

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO

ALEXSANDER SILVA DE SOUZA

**Modelo de avaliação de redes de acesso
banda larga baseadas no paradigma SDN**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para a obtenção do grau de Mestre em Ciência da
Computação

Orientador: Prof. Dr. Juergen Rochol
Co-orientador: Prof. Dr. Sérgio Luis Cechin

Porto Alegre
2017

CIP — CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO

de Souza, Alexsander Silva

Modelo de avaliação de redes de acesso banda larga baseadas no paradigma SDN / Alexsander Silva de Souza. – Porto Alegre: PPGC da UFRGS, 2017.

102 f.: il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Computação, Porto Alegre, BR–RS, 2017. Orientador: Juergen Rochol; Co-orientador: Sérgio Luis Cechin.

1. Redes definidas por software. 2. Arquitetura da Internet. 3. Modelagem. I. Rochol, Juergen. II. Cechin, Sérgio Luis. III. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Prof. Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitora: Prof^a. Jane Fraga Tutikian

Pró-Reitor de Pós-Graduação: Prof. Celso Giannetti Loureiro Chaves

Diretora do Instituto de Informática: Prof^a. Carla Maria Dal Sasso Freitas

Coordenador do PPGC: Prof. Luigi Carro

Bibliotecária-chefe do Instituto de Informática: Beatriz Regina Bastos Haro

“Destitutus ventis, remos adhibe.”

— PROVÉRPIO ROMANO

AGRADECIMENTOS

Aos professores Sérgio Luis Cechin e Juergen Rochol, pelo incentivo desde antes do mestrado começar, por guiar-me em todo o processo, e principalmente por sempre acreditarem neste trabalho.

Aos colegas da Parks, cujas conversas ajudaram a clarear as ideias, e pela compreensão nos momentos em que não estive presente.

Aos bolsistas do projeto SDCN, Andrey Blazejuk e Kazuki Yokoyama, cujo trabalho foi fundamental para a construção das simulações utilizadas.

Aos meus pais e a minha família, pela pronta ajuda sempre que foi necessário.

À Parks, por todo o apoio técnico, pela paciência e pelo voto de confiança.

Aos amigos, por estarem presentes em todos os momentos.

Em especial a minha companheira Maria de Fátima dos Santos, pelo incentivo a sempre seguir em frente.

RESUMO

Redes definidas por software (SDN) são uma abordagem recente para o projeto e operação de redes de computadores. Este paradigma é empregado com sucesso em cenários de *datacenter*, no entanto redes de acesso definidas por software (SDAN) ainda são raras em operadoras de telefonia e provedores de Internet. Isso deve-se em grande parte à inexistência de uma arquitetura de referência, algo que diversos projetos tentaram suprir nos últimos anos. Independente da vertente escolhida, a opção por uma mudança tão disruptiva como o SDN precisa ser justificada. Modelos tecno-econômicos são comumente utilizados para estimar o impacto da mudança na rentabilidade da operação. O custo total de propriedade (TCO) é uma métrica utilizada para esse fim. O presente trabalho desenvolveu um modelo simplificado de comparação de arquiteturas de rede, que diferentemente dos demais, tem foco nos serviços oferecidos ao assinante e no custo de gerenciamento dos mesmos. A análise é realizada em duas dimensões. Na primeira o esforço de operar a rede é estimado através de uma análise qualitativa, de forma similar ao realizado por outros modelos. O segundo eixo é a quantidade de recursos exigida para provisionar e monitorar cada serviço. Essa estimativa é gerada através do uso de simulação de tempo discreto dos elementos e protocolos relevantes. A combinação das duas análises permite identificar as tendências de comportamento dos serviços geradas pela adoção de uma nova arquitetura de rede, e avaliar a conveniência dessa migração. O uso de simulação neste trabalho demandou a construção de modelos dos equipamentos e protocolos envolvidos. Elegeu-se o pacote NS-3 como ferramenta de simulação. Definir e implementar modelos para todos os serviços analisados poderia tornar-se tão oneroso quanto as técnicas que desejávamos suplantarmos, e por isso utilizou-se uma abordagem indireta. São simulados apenas os componentes essenciais, e os custos de cada serviço são inferidos a partir deles. O modelo de rede SDAN utilizado, denominado SDCN, é inspirado no SplitArchitecture, proposto pelo projeto SPARC.

