultados promissores ao utilizar uma rede de distribuição híbrida associada a SDN, com alguns nós virtualizados, ao estabelecer um mecanismo de políticas para a realocação de recursos.

Os ISPs que operam CDNs frequentemente têm que hospedar equipamentos para diversas empresas que oferecem serviço de entrega, responsabilizando-se pela operação de equipamentos de diferentes fornecedores. Neste cenário, a possibilidade de implantar mais recursos devido a uma demanda inesperada, como o acesso a vídeo viral ou a um evento muito popular, torna-se mais lenta e com maior custo. Além disso, como o consumo de vídeo é feito principalmente para entretenimento, normalmente a utilização do serviço é caracterizado por picos nos finais de semana, enquanto que durante a semana os recursos de hardware ficam subutilizados. Outra característica deste serviço é a grande volatilidade do mercado, com rápidas mudanças de formato e resolução de vídeo, protocolo e dispositivos. Por estes motivos, virtualizar o serviço de CDN torna-se extremamente atrativo, possibilitando o melhor uso dos recursos disponíveis.

Os benefícios da implementação de CDN através de NFV são:

- Diminuição do custo, já que cachês implementados em software são bem mais baratos;
- Facilidade no dimencionamento dos recursos necessários e rapidez na integração de mais recursos quando houver demanda;
- Compartilhamento de recursos entre prestadores deste serviço;
- Facilidade e diminuição de custos de operação e manutenção devido ao hardware não específico e proprietário.

3.4 Padronização

Os esforços de padronização relacionados a NFV abordam várias questões, desde a conceituação e definições, a identificação dos cenários de uso, o mapeamento de desafios, a arquitetura e os mecanismos de gerenciamento e orquestração. O principal órgão de padronização tem sido o European Telecommunications Standards Institute (ETSI), com o grupo denominado ETSI NFV Industry Specification Group (NFV ISG) estabelecido em novembro de 2012 (MIJUMBI et al, 2015). O grupo conta atualmente com cerca de 245 empresas, incluindo 37 das maiores provedores de serviços e empresas de telecomunicação.

Outras instituições que tem contribuído com os esforços de padronização são:

- IETF (*Internet Engineering Task Force*) – criou o grupo Service Function Chaining Working Group (IETF SFC WG) que tem como objetivo propor uma arquitetura para a cadeia de funções de rede que inclui a elaboração de protocolos ou extensões de protocolos que cubram as necessidades da cadeia de funções de serviços (SFC).
- IRTF (*Internet Research Task Force*) – criou o grupo IRFT NFV Research Group (NFVRG) para promover a pesquisa em NFV junto a comunidade cientifica, em especial com o enfoque da rede, dos problemas computacionais e de armazenamento.
- ATIS (*Alliance for Telecommunications Industry Solutions*) – criou o ATIS NFV Fórum, com o objetivo de desenvolver especificação relacionadas a interoperabilidade, descrição de novos serviços e processos de automatização.
- BB Fórum (*Broadband Fórum*) – consorcio de indústrias dedicado ao desenvolvimento de especificação para rede de banda larga. Colabora formalmente com o ETSI e tem trabalhado na especificação de como NFV pode ser usado na implementação de multiserviços para rede de banda larga.

Mesmo depois de três anos de trabalho de padronização destes grupos, ainda há muito desenvolvimento pela frente a fim de tornar amplo o uso da virtualização dos serviços de rede de forma a atender todos os requisitos dos atuais e futuros serviços oferecidos ao usuário da Web.

3.5 Trabalhos Relacionados

Para se alcançar a combinação de bom desempenho de uma infraestrutura de entrega de vídeo, com atendimento aos requisitos de QoS, com economia de escala, primordial para manter o serviço sustentável, os recursos físicos devem ser usados eficientemente. Para tanto é necessário fazer alocação dinâmica dos recursos, visto a pré-alocação dos mesmos resultam em gastos excessivos devido a recursos excedentes não utilizados. Portanto, algoritmos eficientes devem ser elaborados para determinar quais recursos devem ser alocados dinamicamente para atender as funções de rede.

Desta forma, alguns autores tem explorado o uso de algoritmos de otimização da alocação de recursos dinamicamente na expectativa de viabilizar a automatização da virtualização dos serviços de rede. Mijumbi (MIJUMBI *et al.*, 2015) apresenta um amplo trabalho de revisão sobre NFV e aponta como um dos desafios de pesquisa existentes na área é o tratamento da alocação de recursos de forma dinâmica. Ele indica que a sub otimização do uso dos recursos impacta negativamente nos ganhos e na competitividade dos provedores de serviço de rede.

Villegas (VILLEGAS *et al.*, 2011) definiu uma política de provisionamento e alocação de recursos baseado em análise empírica da métrica desempenho-custo para infraestrutura de serviço (IaaS – *Infrastructure-as-a-Service*) de computação em nuvem.

Outro trabalho realizado por Li (LI *et al.*, 2012), que considera a alocação dinâmica de recursos para um *datacenter*, é formulado um algoritmo com o objetivo de encontrar a melhor alocação de banda que possa maximizar sua utilização para todas as aplicações que acessam o *datacenter*.

Um (UM *et al.*, 2014) propõe um algoritmos para a alocação de recursos em CDN baseada em nuvem onde, dependendo da taxa de variação das requisições e do atraso médio de resposta a requisição, é feita alocação de recursos adicionais. Os autores consideram ainda para esta alocação três classes de serviço (ouro, prata e bronze) que caracterizam os contratos com usuários com diferentes níveis de acordo de serviço (SLA – *Service-Level Agreement*). As demadas destas classes de requisições são caracterizadas por uma distribuição de Poisson. No entanto, são considerados valores limites superiores e inferiores fixos para a taxa de variação de requisição e para o atraso de rede respectivamente para a alocação e desalocação dos recursos da nuvem.

Mijumbi (MIJUMBI, 2015b) explora quatro algoritmos de alocação de recursos para NFV. Os autores consideram a questão segmentando-a em dois problemas: (i) mapeamento de máquinas virtuais em máquinas físicas e (ii) mapeamento e escalonamento de VNFs nos nós virtuais criados. Para o mapeamento e escalonamento de funções de rede são explorados quatro algoritmos que realizam as duas tarefas, são eles baseados em: recurso menos carregado, recurso com menor taxa de processamento, recurso com menor fila virtual e mecanismo de busca do melhor recurso.

Clayman (CLAYMAN, 2014) propõe uma arquitetura onde há um orquestrador associado a um módulo de monitoramento que garantem a alocação dinâmica dos recursos virtuais. O cenário de estudo considera objetivos como menor consumo de energia ou balanceamento de carga, e a realocação dos recursos é manipulado para alcançar tal objetivo. Os recursos são alocados baseados nas métricas "menos utilizado" e "menos ocupado".

De acordo com o levantamento bibliográfico realizado não há ainda nenhum estudo específico de mecanismos de alocação dinâmica de recursos, com limiar não fixo, utilizando NFV para CDN elástica.

Capítulo 4

Proposta de Algoritmo de Alocação Dinâmica de Recursos

Como mencionado anteriormente, um dos maiores desafios em relação a NFV é encontrar mecanismos inteligentes e eficientes para a alocação e desalocação dinâmica de recursos. Alguns trabalhos tem tratado deste tema, mas nenhum considera parâmetros elásticos, que se adéqüem as condições de consumo dos recursos da infraestrutura. Neste trabalho é proposto um mecanismo que considera a dinâmica de crescimento e diminuição do consumo dos recursos para fazer a alocação e desalocação destes. Desta forma, objetiva-se obter maior eficiência no consumo dos recursos de uma infraestrutura complexa como a de uma CDN.

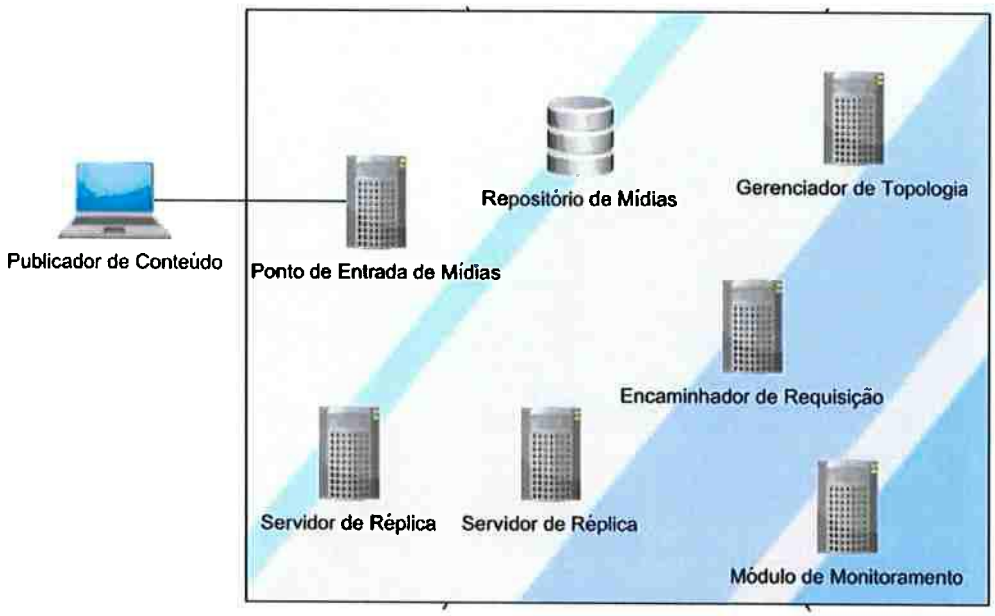
Todos os trabalhos que propõem algoritmos para a alocação de recurso consideram um limiar (threshold) fixo. No entanto, considera-se aqui que o comportamento da rede é essencial para a definição deste parâmetro. Dependendo de sua dinâmica, ou seja, da taxa de requisições, este limiar deve se ajustar a condição atual do serviço de rede e dos recursos necessários para atender tal demanda. Sendo assim, é proposto neste trabalho um limiar deslizante e elástico a partir do monitoramento do nível de consumo destes recursos.

4.1 Cenário Considerado

Este trabalho considera a infraestrutura básica de uma VDN, indicado na Figura 5, onde a característica de elasticidade deve ser implementada nos recursos que podem sofrer restrição ao atender uma demanda de pico, ou seja:

- Recursos associado aos Servidores de Réplica:
- Recursos associado ao Gerenciador de Topologia;
- Recursos associados ao Encaminhador de Requisição (incluindo o balanceador de carga e o gerenciador de rotas).

Figura 5: Infraestrutura básica de uma VDN



O algoritmo proposto deve ser implantado no módulo VIM da NFV.

Para tanto, estabelece-se como primícias iniciais que:

- Existem recursos adicionais disponíveis tal que a infraestrutura possa ser expandidos dinamicamente;
- Todos os recursos em uso são monitorados pelo Módulo de Monitoração;
- Os módulos do serviço de distribuição estão instalados em máquina virtual, que podem ser instanciados dinamicamente;
- Um módulo Supervisor, mostrado na Figura 6, deve ser implantado em cada site de réplica. Este Supervisor fará o mapeamento e controle das alocações e desalocações.

- A conexão física de rede é uma restrição de precedência para o atendimento as demandas de entrada.

O mapeamento dos recursos deve ser realizado e controlado por um módulo adicional denominado aqui de Supervisor ou Gerenciador.

4.2 Formalização do Algoritmo

Considera-se que existe um conjunto de recursos, que incluem máquinas físicas, elemento de processamento virtual (CPU), memória virtual, espaço em disco virtual e conexão de rede virtual, tal que sejam infinitos:

$$R_J = \{R_1, R_2, R_3, R_4, \ldots, R_m\}, \text{ tal que } m \geq 1 \qquad (1)$$

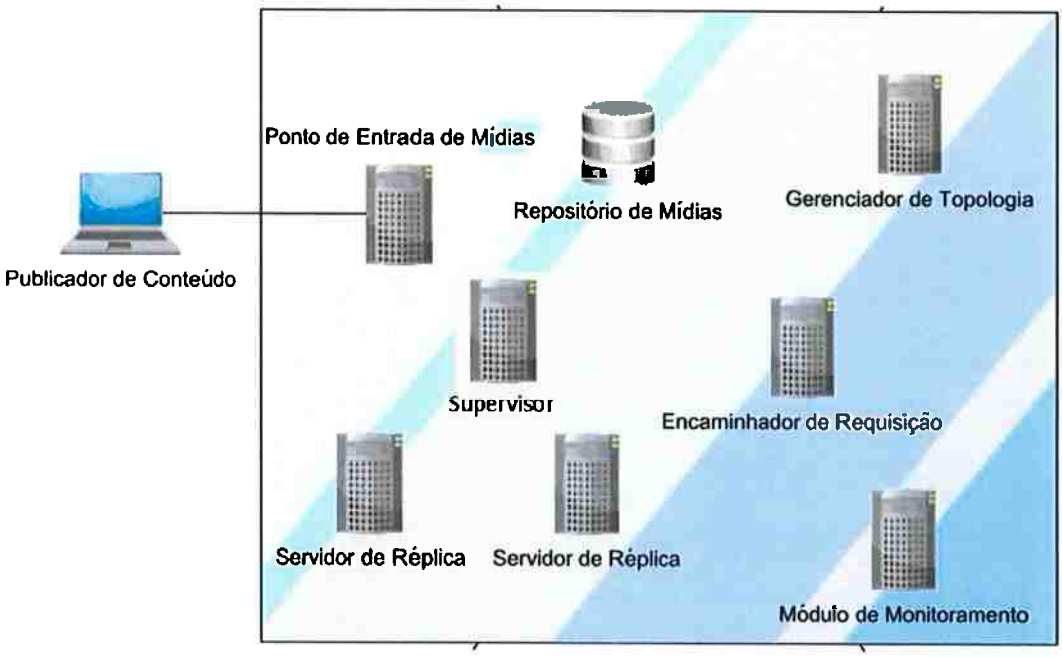
Onde R_1 é o recurso primário, ou seja o recurso existente na infraestrutura antes da necessidade de alocação de recursos adicionais. Os demais são considerados recursos secundários, que foram alocados sob demanda de acordo com o crescente número de requisições e que poderão ser desalocados caso haja uma retração da demanda. Seja R_{total} o total de recursos já alocado e R_{atual} o recurso já consumido. Tal que:

$$R_{total} = \Sigma R_{J,total} \quad (2)$$

$$R_{atual} = \Sigma R_{J,atual} \quad (3)$$

$$R_{total} \geq R_{atual} \quad (4)$$

Figura 6: Infraestrutura de VDN com módulo Supervisor



Seja L_{total} a banda de conexão física de rede total em que está conectado o módulo do serviço e L_{atual} a banda de rede em uso.