Palavras-chave: Redes definidas por software. arquitetura da Internet. modelagem.

An evaluation model for SDN based Broadband Internet Access Networks

ABSTRACT

Software defined networks are a novel approach to design and operation of computer networks. Although this paradigm is employed successfully in many data-centers and campus, software defined access networks (SDAN) are still in their infancy. Carriers and ISPs have not converged on a standard architecture to build their infrastructure upon, a problem many initiatives are trying to solve. Regardless of the chosen model, the option for such a disruptive change as SDN needs to be justified. Techno-economic models are commonly used to estimate the impact of a change in the operation. The Total Cost of Ownership (TCO) is a metric commonly used for this purpose. The present work developed a simplified evaluation model for network architectures, which focuses on the services offered to the subscriber and on the cost of managing them. The analysis is performed in two dimensions. In the first, the effort to operate the network is estimated through a qualitative analysis, similar to the one performed by other existing models. The second axis is the amount of resources required to provision and monitor each service. This estimation is produced through the use of discrete time simulation of selected elements and protocols. The combination of the analyzes allows us to identify the behavioral trends provoked by the adoption of a new network architecture, and to evaluate the convenience of such migration. The simulation in this work demanded models for the equipment and protocols involved. The package NS-3 was the chosen simulation tool. Defining and implementing models for all services analyzed could become as costly as the techniques we wish to overcome, so an indirect approach has been used. Only the essential components are simulated, and the costs of each service are inferred from them. The SDAN model evaluated in this work, called SDCN, is a simplification of the SplitArchitecture proposed by the SPARC project.

Keywords: Software defined networks, Internet Architecture, Modeling.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AN	Access Node
ASP	Application Service Provider
ATA	Analog Telephone Adapter
BBF	BroadBand Forum
BNG	Broadband Network Gateway
BRAS	Broadband Remote Access Server
BSS	Business Support System
BWoD	Bandwidth on Demand
CAPEX	Capital Expenditure (investimento em bens de capital)
CPN	Customer Premises Network
EMS	Element Management System
ICSI	International Computer Science Institute
IETF	Internet Engineering Task Force
IPoE	IP over Ethernet
ISP	Internet Service Provider (provedor de Internet)
MRCP	Managed Router on Customer Premises
NFV	Network Function Virtualization
NGN	Next Generation Networks (redes de nova geração)
NMS	Network Management System
NOS	Network Operational System (sistema operacional de rede)
NSP	Network Service Provider
ONF	Open Networking Foundation
OPEX	Operational Expenditure (custo operacional)
OSS	Operations Support System

OTT	Over the Top Application
POTS	Plain Old Telephone Service (Serviço telefônico comutado)
PQS	Pay for QoS
QOE	Quality of Experience (qualidade de experiência do usuário)
QOS	Quality of Service (qualidade de serviço)
RAN	Regional/Access Network (rede regional/acesso)
SDAN	Software-defined access network (rede de acesso definida em software)
SDN	Software-defined network (rede definida em software)
STFC	Sistema de Telefonia Fixa Comutada
TCO	Total Cost of Ownership (custo total de propriedade)

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Arquitetura do Regional/Access Network.....	23
Figura 2.2	Nova arquitetura do Regional/Access Network.....	26
Figura 2.3	Plano de controle na arquitetura TR-144.....	26
Figura 3.1	Arquitetura SDN.....	34
Figura 3.2	Switch OpenFlow	36
Figura 3.3	Extensão do modelo SDN.....	40
Figura 3.4	Visão geral da arquitetura CORD	42
Figura 3.5	Serviço PPPoE com SplitArchitecture	44
Figura 3.6	Arquitetura SDCN	48
Figura 3.7	Plano de controle SDCN.....	50
Figura 4.1	Modelo de Access Node	54
Figura 4.2	Modelo de BNG.....	55
Figura 4.3	Modelo de CPE.....	56
Figura 4.4	Topologia TR-144.....	57
Figura 4.5	Modelo de switch OpenFlow	58
Figura 4.6	Modelo de Controlador OpenFlow	60
Figura 4.7	Topologia SDCN	61
Figura 5.1	Fluxograma de construção do modelo.....	66
Figura 6.1	Aplicação do modelo de comparação as duas arquiteturas	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Evolução do padrão OpenFlow	39
Tabela 4.1	Resultado da simulação	62
Tabela 5.1	Exemplo de domínios administrativos.....	67
Tabela 5.2	Exemplo de pesos das propriedades simuladas	68
Tabela 6.1	Domínios administrativos.....	72
Tabela 6.2	Mapa de serviços e domínios	72
Tabela 6.3	Custo operacional para redes de acesso.....	73
Tabela 6.4	Pesos das propriedades simuladas	74
Tabela 6.5	Custo de recursos para redes de acesso	75
Tabela 6.6	Instanciação do modelo para redes de acesso.....	75