$$L_{total} \geq L_{atual} \qquad (5)$$

Os recursos são monitorados, e através desta é possível obter o nível de recurso alocado em um dado instante. A taxa de atendimento de requisições ao serviço T é dada pela derivada da quantidade de recurso consumido por um determinado intervalo de tempo, portanto:

$$T = dR_j/dt, \text{ onde se } \begin{cases} T > 0, \text{ requisições estão crescendo} \\ T = 0, \text{ requisições estão constantes} \\ T < 0, \text{ requisições estão diminuindo} \end{cases} \qquad (6)$$

Um novo recurso deve ser alocado quando, um destes recursos qualquer em uso, estiver próximo de seu esgotamento. No entanto, para que o recurso adicional seja instanciado, com a realização da instalação de um módulo do serviço, configuração e inicio da operação, é necessário um tempo

de alocação. Portanto, o processo de alocação deve ser iniciado antes que o recurso atualmente em uso se esgote. Sendo Θ_{aloc} o tempo de alocação, temos que considerar um recurso de guarda ΔR, que será dado por:

$$\Delta R = \Theta_{aloc} * T \qquad (7)$$

Portanto, obtemos a condição:

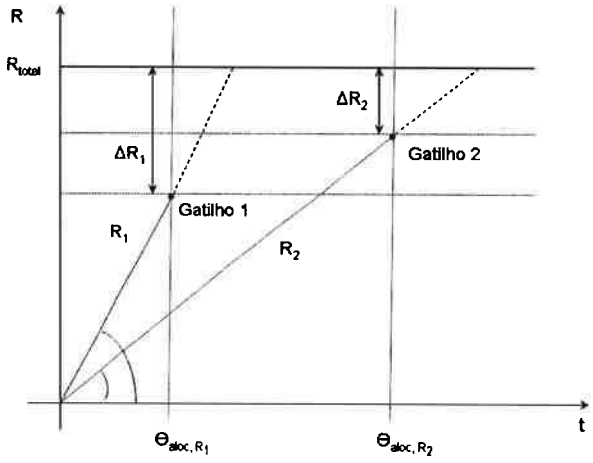
$$R_{atual} \geq R_{total} - \Delta R \qquad (8)$$

Esta condição deve ser o gatilho para que o processo de realocação de recurso adicional seja iniciado, garantindo assim que haja recurso disponível para dar continuidade ao serviço. Observa-se que não se considera aqui um limiar fixo (threshold), pois o gatilho variará com a taxa de atendimento das requisições, fazendo com que o mecanismo seja elástico com limiar deslizante. Sendo assim, o gatilho para a alocação de mais recurso em questão será expresso por um limiar deslizante de acordo com a necessidade de recurso para atender a taxa de requisição ao serviço, como mostra a figura 7 a seguir.

A alocação de recursos considera o esgotamento de um único recurso, já para a desalocação é necessário considerar todos os recursos (de um mesmo tipo) em uso no sistema. Portanto, para a desalocação do recurso, considera-se que:

- Apenas o recurso primário deve se manter continuamente alocado;
- Os recursos alocados para atender demandas adicionais são considerados recursos secundários;
- Para o caso do Servidor de Réplica, um processo de realocação de conteúdos dos cachês de vídeo dos recursos secundários deve ser realizado, passando a responsabilidade pelo cacheamento de vídeo para o recurso primário;
- Após a liberação do cachê, tal recurso poderá ser desalocado.

Figura 7: Representação do gatilho deslizante de acordo com taxa de requisição



A desalocação deve ser coordenada pelo Supervisor. Todos os recursos secundários podem ser desalocados se:

$$T = dR_j/dt < 0 \qquad (9)$$

$$R_{1total} = \Sigma\, R_{J,atual},\ \text{com } 1 \leq J \leq m \qquad (10)$$

A desalocação de recursos secundários um a um poderá ser realizado, se:

$$R_{J-1,total} / n \leq \Sigma\, R_{J-1,atual} / n\ ,\ \text{com } 1 \leq J \leq n,\ n = m - 1 \qquad (11)$$

A partir destas considerações, o algoritmo de alocação e desalocação de recursos é mostrado a figura 8. No pseudocódigo, foi feita uma simplificação e é mostrada a desalocação de todos os recursos secundários em conjunto.

O uso deste algoritmo deve ser feito em um ambiente de VDN com virtualização de serviços, ilustrado na figura 9. O módulo de monitoração tem um papel fundamental, visto que a partir da dinâmica do consumo atual de recursos será feita a alocação e desalocação de recursos.

Figura 8: Algoritmo de alocação e desalocação de recursos para uma VDN

Algoritmo de Alocação de Recursos

```
Input: total resource, used resource by time (last_resource, current_resource, last_time,
current_time), m resources number
Globalvariable aloc_time, total_system_resource, total_resource
i = 0
delta_resource = 0
// define o recurso de guarda
delta_resource = aloc_time * ((last_resource – current_resource)/(last_time –
current_time))
// verifica se a demanda por recursos é crescente e o momento do gatilho para a
alocação
if ((last_resource – current_resource)/(last_time – current_time) > 0) and
    current_resource => total_resource – delta_resource then
// aloca recurso adicional
        # CALL Realloc procedure
else
// verifica se a demanda por recursos é decrescente
    if ((last_ resource – current_ resource)/(last_time – current_time) < 0) then
// soma os recursos que estão sendo consumidos
        for i = 1 to m
            current_system_resource = current_system_resource + current_resource (i)
// verifica se o consumo pode ser atendido pelo recurso primário
            if total_system_resource > current_system_resource then
// desaloca recursos secundários
                    # CALL Desalloc procedure
            end if
        end for
end if
end if
```

4.3 Considerações do Capítulo

A alocação de recursos de forma dinâmica e automatizada é fundamental para que as infraestruturas de serviços (IaaS) atuais consigam alcançar ganho de escala. Procurou-se propor um algoritmo de alocação e

desalocação que fosse genérico o suficiente para atender a qualquer tipo de recurso. O fato do algoritmo utilizar limiar deslizante garante o atendimento em caso de comportamento atípico de consumo de recursos.

No capítulo a seguir é mostrado um estudo de caso que permitirá contextualizar a possibilidade de uso deste algoritmo em um ambiente real de distribuição de vídeo.

Capítulo 5

Estudo de Caso

Este capítulo descreve o sistema de distribuição de vídeo da USP, que utiliza componentes desenvolvidos no LARC (Laboratório de Arquitetura e Redes de Computadores) da Escola Politécnica da USP, para a construção de uma VDN tradicional. Uma instância de teste deste sistema foi utilizada para validar a integração de uma VDN com as tecnologias SDN e VNF. Desta forma, utilizando este sistema experimental e dados reais do sistema da USP, que encontra-se em um ambiente de produção, será possível testar e validar o algoritmo de alocação e desalocação de recursos proposto no capítulo anterior. Com isso objetiva-se mostrar que o algoritmo proposto pode ser utilizado para automatização da alocação e desalocação de recursos de forma elástica em um serviço de transmissão de vídeo em larga escala.

5.1 Ambiente de Distribuição de Vídeo da USP

Atualmente a USP possui uma rede de distribuição de conteúdo, com foco em vídeo, para dar suporte aos portais IPTV-USP[17] e eAulas[18]. O portal IPTV-USP tem como objetivo a distribuição conteúdos, ao vivo e sob demanda, produzidos pela USP em diversos contextos, desde educacionais, científicas e culturais, até de divulgação institucional e de pronunciamentos oficiais da reitoria. Por outro lado, o eAulas tem como principal objetivo a distribuição sob demanda de vídeo-aulas produzidas para os cursos da Universidade de São Paulo. Serão apresentados os casos de uso de publicação e transmissão de

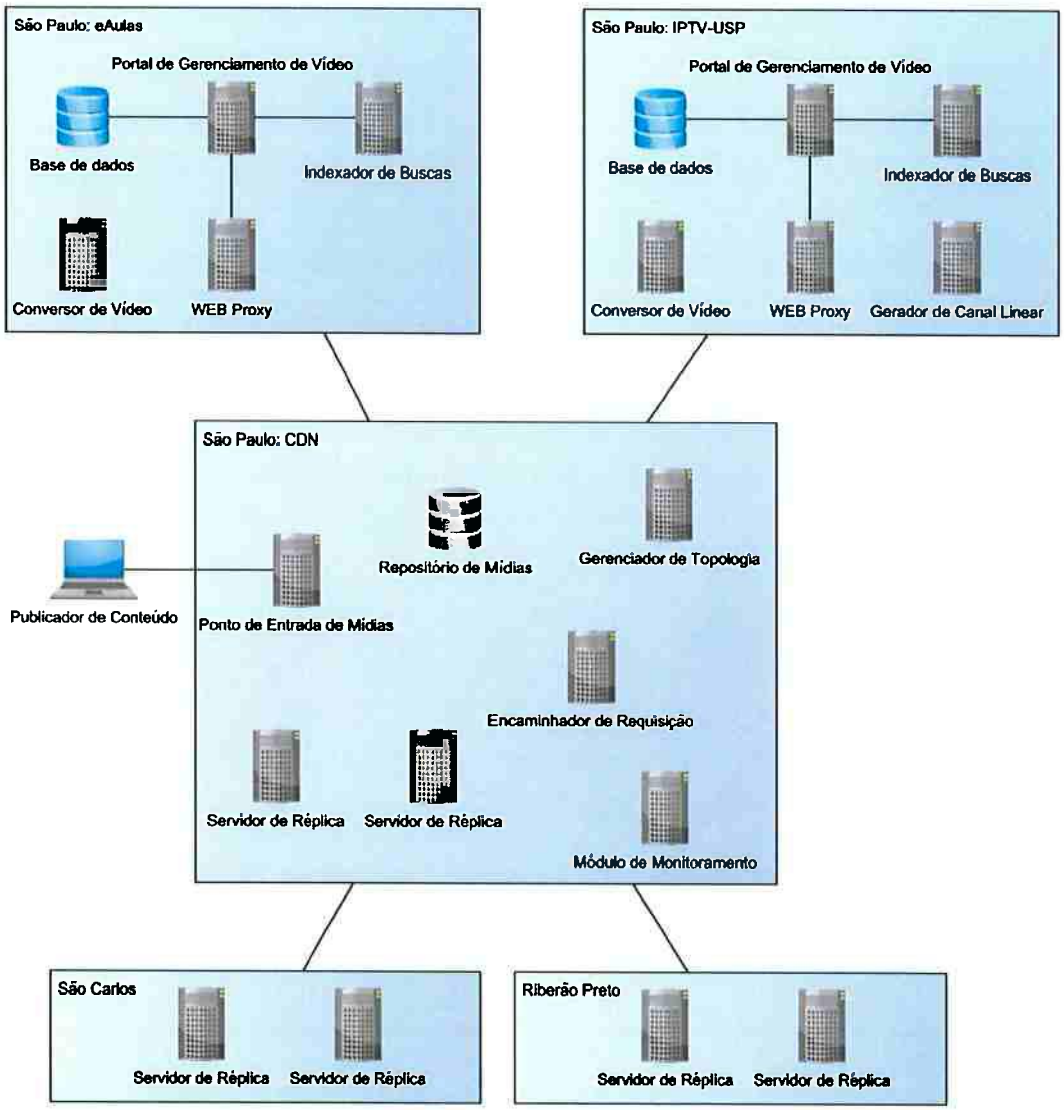
17 IPTV-USP: `http://iptv.usp.br/`
18 eAulas: `http://eaulas.usp.br`

vídeo neste ambiente. Também é descrito o módulo de monitoração utilizado para coletar os dados de uso dos elementos que compõem a VDN.

5.1.1 Infraestrutura de Distribuição

A infraestrutura implantada na USP (Figura 9) compõem uma rede VDN completa, com Servidores de Réplica, um Encaminhador de Requisição e os demais elementos que formam um sistema de distribuição de vídeo.

Figura 9: Ambiente de distribuição de vídeo da USP



A publicação de conteúdos dentro do sistema IPTV-USP é feita através de uma área específica dentro do portal, na qual é necessária uma permissão

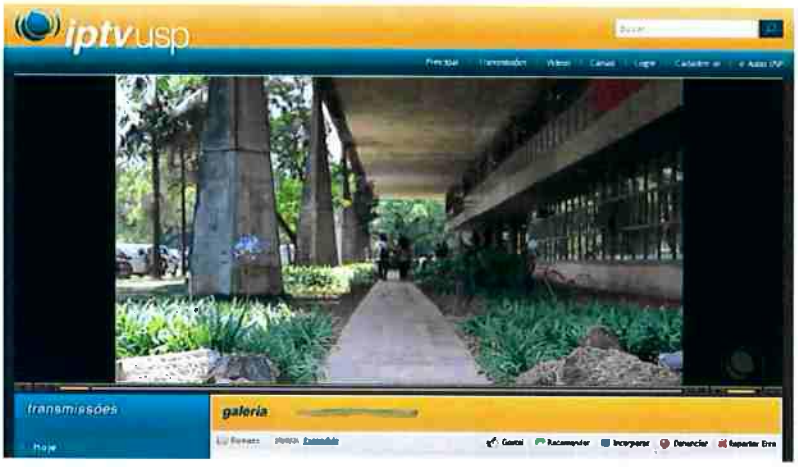
específica para realizar esse tipo de operação. Uma vez obtida essa permissão, o processo de publicação consiste em selecionar um arquivo de vídeo em um dos diversos formatos suportados, fazer o *upload* para o ambiente (como pode ser visto na figura 10), cadastrar os metadados do conteúdo, e finalizar o processo de carregamento, ou *upload*, do vídeo.

Figura 10: Ambiente de publicação de vídeo do IPTV-USP

Um ponto extremamente importante neste caso é que apesar do usuário estar interagindo com o portal para a publicação do conteúdo, a arquitetura do sistema permite que o fluxo de dados referentes ao *upload* da mídia é encaminhado diretamente para o Ponto de Entrada de Mídias, e isto de forma transparente para o usuário. O grande benefício deste modelo é que não sobrecarrega o portal com o tráfego deste fluxo, que pode apresentar um volume da ordem de centenas a milhares de *megabytes*. Além disso, permite otimizar o uso dos enlaces de rede de todo o sistema.

O consumo do conteúdo é realizado através da seleção de um vídeo dentre os diversos cadastrados hoje no sistema IPTV-USP, onde será executado um reprodutor de vídeo (ou *player)* com o conteúdo selecionado (como pode ser visto na figura 11).

Figura 11: Ambiente de consumo de vídeo do IPTV-USP



De forma similar à publicação do conteúdo, a transmissão do vídeo é realizada do Servidor de Réplica eleito pelo Encaminhador de Requisições diretamente para o usuário, novamente, de forma transparente ao usuário. O cliente requisita o conteúdo ao Encaminhador de Requisições, conforme indicado pelo portal do IPTV. Este, por sua vez, autentica a requisição do cliente e calcula uma rota sobreposta composta por Servidores de Réplica e a fonte do conteúdo. Finalmente gera uma mensagem OCP (*Overlay Communication Protocol*) usada para redirecionar o cliente ao Servidor de Réplica escolhido. O cliente então, ao receber o redirecionamento, requisita o conteúdo ao Servidor de Réplica usando o endereço passado pelo Encaminhador de Requisições. O Servidor de Réplica autentica a requisição e verifica se o conteúdo informado está em seu *cache*, e caso não encontre, requisita ao próximo Servidore de Réplica da rota. Ao receber o conteúdo deste, coloca-o em seu *cache* e transmite ao cliente.

5.1.2 Monitoramento

O monitoramento da VDN da USP é composto basicamente por agentes de monitoramento em cada um dos servidores e um Módulo de Monitoramento, instalado em um servidor dedicado. Em termos práticos, foram instalados em cada um dos servidores um agente *collectd*[19], configurado para enviar dados

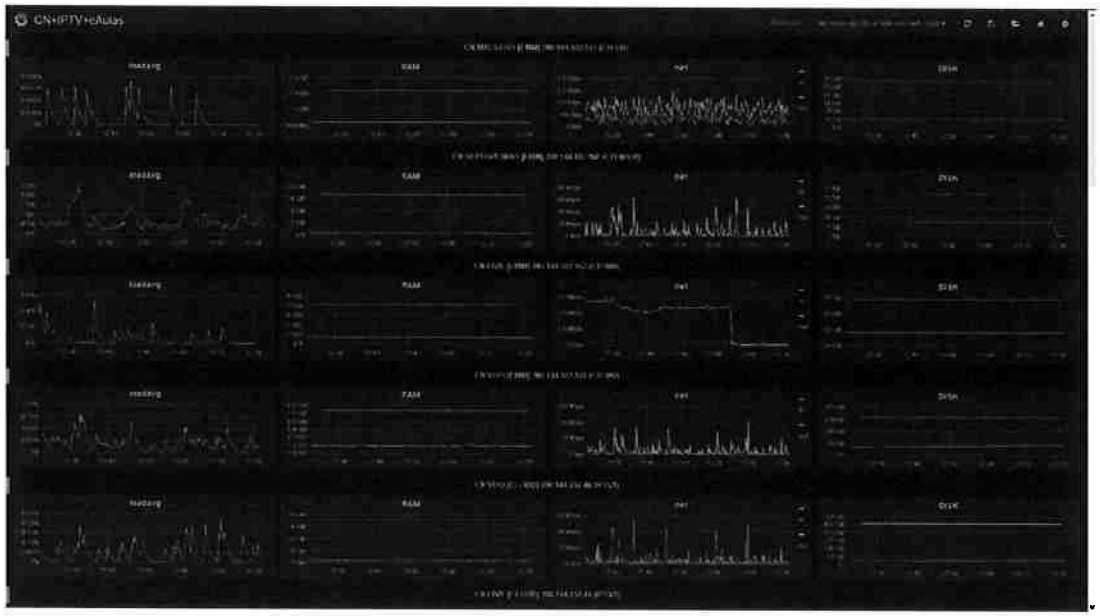
19 collectd: `https://collectd.org/`

referentes ao uso dos recursos computacionais dos servidores para o Módulo de Monitoramento. Este por sua vez é constituído por uma instância do OpenTSDB[20], que recebe os dados de todos os agentes, e por uma instância do Grafana[21], usado como ferramenta de visualização dos dados coletados, e que pode ser visto na figura 12.

Os agentes configurados nos servidores transmitem as informações coletadas periodicamente para o sistema de armazenamento através de uma interface *RESTful* que permite a comunicação através do protocolo HTTP. Deste modo, é possível a integração com sistemas externos através de operações de envio e consulta dos dados monitorados.

A coleta das informações é realizada através de um conjunto de módulos de monitoramento desenvolvidos para funcionalidades e sistemas específicos, ou seja, na configuração do agente de coleta, são especificados quais módulos de monitoramento serão utilizados para um determinado ambiente a ser monitorado, e suas respectivas configurações.

Figura 12: Sistema de visualização dos dados monitorados



O exemplo da figura 12 mostra as métricas monitoradas: uso de CPU e de memória RAM, tráfego de dados na interface de rede e espaço disponível no disco rígido para quatro componentes virtualizados. As informações

20 OpenTSDB: `http://opentsdb.net/`
21 Grafana: `http://grafana.org/`

monitoradas serão enviadas para o sistema de armazenamento juntamente com uma marcação de tempo (*timestamp*) em que a coleta foi realizada, além da identificação do servidor ao qual pertence a informação. Através deste sistema é possível fazer consulta aos dados, que são utilizados para alimentar a lógica de otimização do sistema de encaminhamento de requisições nas escolhas dos melhores enlaces e servidores para a transmissão.

5.2 Ambiente virtual para testes de SDN

Nesta seção são descritos os testes dos componentes de uma SDN executados em um ambiente experimental, demonstrando a possibilidade de integra uma VDN ao mecanismo de virtualização de rede.

Os benefícios desse ambiente compreendem aspectos como a possibilidade de criação de topologias em SDN com diversos nós e múltiplos controladores simultaneamente, assim como a segmentação da rede. É possível também a utilização de ferramentas e tecnologias para análise de pacotes e de fluxos permitindo uma análise mais detalhada das informações dos pacotes que trafegam na rede emulada.

Para a definição de diversas topologias SDNs é utilizado o software *Mininet* (LANTZ; HELLER; MCKEOWN, 2010). Através deste é possível realizar emulações que permitem construir infraestruturas de rede virtuais de forma rápida. Com a utilização de técnicas de virtualização do sistema operacional, esta ferramenta instancia dispositivos de rede baseados em software que implementam o protocolo *OpenFlow*. Outra vantagem deste software de emulação é que é possível conectar a rede virtual equipamentos reais, sendo assim é possível integrar máquinas transmissoras que geram fluxos externamente a rede virtualizada, transmiti-los pela rede virtual e entregá-lo para um receptor fora desta. Desta forma é possível integrar alguns componentes da VDN a rede virtual, como por exemplo o servidor de réplica e emular a transmissão de vídeo à um cliente.

5.3 Ambiente para teste CDN/SDN/NFV

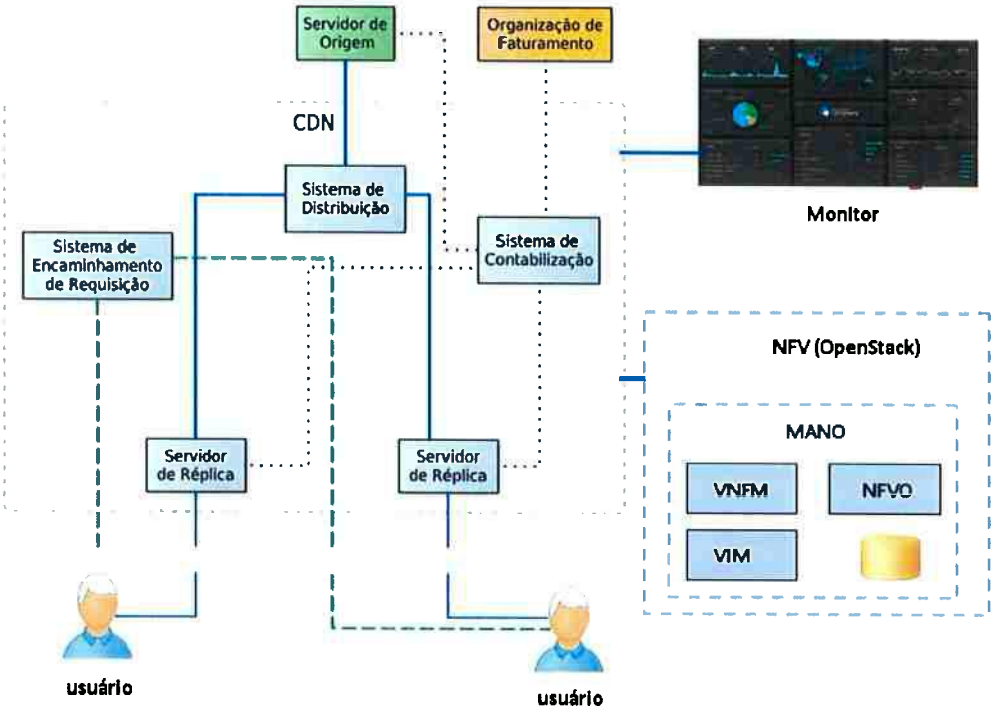
A principal plataforma de virtualização que fornece a possibilidade de gerenciamento dos recursos computacionais, armazenamento e rede é o *OpenStack* (KAVANAGH, 2015), um sistema de código aberto e gratuito, possibilitando o fornecimento da infraestrutura como um serviço, e sendo possível a sua interação através de um gerenciador Web, uma interface em linha de comando, ou através de uma API *Restful*. Essas características fornecem todos os requisitos necessários para a implantação de NFV (KAVANAGH, 2015). A proposta de integração entre NFV e *OpenStack* surgiu dentro da área de telecomunicações, onde existe uma presença de equipamentos proprietários que desempenham funções especificas dentro da infraestrutura da rede de telecomunicações. Com o conceito de NFV, todos esses equipamentos seriam substituídos por VNFs escaláveis, de baixo custo, e de fácil gerenciamento de disponibilidade e alocação, reduzindo custos e melhorando o funcionamento da infraestrutura como um todo. Através do *OpenStack* é possível criar a interface de virtualização com os equipamentos físicos e algumas funções do módulo de gerenciamento. O algoritmos proposto deve rodar no módulo VIM da MANO.

A figura 13 mostra um diagrama da arquitetura proposta para tornar a VDC elástica, através do uso da tecnologia NFV e *OpenStack*.

5.4 Considerações do Capítulo

Neste capítulo foi descrito um sistema VDN que está em operação na Universidade de São Paulo. É realizada também uma análise de estratégias de integração da VDN, com SDN e NFV. O objetivo principal desta proposta de integração é otimizar o uso dos recursos e, consequentemente, a diminuição de custo e ganhos nos procedimentos de manutenção, gerenciamento e operação.

Figura 13: Ambiente de proposto para a integração da infraestrutura da VDN com NFV baseado em OpenStack



Capítulo 6

Análise de Resultados

Neste capítulo são mostrados os dados obtidos nos testes executados tanto no ambiente elaborado quanto com simulação. Foram testadas as integração do sistema VDN com SDN, depois a integração do sistema VDN com SDN e NFV. E finalmente foram feitas simulação utilizando dados reais do sistema IPTV-USP com o algoritmo de alocação e desalocação de recursos proposto.

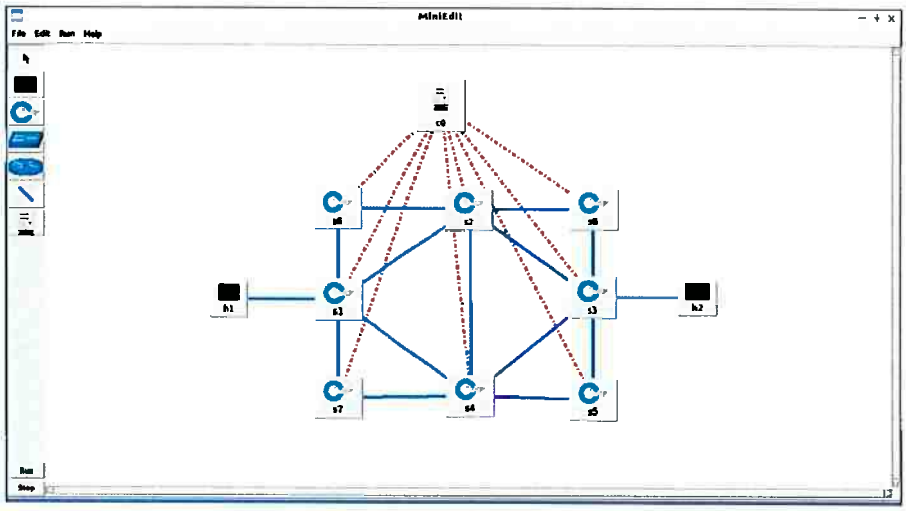
6.1 Testes da Integração da VDN e SDN

Os testes descritos a seguir têm como objetivo verificar a integração dos sistemas VDN e SDN através do ambiente de experimental descrito no capítulo anterior. O primeiro teste é relacionado registro dos elementos de rede no controlador SDN enquanto que o segundo é relacionado a criação de circuitos virtuais na topologia de rede estabelecida, com a aplicação de regras de encaminhamento nas tabelas de fluxo dos comutadores *OpenFlow*.

6.1.1 Validação da criação da Topologia Lógica SDN

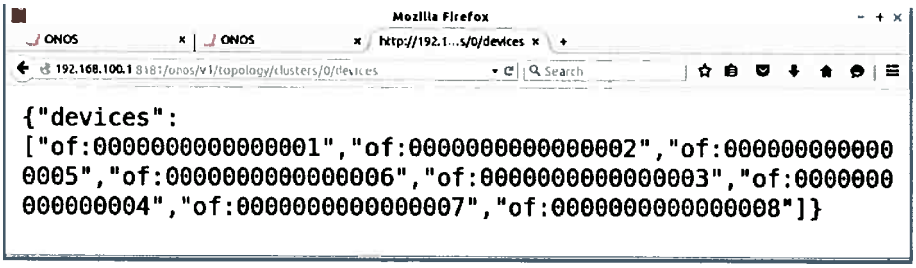
Para o teste da criação da topologia lógica SDN é inicializada a operação do controlador *OpenFlow* e verificada a topologia lógica formada, mostrada na figura 14, que captura a interface do *MiniEdit*, ferramenta do MiniNet. Na topologia C0 representa o controlador, h1 e h2, representa os hosts que terão o papel de transmissor e receptor, e Sn são os oito comutadores virtuais.

Figura 14: Topologia de teste da rede virtualizada



Uma das grandes vantagens do paradigma SDN é a possibilidade de se ter uma visão global da infraestrutura de rede. Através do protocolo de gerenciamento *OpenFlow*, os comutadores têm capacidade para se conectar ao controlador da rede. Este por sua vez, deve ser capaz de mapear os enlaces entre comutadores, estruturar estas informações e expô-las. Este experimento consiste na verificação das APIs especificadas pelo controlador SDN para fornecer as informações da topologia de rede. A Figura 15 apresenta o resultado da consulta realizada ao controlador para obter as informações de quais elementos compõem a rede, neste caso, apenas 8 comutadores *OpenFlow*.

Figura 15: Comutadores conectados ao controlador SDN



6.1.2 Validação da criação dos circuitos virtuais

A criação de um circuito virtual compreende a definição de um conjunto de regras de encaminhamento nos comutadores que fazem parte de uma rota fim-a-fim. Este experimento visa demonstrar como, uma vez obtidas as informações relacionadas com a topologia da rede, é possível, através das interfaces do controlador SDN, criar regras que definem uma rota fim-a-fim ou circuito virtual.

As Figuras 16 e 17 apresentam as informações coletadas de um dos comutadores, permitindo visualizar as regras que definem os circuitos virtuais e as respectivas estatísticas de tráfego. Na primeira figura, podem ser observadas nas duas últimas linhas, as informações referentes aos fluxos associados a comunicação entre os *hosts* 1 e 2.

Figura 16: Informações do comutador antes da transmissão

Flow ID	App ID	Group ID	Table ID	Priority	Timeout	Permanent	State	Packets	Bytes
Treatment Instructions: OUTPUT{port=CONTROLLER}									
7036876604407358	25	0	0	5	0	true	Added	0	0
Criteria: ETH_TYPE{ethType=806}									
Treatment Instructions: OUTPUT{port=CONTROLLER}									
7036876604407358	25	0	0	40000	0	true	Added	28	1176
Criteria: ETH_TYPE{ethType=806}									
Treatment Instructions: OUTPUT{port=CONTROLLER}									
7036876636087684	25	0	0	40000	0	true	Added	709	57429
Criteria: ETH_TYPE{ethType=88cc}									
Treatment Instructions: OUTPUT{port=CONTROLLER}									
7036876636201082	25	0	0	40000	0	true	Added	709	57429
Criteria: ETH_TYPE{ethType=8942}									
Treatment Instructions: OUTPUT{port=CONTROLLER}									
7599824419395736	27	0	0	100	0	true	Added	0	0
Criteria: IN_PORT{port=3}, ETH_DST{mac=46:3B:37:CA:3E:E2}, ETH_SRC{mac=4A:7D:0D:56:39:9B}									
Treatment Instructions: OUTPUT{port=1}									
7599824421240856	27	0	0	100	0	true	Added	0	0
Criteria: IN_PORT{port=1}, ETH_DST{mac=4A:7D:0D:56:39:9B}, ETH_SRC{mac=46:3B:37:CA:3E:E2}									
Treatment Instructions: OUTPUT{port=3}									

A figura 17 representa os dados obtidos após uma transmissão ICMP na qual nota-se como as estatísticas associadas ao fluxo refletem no encaminhamento dos pacotes.

Figura 17: Informações do comutador após da transmissão

Flow ID	App ID	Group ID	Table ID	Priority	Timeout	Permanent	State	Packets	Bytes
Treatment Instructions: OUTPUT{port=CONTROLLER}									
7036876604407358	25	0	0	5	0	true	Added	0	0
Criteria: ETH_TYPE{ethType=806}									
Treatment Instructions: OUTPUT{port=CONTROLLER}									
7036876604407358	25	0	0	40000	0	true	Added	16	672
Criteria: ETH_TYPE{ethType=806}									
Treatment Instructions: OUTPUT{port=CONTROLLER}									
7036876636087684	25	0	0	40000	0	true	Added	349	28269
Criteria: ETH_TYPE{ethType=88cc}									
Treatment Instructions: OUTPUT{port=CONTROLLER}									
7036876636201082	25	0	0	40000	0	true	Added	349	28269
Criteria: ETH_TYPE{ethType=8942}									
Treatment Instructions: OUTPUT{port=CONTROLLER}									
7599824420319257	27	0	0	100	0	true	Added	151	14798
Criteria: IN_PORT{port=3}, ETH_DST{mac=46:3B:37:CA:3E:E2}, ETH_SRC{mac=4A:7D:0D:56:39:9B}									
Treatment Instructions: OUTPUT{port=2}									
7599824421241817	27	0	0	100	0	true	Added	164	16072
Criteria: IN_PORT{port=2}, ETH_DST{mac=4A:7D:0D:56:39:9B}, ETH_SRC{mac=46:3B:37:CA:3E:E2}									
Treatment Instructions: OUTPUT{port=3}									

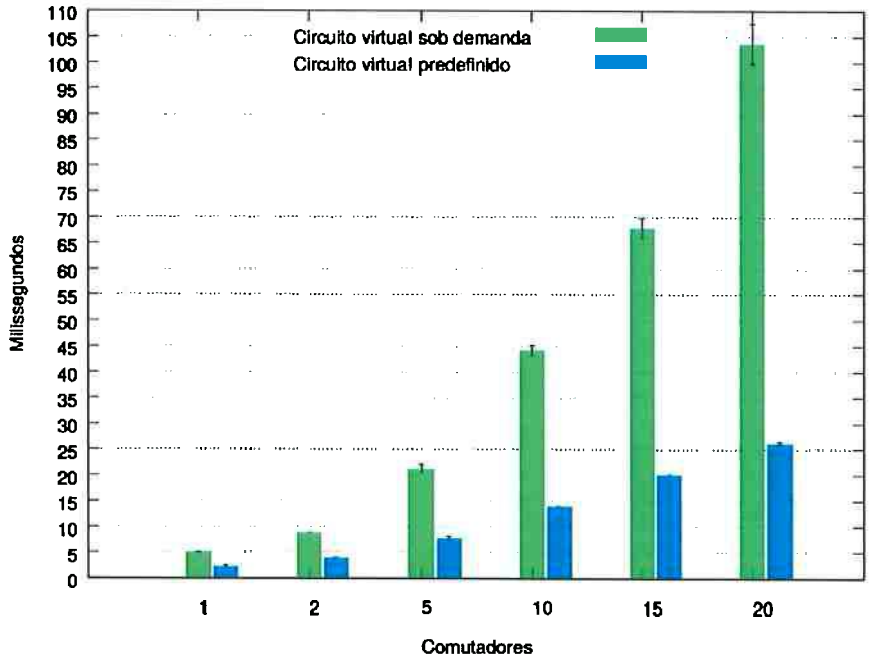
Apesar dos benefícios apresentados, existem certas limitações no uso desse ambiente que compreendem a limitação na elaboração de topologias muito complexas devido ao *hardware* limitado das máquinas, impossibilidade de realização de testes de desempenho devido a utilização da virtualização do ambiente, assim como a abstração da localização do controlador na infraestrutura de rede, abstraindo a propagação do fluxo de controle dentro da topologia, portanto, impedindo análises precisas de desempenho dos fluxos que trafegam na topologia SDN. Uma vez testada a funcionalidade para a criação de circuitos virtuais, o próximo passo é avaliar o desempenho da criação deste circuito virtual comparando os dois modos de operação do *OpenFlow*: o reativo e o proativo.

No modo reativo o comutador envia o primeiro pacote do fluxo de dados para o controlador, isto é, quando ainda não existe regra definida para esse fluxo. Em contrapartida, no modo proativo, as regras são definidas no comutador antes do início de cada transmissão.

Para a realização destes testes foram configurados os parâmetros de rede de modo a refletir as condições de uma rede física real, isto é, definindo um atraso nos enlaces de rede semelhantes aos experimentados em uma rede local. Detalhes da configuração encontram-se no Anexo A.

Foram conectados na rede emulada dois *hosts* físicos com taxa de transmissão de 100Mbps. Um deles com a função de servidor e o outro de cliente. A figura 18 mostra os tempos médios de 10 transmissões de um arquivo de 1080 *bytes,* emulando a transmissão de um vídeo. É possível observar que a predefinição do circuito virtual traz benefícios em termos de tempo de transmissão.

Figura 18: Tempo de uma transmissão HTTP com a criação do circuito virtual sob demanda ou circuito virtual predefinido



Este resultado é esperado visto que o modo de operação proativo elimina as mensagens trocadas entre o controlador e cada um dos comutadores da rede para a definição das regras de encaminhamento. Além disso, o tempo de processamento do controlador utilizado em cada fluxo também é eliminado.

Por outro lado, o modo proativo pode impactar negativamente a desempenho do comutador no caso da definição de um grande número de regras, pois forçaria o comutador a verificar uma grande quantidade de regras para assim definir uma ação a ser tomada para cada fluxo (BIANCO *et al.*, 2010). Consequentemente, os comutadores precisariam de bancos de memória de grande capacidade para armazenar a grande quantidade de regras.

6.2 Integração do ambiente VDN-SDN com NFV

Para a validação do algoritmo proposto foram feitas medidas em ambiente virtualizado e simulação em software utilizando os dados reais, obtidos através da monitoração do serviço IPTV-USP.

O primeiro passo para viabilizar os testes do algoritmo é estimar o tempo de subida de um recurso utilizando-se mecanismo de virtualização do serviço. Para tanto foi instalado o *OpenStack* que atuou como os componentes da NFV.

A integração da VDN com o módulo NFV foi feito utilizando-se de um *OpenVSwitch* com suporte nativo a tecnologia *OpenFlow*. Foram criados modelos para um servidor Linux e do servidor de Réplica, que compõe o ambiente VDN. O servidor de Réplica é baseado no servidor Linux, então para sua instalação é necessário instalador o Linux e em seguida instalar o *software* que implementa as funcionalidades de réplica propriamente dito. Tais modelos foram armazenados na base de dados. O *OpenStack* foi instalado em máquinas virtuais e utilizado para criar as funcionalidades dos módulos NFV. As configurações das máquinas utilizadas encontram-se no Anexo A.

A função de criação de um novo recurso foi acionado no *OpenFlow* para a realização de medidas de tempo de subida do serviço de Réplica. Os dados obtidos são mostrados na tabela 1.

Tabela 1: Tempo médio de criação da VNF

VNF	Tempo Médio (s)	Desvio Padrão
Servidor Linux	11,63	± 0,1
Servidor de Réplica	04,50	± 0,1

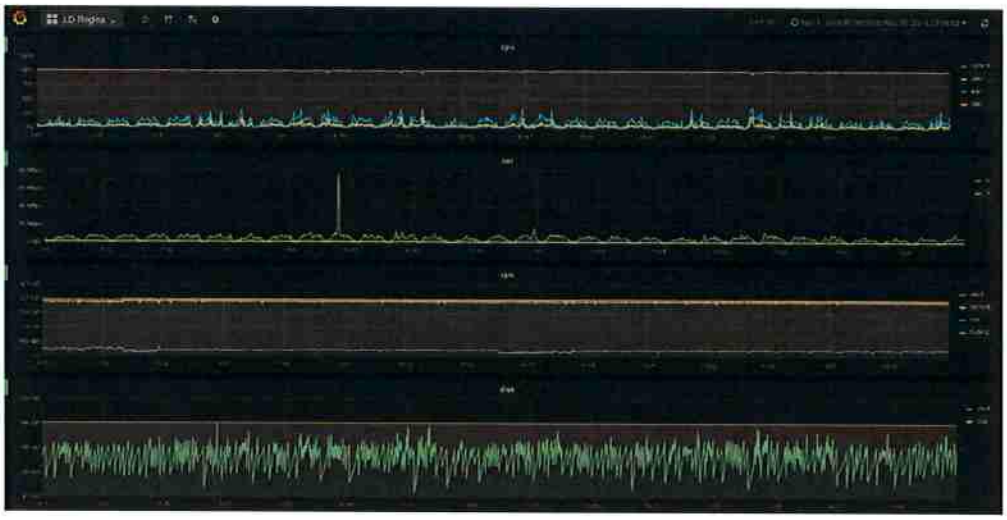
Portanto, o tempo para a instanciação de um novo recurso de para o Servidor de Réplica é de no máximo 16,15 segundos considerando o desvio padrão. Caso o recurso virtualizado possa ser somente expandido, na máquina virtual já em uso, esse tempo deverá ser bem menor. Estas medidas, além da verificação da possibilidade de integração, serviram para estimar o tempo de alocação do recurso (Θ_{aloc}), que será utilizado para a validação do algoritmo de

alocação e desalocação de recursos. Para ter um tempo de guarda, na simulação foi utilizado $\Theta_{aloc} = 20$ segundos.

6.3 Teste de Validação do Algoritmo de Alocação e Desalocação

Para a validação do algoritmo proposto foi utilizado um simulador matemático **R**[22], utilizando como dados de entrada o consumo em função do tempo de um servidor de réplica do sistema IPTV-USP. Os dados monitorados são consumo da CPU, interface de rede, disco rígido e memória em função do tempo. O código utilizado no simulador pode é mostrado no Anexo B.

Figura 19: Dados de monitoração do sistema IPTV-USP, mostrando curvas de consumo de CPU, interface de rede, memória e disco



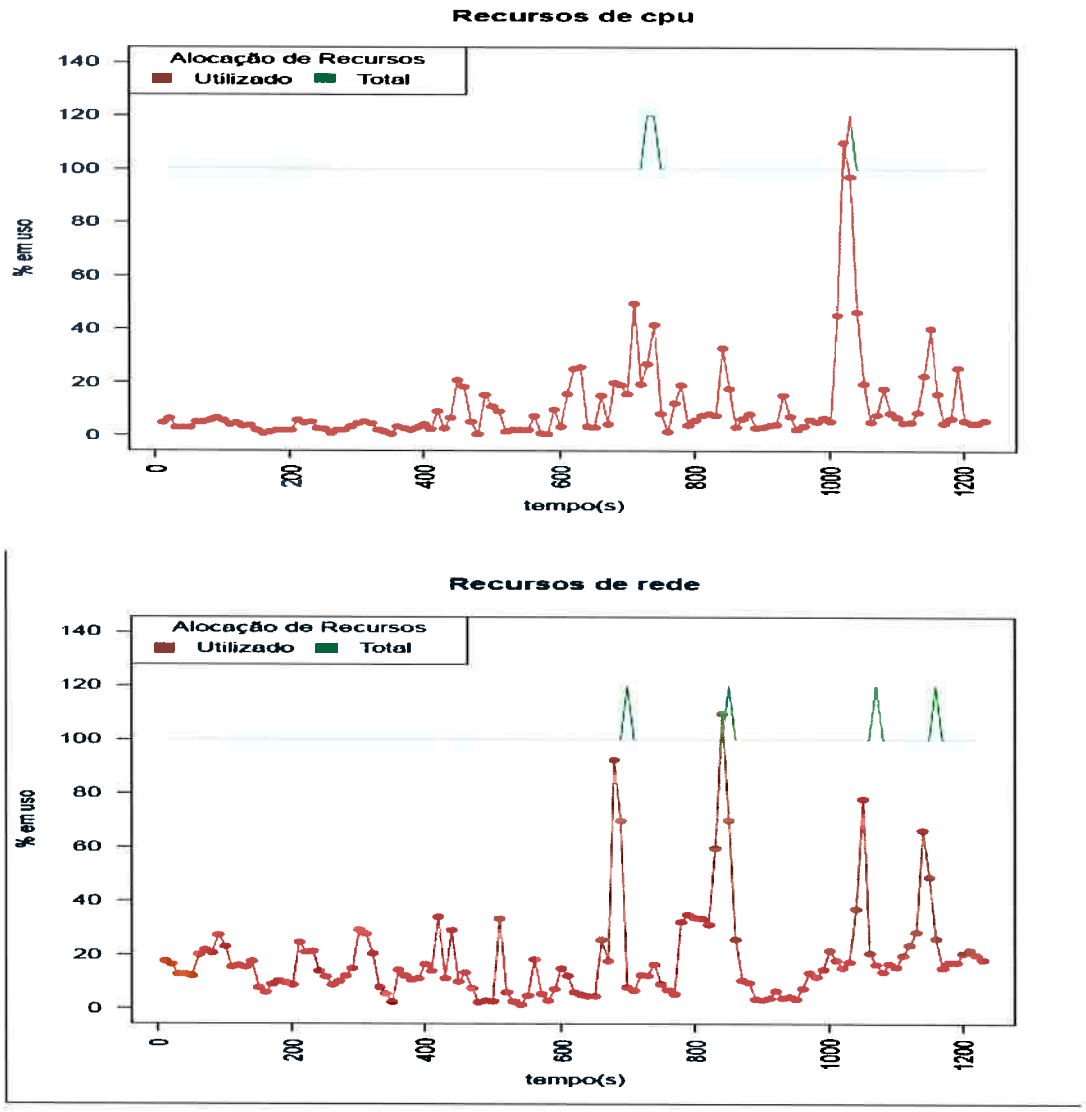
Utilizando estes dados foi possível rodar o algoritmo e verificar seu funcionamento.

A figura 19 mostra um exemplo destes dados para um período de um mês de utilização do sistema. Na figura pode-se observar a curva de consumo de memória RAM, esta não foi considerada na simulação, já que seu consumo se mantém constante ao longo do tempo. O sistema de monitoração utilizado colhe amostras a cada 10 segundos.

[22] R é um projeto GNU que é composto por uma linguagem e um conjunto software para manipulação de dados, cálculos e geração de gráficos. https://www.r-project.org/

A figura 20 mostra a curva de entrada, com o consumo de recurso (linha em vermelho) e o recurso total disponível (linha em verde) para a CPU e a interface de rede para um período de 20 minutos. Nestas simulações foi usado como artifício a normalização dos recursos totais existentes a fim de verificar a necessidade de recursos adicionais.

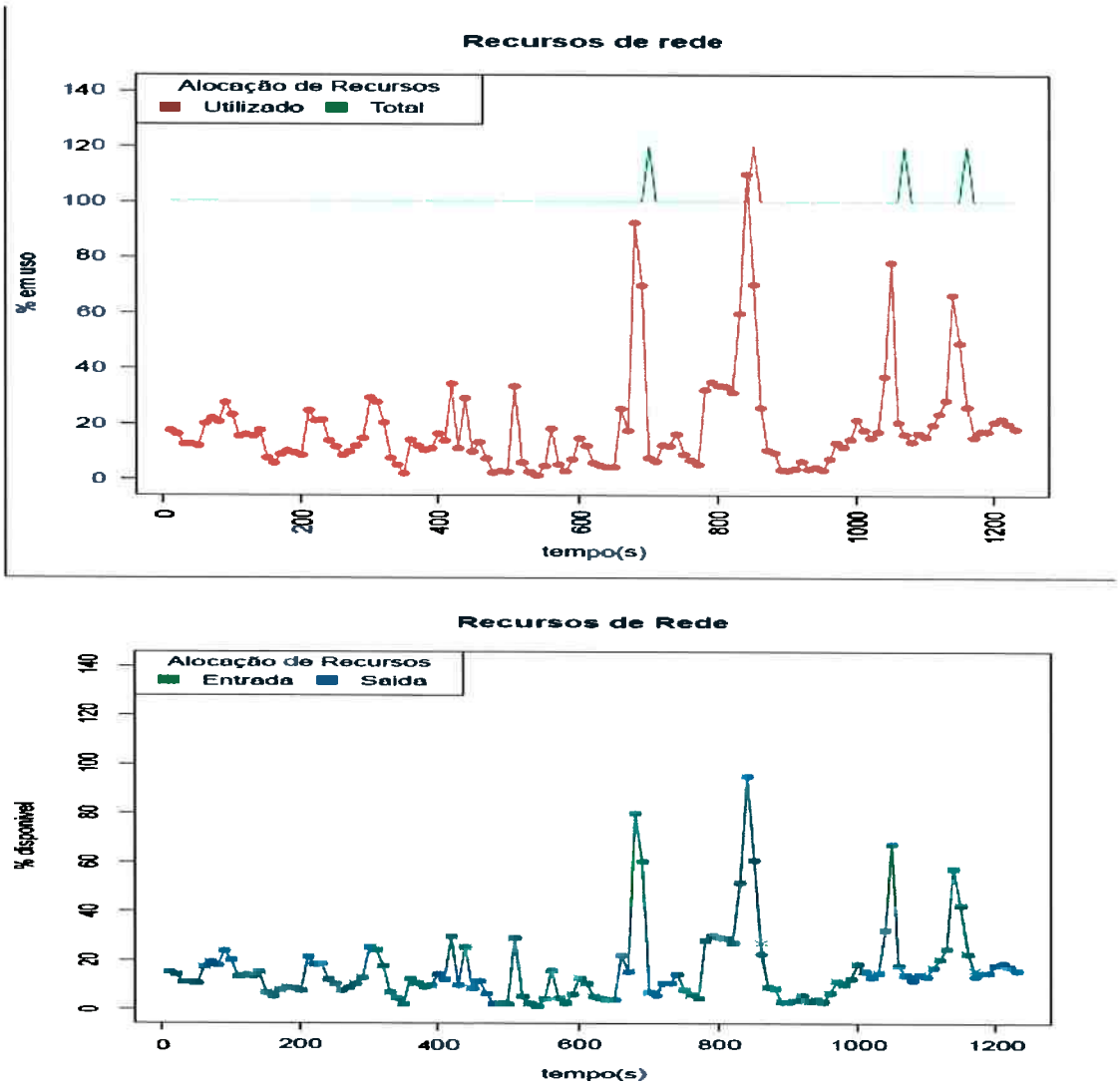
Figura 20: Gráficos do recurso consumido e recurso alocado para CPU e interface de rede



Tanto no gráfico de CPU como no gráfico de rede da figura 20 é possível observar a alocação de mais recurso devido ao aumento de consumo, e em seguida a desalocação do mesmo. Para a CPU houveram duas alocações, sendo que só uma delas foi realmente utilizada. A primeira alocação observa-

se que o recurso não foi desalocado imediatamente, representando um segundo aumento de consumo de recurso em seguida. No comportamento da rede houveram quatro alocações de recursos adicionais, sendo que uma delas foi realmente necessária. As alocações adicionais foram feitas com base na taxa do aumento do consumo.

Figura 21: Gráfico do recurso consumido e recurso alocado para interface de rede

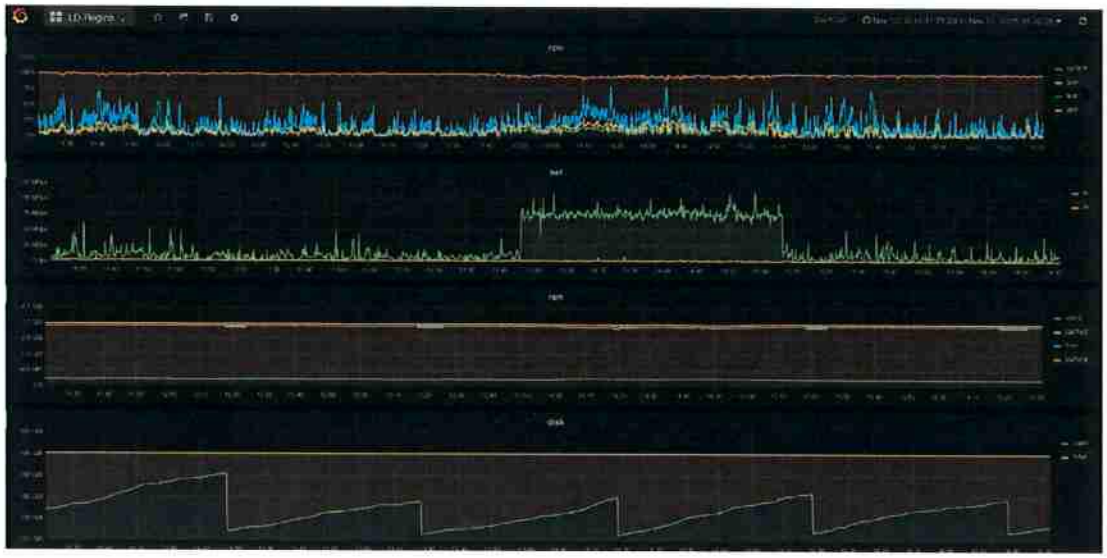


A figura 21 mostra o mesmo gráfico de consumo de rede, agora acompanhado do gráfico de recurso consumido (linha verde), que é a entrada do simulador, e de recurso alocado (linha azul), que é a saída do simulador. Os

pontos coincidentes do gráfico indicam que não houve alocação de recurso adicional, enquanto que os pontos não coincidentes indicam alocação de recurso.

Nos dados monitorados observa-se um aumento abrupto da taxa de consumo de rede e CPU no dia 10 de novembro de 2015, entre as 13hs46m e as 15hs06m. Este evento coincide com a transmissão ao vivo da reunião do Conselho Universitário (CO) da Universidade de São Paulo. Tratava-se de uma reunião de grande interesse da comunidade uspiana, tendo portanto um grande número de acessos. Na figura 22 é possível observar este evento.

Figura 22: Perfil de consumo de recursos em uma transmissão ao vivo



Ao utilizarmos este período como dados de entrada para o algoritmo de alocação e desalocação de recursos podemos observar para a CPU várias alocações adicionais, sendo que uma delas acontece duplamente (em torno do ponto em 6000 segundos) quando ocorreu um aumento mais rápido da taxa de consumo.

Para o caso do consumo de recursos de rede para este mesmo período, mostrado na figura 23, observa-se diversas realocações com imediata desalocação. A rápida desalocação caracteriza a dinâmica flutuante da rede, com picos rápidos. No caso da interface de rede isso pode ser interpretado devido a conexões e desconexões dos usuários ou a variação do fluxo de

vídeo comprimido com codificador H.264, que apresenta flutuações com quadros de maior ou menor atividade de cena.

Figura 23: Simulação da alocação de CPU durante transmissão ao vivo

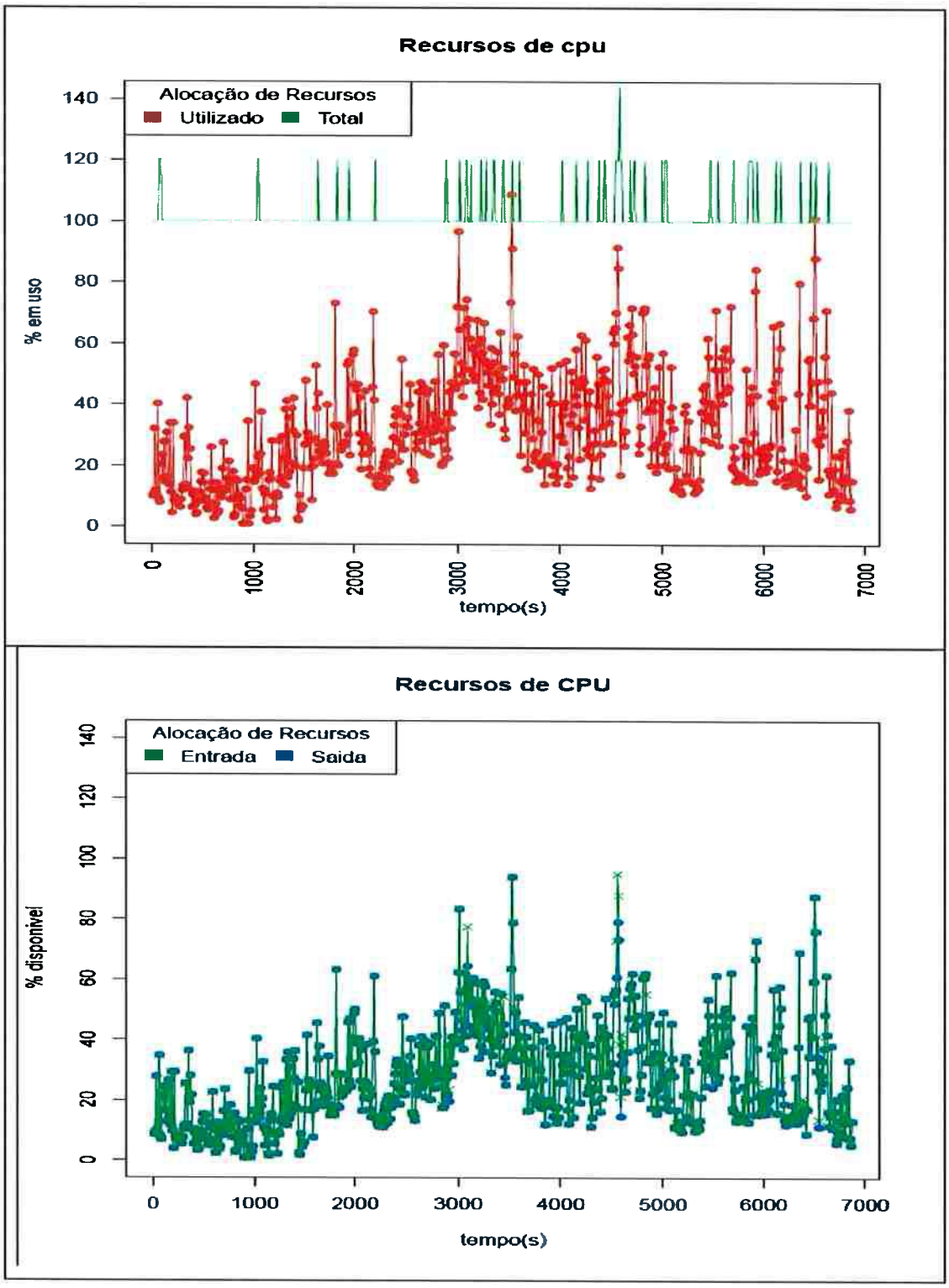
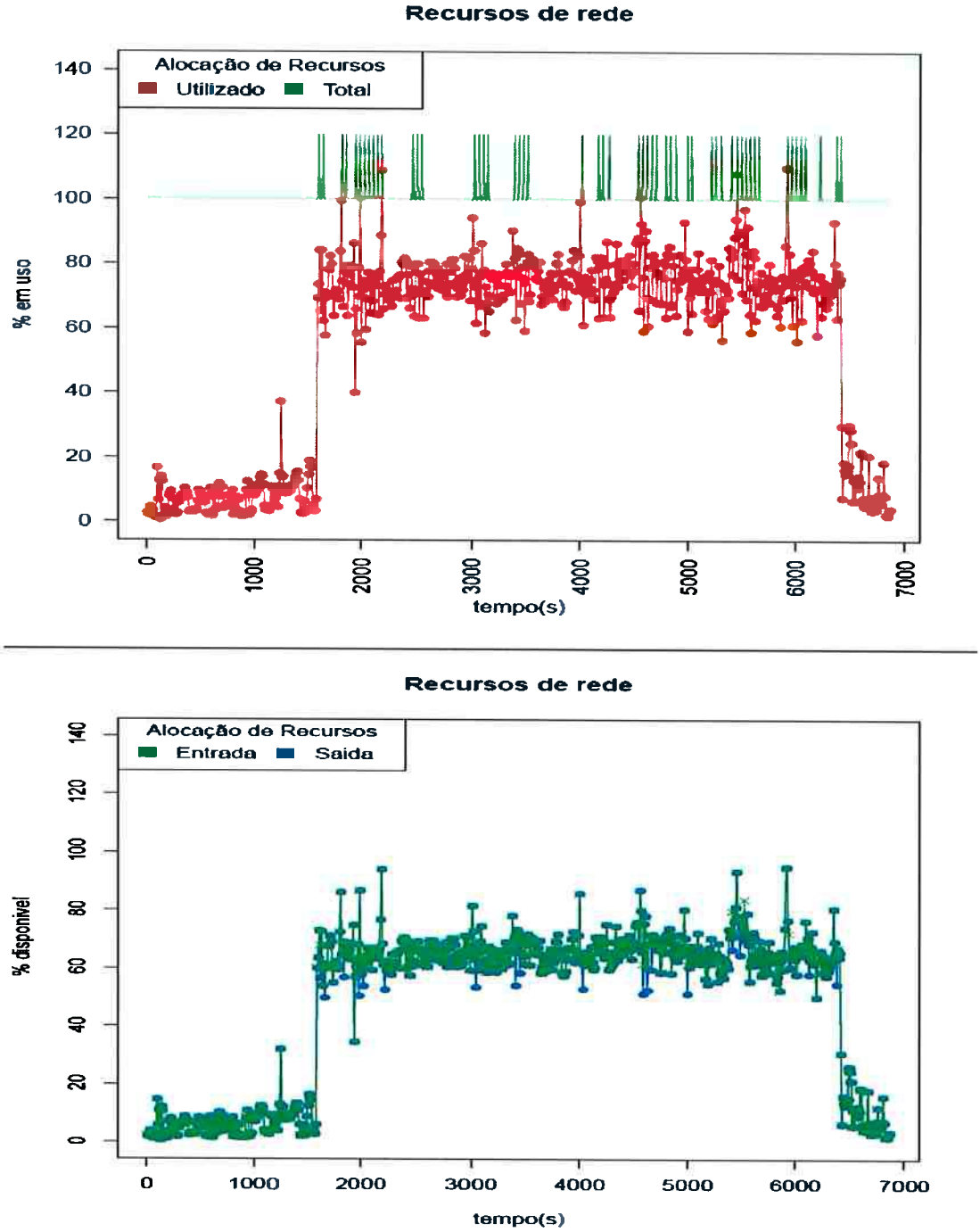


Figura 24: Simulação da alocação de interface de rede durante transmissão ao vivo



6.4 Considerações do Capítulo

As atividades experimentais aqui descritas demonstraram a viabilidade da integração de diferentes tecnologias com um sistema de distribuição de vídeo. No entanto, tal integração pode impor diversas limitações devido aos recursos disponíveis, que devem ser superadas em integrações de sistemas reais.

Os resultados obtidos com a utilização de um simulador para testar o algoritmo de alocação e desalocação proposto demonstraram sua eficiência. Os dados de entrada do simulador, provenientes do sistema de monitoração do IPTV-USP, mostram o consumo a cada 10 segundos. Informações de consumo amostrados com uma periodicidade menor mostraria melhor desempenho do algoritmo, que seria mais ágil na ocorrência de oscilação de freqüências pequenas.

Dos recursos monitorados não foram considerados no estudo os dados de memória por ser praticamente constante e de consumo de recurso de disco rígido, que apresentava um comportamento em degrau devido ao procedimento de limpeza periódica do cachê.

Capítulo 7

Conclusões e Considerações Finais

O uso da Internet mudou significativamente nos últimos anos, com um número cada vez maior de usuários conectados, muitas vezes 24 horas por dia, utilizando diferentes dispositivos e a oferta de novos serviços. Podemos disser que a Internet é um sucesso na sociedade atual. No entanto, a arquitetura da Internet está passando por um processo de questionamento, onde há adeptos da pesquisa evolutiva e enquanto outros defendem o desenvolvimento de uma nova arquitetura (*clean-slate*), que consiga atender os requisitos atuais.

Em termos de evolução, a distribuição de vídeo na Internet teve um desenvolvimento particular com o objetivo de atender a requisitos que são bastante específicos. Esta tese mapeou tal evolução que começou na década de 90 e envolveu um esforço considerável para o desenvolvimento de tecnologias, mecanismos e protocolos que permitissem fazer a entrega de fluxos contínuos atendendo as expectativas de qualidade do usuário. Os conceitos de qualidade de serviço e de experiência passaram a ser a referência para a implantação de serviços de transmissão de áudio e vídeo.

Depois de tantas mudanças nesta área finalmente foi possível encontrar uma maneira mais simples de implementar as aplicações de vídeo, utilizando os protocolos HTTP/TCP/IP, trazendo maior uniformidade para a camada de aplicação. Mas esta simplificação tem um custo, já que é necessário uma rede com mais recursos para atender os requisitos da aplicação e as expectativas dos usuários. Esta necessidade associada ao intenso uso da rede deram origem as redes de distribuição de conteúdo.

Atualmente existem muitas empresas no mercado que prestam serviço de entrega de conteúdo utilizando este tipo de infraestrutura. A líder no mercado é a Akamai, empresa americana que atualmente conta com mais de 61 mil servidores espalhados em mais de 70 países. Atualmente cerca de 35% do tráfego da Internet utiliza o serviço da Akamai. A estratégia inicial da empresa foi o modelo "enter deep", colocando cluster de servidores de acesso dentro das redes de acesso dos ISPs por todo o mundo, em mais de 1700 locais, com o objetivo de conseguir proximidade com o usuário final, e consequentemente acesso mais eficiente, com melhoria no atraso e na taxa de transferência. Outras empresas importantes nesta área são a LimeLight Networks, a Level3, a Amazon e a Google, todas americanas. Estas cinco empresas hoje entregam para o usuário final cerca de 93% do tráfego total da Internet. Os 7% restantes, grande parte são distribuídas por centenas de outras pequenas empresas de entrega ou aceleração de conteúdo, e uma pequena parcela não utiliza serviço de entrega de conteúdo.

Este panorama nos mostra que a rede pública já não é mais tão pública assim, pois basicamente cinco empresas intermediam a entrega de praticamente todas as informações requisitadas ou trocadas por seus usuários.

O modelo comercial de entrega de conteúdo começou com acordos de parceria para a alocação de servidores na infraestrutura de ISPs. Mas, com o tempo, os ISPs perceberam que, apesar de sua infraestrutura estar sendo utilizada, eles tinham ficado fora deste mercado. Os ISPs tem dificuldade de prestar serviço de entrega devido a sua característica de empresa local ou regional, e não global. Por este motivo estão se formando os consórcios de ISPs para a operação de CDNs Federadas, que consigam fazem um atendimento mais amplo, em escala global. Este contexto tem tornado o mercado mais competitivo e em busca de soluções que aumentem a eficiência dos recursos.

O uso de virtualização tem demonstrado ser uma opção atraente para a flexibilização dos recursos, a melhoria do gerenciamento e operação de uma infraestrutura de rede e serviços. Desta forma, as tecnologias SDN e NFV integradas as redes de distribuição de conteúdos trarão benefícios aos serviços

oferecidos, e devem diminuir significativamente os custos tanto de infraestrutura como de operação.

Esta tese fez uma análise das possibilidades de integração destas tecnologias, e a partir de um ambiente experimental, demonstrando a viabilidade técnica da operação de um sistema de distribuição de vídeo com elementos de rede e do serviço de réplica virtualizado utilizando SDN e NFV.

Além disso, o trabalho propôs um algoritmo dinâmico de alocação e desalocação de recursos, e através de simulação foi demonstrado que atende as premissas iniciais. O diferencial deste algoritmo é levar em consideração a taxa de consumo de recursos para fazer uma nova alocação, apresentando assim limiar deslizante. Desta forma é possível criar um serviço de VDN elástica baseada em NFV.

Trabalhos futuros devem explorar a maior acoplamento da integração entre as camadas de virtualização e os módulos de gerenciamento e orquestração dos recursos, inserindo o algoritmo no módulo de gerenciamento da infraestrutura virtualizada (VIM), o que possibilitara fazer novos experimentos. A comunicação entre os módulos é um ponto relevante para o bom funcionamento do sistema. O uso do protocolo ALTO (*Application Layer Traffic Optimization*) (IETF, 2008)(Gurbani *et al.*, 2009) deve trazer benefícios nesta comunicação e deverá ser explorado. Além disso espera-se melhorar o aparato experimental, aumentando os recursos empregados através de uma proposta de projeto FAPESP para subsidiar a continuação das pesquisas. Diminuir os fatores limitantes, como a granularidade da monitoração, e utilizar outros métodos para observar a dinâmica de consumo dos recursos, como levantamentos estatísticos ou históricos do comportamento.

Referências

ADITYA, P. et al. Reliable client accounting for P2P-infrastructure hybrids. NSDI'12: Proceedings of the 9th USENIX conference on Networked Systems Design and Implementation, 2012.

ADLER, S. The Slashdot effect: an analysis of three Internet publications. *Linux Gazette Issue*, 1999.

AGGARWAL, V.; FELDMANN, A.; SCHEIDELER, C. *Can ISPS and P2P users cooperate for improved performance?* 2007. 29 p.

ARLITT, M.; JIN, T. A workload characterization study of the 1998 World Cup Web site. *IEEE Network*, v. 14, 2000. ISSN 0890-8044.

ATM Forum, Technical Committee, Audiovisual Multimedia Services: Video on Demand, Specification 1 .O, Dec. 1995.

Balachandran, Athula, et al. "Analyzing the potential benefits of cdn augmentation strategies for internet video workloads." Proceedings of the 2013 conference on Internet measurement conference. ACM, 2013.

Bhaumik, P; S. Zhang, P. Chowdhury, S-S. Lee, J.H. Lee, B. Mukherjee; "Software-defined Optical Networks: A survey". Photon Network Communication, 28, pg. 4-18, 2014.

BIANCO, A. et al. OpenFlow Switching: Data Plane Performance. In: 2010 IEEE International Conference on Communications. IEEE, 2010. p. 1–5. ISBN 978-1-4244-6402-9. ISSN 1550-3607. Disponível em: http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5502016.

Black, Uyless D. MPLS and label switching networks. Prentice Hall PTR, 2002.

Black, Uyless. Optical networks: third generation transport systems. Pearson Education India, 2002.

Boas, Laio B. Vilas, et al. "Performance evaluation of QoS in wireless networks using IEEE 802.11 e." SBrT 2012.

CASADO, M. et al. Fabric: a retrospective on evolving SDN. Hot Topics in Software Defined Networking (HotSDN), p. 85–89, 2012.

CASTRO, M. et al. Scribe: a large-scale and decentralized application-level multicast infrastructure. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, v. 20, n. 8, p. 1489–1499, 2002.

CHAWATHE, Y. Scattercast: an adaptable broadcast distribution framework. IEEE Multimedia Systems, Springer, v. 9, n. 1, p. 104–118, 2003.

CHAWATHE, Y.; MCCANNE, S.; BREWER, E. A. RMX: Reliable multicast for heterogeneous networks. In: IEEE. IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM'00). Tel Aviv, Israel, 2000. p. 795–804.

Cheng, RG. and Chang, C.J. "Neural-network Connechon-admission Control for ATM Networks", IEE Proc. Commun., vol. 144, no 2, April 1997.

Chigami, Lucas, et al. "GT-IMAV: Ferramentas para instrumentação e monitoração de aplicações de vídeo." Salão de Ferramentas, WebMedia 2014, João Pessoa, PB.

CHU, Y.-H.; RAO, S. G.; ZHANG, H. A case for end system multicast. In: ACM. ACM SIGMETRICS 2000. Santa Clara, CA, 2000. p. 1–12.

Clayman, Stuart, et al. "The dynamic placement of virtual network functions."Network Operations and Management Symposium (NOMS), 2014 IEEE. IEEE, 2014.

Costa, L.H.; Duarte, O.C.M.B; Roteamento Multicast na Internet. XXI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, maio de 2002, Natal, RN.

Cugini, Filippo, et al. "Enhancing GMPLS signaling protocol for encompassing quality of transmission (QoT) in all-optical networks." *Journal of Lightwave Technology* 26.19 (2008): 3318-3328.

DHUNGEL, P. et al. Xunlei: Peer-assisted download acceleration on a massive scale. Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), v. 7192 LNCS, p. 231–241, 2012. ISSN 03029743.

Dustdar, Schahram, et al. "Principles of elastic processes." IEEE Internet Computing 5 (2011): 66-71.

Egilmez, H. E., Gorkemli, B., Tekalp, A. M., and Civanlar, S. (2011). Scalable video streaming over OpenFlow networks: An optimization framework for QoS routing. 2011 18th IEEE International Conference on Image Processing, pages 2241–2244.

Egilmez, H. and Dane, S. (2012). OpenQoS: An OpenFlow controller design for multimedia delivery with end-to-end Quality of Service over Software-Defined Networks. Signal & Information, pages 1–8.

Elefthenadis, A. and Anastassiou, D. "Constrained and General Dynamic Rate Shaping of Compressed Digital Video", Proceedings of 2" IEEE International Conference on Image Processing (ICIP'95), Arlington, Virginia, October 1995.

EL-SAYED, A. Application-Level Multicast Transmission Techniques Over The Internet. Tese (Doutorado)—INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE, 2004.

Erik Nygren, Ramesh K. Sitaraman and Jennifer Sun; "The Akamai Network: A Platform for High-Performance Internet Applications". ACM SIGOPS Operating Systems Review, Volume 44, Issue 3, July 2010, pg. 2-19, New York, USA. Doi <10.1145/1842733.1842736>

ETSI NFV ISG; Network Functions Virtualization – An Introduction, Benefits, enablers, Challenges & Call for Action". SDN & OpenFlow World Congress, Dusseldorf, Germany, Out. 2012.

ETSI NFV ISG; Network Functions Virtualization – Infrastructure Overview. White Paper, ETSI GS NFV-INF 001, Jan. 2015.

ETSI NFV ISG; Network Functions Virtualization – Network Operator Perspectives on Industry Progress. SDN & OpenFlow World Congress, Dusseldorf, Germany, Out. 2014.

ETSI GS NFV-MAN 001; Network Functions Virtualization – Management & Orchestration, 2014. https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/NFV-MAN/001_099/001/01.01.01_60/gs_NFV-MAN001v010101p.pdf

ETSI NFV ISG; Network Functions Virtualization (NFV) – Use Cases. White Paper, ETSI GS NFV 001, Out. 2013.

FRANCIS, P. Yoid: Extending the Multicast Internet Architecture. 2007. Disponível em: <http://www.aciri.org/yoid/>.

Frank, Benjamin, et al. "Collaboration opportunities for content delivery and network infrastructures." Recent Advances in Networking (2013): 305-377.

Fluckiger, F.; "Understanding Networked Multimedia - Application and Technology", Printece Hall, 1995.

Ghareeb, Majd, Cesar Viho, and Adlen Ksentini. "An adaptive mechanism for multipath video streaming over video distribution network (vdn)." *Advances in Multimedia, 2009. MMEDIA'09. First International Conference on.* IEEE, 2009.

Ghareeb, Majd, Cesar Viho, and Adlen Ksentini. "An adaptive mechanism for multipath video streaming over video distribution network (vdn)." *Advances in Multimedia, 2009. MMEDIA'09. First International Conference on.* IEEE, 2009.

Gerstel, Ori, et al. "Elastic optical networking: A new dawn for the optical layer?." Communications Magazine, IEEE 50.2 (2012): s12-s20.

Giotis, K. et al., "Policy-based Orchestration of NFV Services in Software-Defined Networks". 1st. IEEE Conference on Network Softwarization, 2015.

GURBANI, V. K. et al. A survey of research on the application-layer traffic optimization problem and the need for layer cooperation - [Accepted from Open Call]. IEEE Communications Magazine, v. 47, n. August, p. 107–112, 2009. ISSN 01636804.

Haßlinger, Gerhard, and Franz Hartleb. "Content delivery and caching from a network provider's perspective." *Computer Networks* 55.18 (2011): 3991-4006.

Hauben, Michael. "History of ARPANET - Behind the Net - The untold history of the ARPANET " Retrieved 23 (2010): 13. http://pages.infinit.net/jbcoco/Arpa-Arpanet-Internet.pdf

HUA, K.; TRAN, D. A.; VILLAFANE, R. Overlay multicast for video on demand on the internet. ACM Symposium on Applied Computing, v. 784, 2003.

IETF. IETF ALTO WG Charter. 2008. Disponível em: http://datatracker.ietf.org/wg/alto/charter/.

Jain, Raj, and Sudipta Paul. "Network virtualization and software defined networking for cloud computing: a survey." Communications Magazine, IEEE51.11 (2013): 24-31.

JANNOTTI, J. et al. Overcast: Reliable multicasting with an overlay network. In: Proc. 4th USENIX Symp. Operating Systems Design and Implementation (OSDI). [S.l.: s.n.], 2000. p. 197–212.

Kadlic, Radovan, Juraj Blichar, and Pavol Podhradsky. "New trends in content delivery networks." Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP), 2014 International Conference on. IEEE, 2014.

Kavanagh, A.; "OpenStack as the API framework for NFV: the benefits, and the extensions needed". Ericsson Review, April, 2015.

Kreutz, Diego, et al. "Software-defined networking: A comprehensive survey". *Proceedings of the IEEE* 103.1 (2015): 14-76.

KUROSE, J. F.; ROSS, K. Computer Networking: A Top-Down Approach Featuring the Internet. 6th. ed. [S.l.]: Pearson, 2012. ISBN 978-0132856201.

Kurose, Jim. "Open issues and challenges in providing quality of service guarantees in high-speed networks." *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* 23.1 (1993): 6-15.

Lantz, Bob, Brandon Heller, and Nick McKeown. "A network in a laptop: rapid prototyping for software-defined networks." Proceedings of the 9th ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Networks. ACM, 2010.

LAO, L. et al. A scalable overlay multicast architecture for large-scale applications. IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst., v. 18, n. 4, 2007.

Leavitt, Neal. "Network-usage changes push Internet traffic to the edge."*Computer* 10 (2010): 13-15.

Lee, Byung Yun, and Bhum Cheol Lee. "Analysis the architecture of VNFM (Virtual network function manager)." Advanced Communication Technology (ICACT), 2015 17th International Conference on. IEEE, 2015.

Leung, K.; Y. Lee, E. *Content Distribution Network Interconnection (CDNI) Requirements*. [S.l.], 2014. 1–23 p.

Li, Yangyang, et al. "Application Utility-Based Bandwidth Allocation Scheme for Data Center Networks." Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies (PDCAT), 2012 13th International Conference on. IEEE, 2012.

Lin, CC-F; M-C. Leu; C-W. Chang; S-M. Yuan; "The Study and Methods for Cloud based CDN". In: Proceedings of 2011 International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery (CyberC'2011), pg. 469-475, Beijing, China.

Lin; Y-D, et al., "An Extended SDN architecture for Network Function Virtualization with a Case Study on Instrusion Prevention". IEEE Network, Issue 9, May-June 2015.

Mangili, M. et al., "Concise Paper: Stochastic Planning for Content Delivery: Unveiling the Benefits of Network Functions Virtualization". 2014 IEEE 22nd International Conference on Network Protocols. DOI 10.1109/ICNP.2014.56

Mark M.Clougherty; Christopher A.White; Harish Viswanathan; Colin L.Kahn; Corporate CTO, Alcatel-Lucent;Bell Labs, Alcatel-Lucent; "Role of SDN in IP Network Evolution" [J];Telecommunications Science;2014-05

MCKEOWN, N. et al. Openflow: enabling innovation in campus networks. SIGCOMM Comput. Commun. Rev., ACM, New York, NY, USA, v. 38, n. 2, p. 69–74, mar. 2008. ISSN 0146-4833. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/1355734.1355746>.

Mijumbi, R., Serrat, J., Gorricho, J. L., Latré, S., Charalambides, M., & Lopez, D. "Management and orchestration challenges in network function virtualization." IEEE Communications Magazine, 2015. (aceito para publicação)

Mijumbi, Rashid, et al. "Design and evaluation of algorithms for mapping and scheduling of virtual network functions." Network Softwarization (NetSoft), 2015 1st IEEE Conference on. IEEE, 2015.

Mijumbi, Rashid, et al. "Network function virtualization: State-of-the-art and research challenges." IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015. DOI: 10.1109/COMST.2015.2477041.

Mok, Ricky KP, Edmond WW Chan, and Rocky KC Chang. "Measuring the quality of experience of HTTP video streaming." *Integrated Network Management (IM), 2011 IFIP/IEEE International Symposium on.* IEEE, 2011.

Munõz, R. et al., "SDN/NFV orquestration for dynamic deployment of virtual SDN controllers as VNF for multi-tenant optical networks". Optical Fiber Communication Conference, 2015.

Nam, Hyunwoo, et al. "Towards QoE-aware video streaming using SDN."*Global Communications Conference (GLOBECOM), 2014 IEEE.* IEEE, 2014.

Namiki, Shu, et al. "Ultrahigh-definition video transmission and extremely green optical networks for future." *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of* 17.2 (2011): 446-457.

Newman, Peter, Tom Lyon, and Greg Minshall. "Flow labelled IP: A connectionless approach to ATM." *INFOCOM'96. Fifteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer Societies. Networking the Next Generation. Proceedings IEEE.* Vol. 3. IEEE, 1996.

Nunes, Bruno AA, et al. "A survey of software-defined networking: Past, present, and future of programmable networks." *Communications Surveys & Tutorials, IEEE* 16.3 (2014): 1617-1634.

Orzessek, M., P. Sommer, "ATM & MPEG-2: integrating digital video into broadband networks", Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1998
Owens II, H. and Durresi, A. (2013). Video over Software-Defined Networking (VSDN). In 2013 16th International Conference on Network-Based Information Systems, pages 44–51. IEEE.

PENDARAKIS, D. et al. ALMI: An application level multicast infrastructure. In: Proceedings of the 3rd USENIX Symposium on Internet Technologies and Systems (USITS). [S.l.: s.n.], 2001. p. 49–60.

Pimentel, Hélcio M., et al. "OCP: A protocol for secure communication in federated content networks." Computer Communications 68 (2015): 47-60.

Puopolo, Scott, et al. "Content Delivery Network (CDN) Federations-How SPs Can Win the Battle for Content-Hungry Consumers." Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG) (2011).

Rexford, Jennifer, and Constantine Dovrolis. "Future Internet architecture: clean-slate versus evolutionary research." Communications of the ACM 53.9 (2010): 36-40.

Santos, Mateus AS, et al. "Multipath source routing strategies for video transmission in ad hoc wireless networks." Wireless Networks 21.3 (2015): 859-869.

Seppanen, Janne, and Marta Varela. "QoE-driven network management for real-time over-the-top multimedia services." *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2013 IEEE*. IEEE, 2013.

Shafiq, Muhammad Zubair, et al. "Understanding the impact of network dynamics on mobile video user engagement." *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*. Vol. 42. No. 1. ACM, 2014.

Silveira, Regina M., and Wilson V. Ruggiero. "Server of quality system for video on demand over ATM." *ATM (ICATM 2001) and High Speed Intelligent Internet Symposium, 2001. Joint 4th IEEE International Conference on*. IEEE, 2001.

Silveira, Regina M., and Wilson V. Ruggiero. "Sistema de Ajuste dos coeficientes de Quantização MPEG em Tempo-Real para Vídeo sob Demanda." *apresentado no XVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores* (2000).

Silveira, Regina M., and Wilson V. Ruggiero. "Utilizando Rede Neural para o Ajuste da Qualidade do Vídeo em um Sistema sob Demanda." *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*. Vol. 20. 2001.

Sócrates-Dantas, Joana, et al. "PCE algorithm for traffic grooming and QoS in multi-layer/multi-domain IP over WDM networks." Transparent Optical Networks (ICTON), 2011 13th International Conference on. IEEE, 2011.

Socrates-Dantas, Joana, et al. "Survey on Path Computation Element extensions for Spectrum Switched Optical Networks." Transparent Optical Networks (ICTON), 2013 15th International Conference on. IEEE, 2013.

Sócrates-Dantas, Joana, et al. "Challenges and requirements of a control plane for elastic optical networks." Computer Networks 72 (2014): 156-171.
Socrates-Dantas, Joana, et al. "A Study in current dynamic fragmentation-aware RSA algorithms." Transparent Optical Networks (ICTON), 2014 16th International Conference on. IEEE, 2014.

Socrates-Dantas, Joana, et al. "Novel Differentiated Service Methodology Based on Constrained Allocation of Resources for Transparent WDM Backbone Networks." 2014 Brazilian Symposium on Computer Networks and Distributed Systems (SBRC). IEEE, 2014.

Sousa, Tiago M., et al. "Evaluating multipath routing protocols to improve video transmission for precision agriculture." Telecommunications Symposium (ITS), 2014 International. IEEE, 2014.

Stallings, W.; "High-speed Networks - TCP/IP and ATM Design Principles", Prentice Hall, 1998

Stallings, William. *ISDN and broadband ISDN*. Macmillan Publishing Co., Inc., 1992.

Szabó, R.; M. Kind, F-J. Westphal, H. Woesner, S. Jocha and A. Császar; "Elastic Network Functions: Opportunities and Challenges". IEEE Network, Issue 9, May-June 2015.

Uchoa, D.; Kulesza, R.; Matushima, R.; Kopp, S.; Bressan, G.; Silveira, R. M.. A Management Platform for Multimedia Distribution in Country-wide Networks. In: 5th Latin American Network Operations and Management Symposium (LANOMS 2007), 2007.

Uchoa, D.; Kopp, S.; Pimentel, H.M.; Matushima, R.; Silveira, R. M.. Towards a Middleware Reference Model for Overlay Networks. In: Companion Proceedings of the XIV Brazilian Symposium on Multimedia and the Web. ACM, 2008. p. 69-72.

Um, T-W; et al., "Dynamic Resource Allocation and Scheduling for Cloud-Based Virtual Content Delivery Networks". ETRI Journal, Volume 36, Number 2, April 2014.

Van Krevelen, D. W. F., and R. Poelman. "A survey of augmented reality technologies, applications and limitations." *International Journal of Virtual Reality* 9.2 (2010): 1.

Villegas, David, et al. "An analysis of provisioning and allocation policies for infrastructure-as-a-service clouds." Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGrid), 2012 12th IEEE/ACM International Symposium on. IEEE, 2012.

Wang, Jue, et al. "Interactive video cutout." *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 24.3 (2005): 585-594.

Wang; Z., "Internet QoS – Architectures and Mechanisms for Quality of Service". Academic Press, Morgan Kaufmann Publishers, by Lucent Technologies, 2001.

Yue, Frank. "Network functions virtualization-everything old is new again." White Paper, F5 Technologies (2013). www.wecosysgroup.com

ANEXO A: Ambiente Físico de Experimentação

O ambiente físico em que são instanciados os softwares que emulam a CDN-SDN-NFV é composto por 4 computadores, como pode ser visto na figura A1, na qual são destacadas as máquinas utilizadas, com as seguintes especificações:

Figura A1: Foto do ambiente de experimentação

- Máquina 1: Responsável por executar o controlador SDN da topologia montada.
  - CPU: Intel Core i5 2400 com 4 núcleos de 3.1GHz;
  - Memória RAM: 8GB;
  - Disco rígido: 500GB;
  - Sistema Operacional: Ubuntu Desktop 14.04.3 LTS 64-bits;
- Máquina 2: Esta máquina é um dos nós da topologia, representa o cliente da requisição de vídeo.
  - CPU: Intel Core2Duo E7400 com 2 núcleos de 2,8GHz;
  - Memória RAM: 4GB;
  - Disco rígido: 250GB;
  - Sistema Operacional: Ubuntu Desktop 14.04.3 LTS 64-bits;

- Máquina 3: Esta máquina é o outro nó da topologia, representa o servidor de vídeo.
  - CPU: Intel Core2Duo E7400 com 2 núcleos de 2,8GHz;
  - Memória RAM: 4GB;
  - Disco rígido: 250GB;
  - Sistema Operacional: Ubuntu Desktop 14.04.3 LTS 64-bits;
- Máquina 4: Responsável por executar uma instância do Mininet, ferramenta que emula uma rede SDN.
  - CPU: AMD Athlon64 X2 com 2 núcleos de 2,1GHz;
  - Memória RAM: 4GB;
  - Disco rígido: 250GB;
  - Sistema Operacional: Ubuntu Desktop 14.04.3 LTS 64-bits.

Para a instalação do OpenStack foi utilizada :

- 01 máquina utilizada para a montagem do OpenStack possui as seguintes configurações:
  - Processador: Intel(R) Core(TM) i5-2500 CPU @ 3.30GHz
  - RAM: 8GB DDR3 1333MHz
  - HD: 1TB 7200RPM 64MB
  - Sistema Operacional: Ubuntu Server 14.04 64-bits
  - OpenStack: Relase Name JUNO
- Configurações da VM:
  - Processador: 1 CPU Virtual
  - RAM: 2GB
  - HD: 10GB
  - Sistema Operacional: Ubuntu Cloud Image 14.04

Nos testes realizados a versão do *Mininet*[23] utilizada é a 2.2.1 e do *Openvswitch* é a 2.3.2.

O ambiente emulado foi configurado com as seguintes características:

- Atraso de ida e volta entre comutadores, 250 microssegundos;
- Atraso de ida e volta entre os comutadores e controlador SDN, 300 microssegundos;
- Taxa de transmissão das portas dos comutadores, 1Gbps.

[23] http://mininet.org/

ANEXO B: Código utilizado na simulação com R

```
# read data file
d=read.csv("~/cpu_dados_3.csv", sep=";")
last_value = 0;
current_value = 0;
first_loop = 0;
delta_t = 10;
delta_R = 0;
theta_threshold = 0;
T = 0;
T_alloc = 20;
T_alloc_cur = T_alloc;
is_realloc = 0;
safety_gap = 5;
new_alloc=1;
total_alloc = 1;

# create vectors
vx <- numeric(length(d));
vy <- numeric(length(d));
vz <- numeric(length(d));
vr <- numeric(length(d));
count=0;
resource_count = 0;

# read points
for (i in d$USE )
{
  vx[count] <- count ;
```

```
  # CPU values are in idle, converting to used
  vy[count] <- 100 - i;
  print (vx[count]);
  print (vy[count]);
  count = count + 1;
}
max_vy = max(vy);
vy = vy*110/max_vy
count = 1;
for (j in 1:length(vy))
{
  #print ( j );
  i <- vy[j];
  print ( i );
  if (first_loop == 0 )
  {
    first_loop = 1;
    last_value = i;
    current_value = i;
  }
  else
  {
    current_value = i*new_alloc;
    T   = (current_value - last_value) / delta_t;
    delta_R = T_alloc * T;
    if (current_value  >= 100  - delta_R | is_realloc == 1)
    {
      print ("T_alloc_cur");
      print (T_alloc_cur);
      if (T_alloc_cur > 0 )
      {
        is_realloc = 1;
        T_alloc_cur = T_alloc_cur - 10;

      }
```

```
        else
        {
          #print( current_value);
          print("Realloc Procedure");
          new_alloc = new_alloc / 1.2;
          total_alloc = total_alloc * 1.2;
          resource_count = resource_count + 1;
          # CALL Realloc procedure
          T_alloc_cur = T_alloc;
          is_realloc = 0;
        }
      }
      else if ( T < 0 & (current_value / 1.2 <= 100 - delta_R) & resource_count > 0 )
      {
        print( current_value);
        print("Free Alloc Procedure");
        new_alloc = new_alloc * 1.2;
        total_alloc = total_alloc / 1.2;
        resource_count = resource_count - 1;
      }

      last_value = current_value;
    }
    vr[count] <- total_alloc * 100;
    vz[count] <- current_value ;
#   print (vr[count]);

    count = count + 1;
  }

  #print ( "vx");
  #print (length(vx));
  #print ( "vz");
  #print (length(vz));
```

```
t = xy.coords(vx*10, vz);
t2 = xy.coords(vx*10, vr);
# plot graphics
plot (t, main="Recursos de cpu", xlab="tempo(s)", ylim=range(0:140), ylab="%
em uso", type="o",  col="red", pch=16, las=2);
lines (t2, type="l",  col=35, pch = 4);
legend("topleft", inset=0.0, title="Alocação de Recursos", c("Utilizado", "Total"),
fill=c("red", "green"), horiz=TRUE);
```