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
2 REDES REGIONAIS E DE ACESSO	23
2.1 Serviços	27
3 REDES DEFINIDAS POR SOFTWARE	33
3.1 Uso de SDN em redes de Acesso Banda larga	41
3.2 Serviços	45
3.3 Arquitetura SDCN	47
4 SIMULAÇÃO DE UMA REDE DE ACESSO UTILIZANDO NS-3	51
4.1 Modelagem da arquitetura TR-144 no NS-3	53
4.2 Modelagem da arquitetura SDCN no NS-3	57
4.3 Resultados da simulação	61
5 MODELO DE COMPARAÇÃO DE CUSTOS EM REDES DE ACESSO	65
5.1 Custo operacional.....	66
5.2 Custo de Recursos	67
5.3 Construção do gráfico comparativo	69
6 AVALIAÇÃO DE REDES DE ACESSO COM O MODELO PROPOSTO	71
7 CONCLUSÕES	79
REFERÊNCIAS	83
APÊNDICE A — DIAGRAMA DE CLASSES DO MODELO SIMULADO	89

1 INTRODUÇÃO

Redes definidas por software (SDN) são uma abordagem recente para o projeto e operação de redes de computadores. Enquanto em sistemas convencionais o plano de controle está fortemente acoplado aos equipamentos de rede, em sistemas SDN este é exercido por uma entidade externa, logicamente centralizada e totalmente programável chamada *Controlador*. O plano de dados é simplificado, com uma interface de configuração padronizada, e os equipamentos precisam apenas classificar os pacotes de dados nos fluxos definidos pelo Controlador e adotar as ações especificadas pelo mesmo.

Propostas de redes programáveis e de separação dos planos de controle e dados não são novidade, sendo exploradas desde o início dos anos 2000 (IETF, 2001; GREENBERG et al., 2005; CASADO et al., 2007). O sucesso do SDN em relação aos seus precursores deve-se a dois fatores (GOTH, 2011). O primeiro é a existência de implementações abertas e funcionais, principalmente do OpenFlow (MCKEOWN et al., 2008). O segundo é o momento da indústria, onde a busca por oferecer serviços inovadores e diferenciar-se dos concorrentes exige uma agilidade que órgãos normativos e fornecedores não conseguem oferecer.

O modelo SDN é empregado com sucesso em cenários de *datacenter*, no entanto sua adoção ainda engatinha em redes de operadoras de telefonia e provedores de Internet (ISP). Redes regionais e de acesso (RAN) constituem a maior parte da infraestrutura de um provedor, reunindo todos os elementos entre o *backbone* IP e o cliente final. Qualquer alteração nessa estrutura é planejada com cautela devido aos efeitos multiplicadores da escala. Se por um lado empregar o paradigma SDN permite criar produtos diferenciados, sem grandes investimentos em equipamentos, e com melhor gerenciamento da rede (NEC, 2014), por outro lado as novas redes devem atender aos requisitos operacionais da infraestrutura atual. Como projetar e operar essas redes ainda é uma questão em aberto (STAESSENS et al., 2011).

Definir como projetar uma rede de acesso definida em software (SDAN) foi o objetivo do SPARC (SPARC, 2013), uma iniciativa da união europeia com a missão de redefinir a arquitetura da Internet. Ao final do projeto surgiu uma nova arquitetura de rede de acesso chamada *SplitArchitecture*, combinando elementos legados com novas tecnologias para obter a separação de planos defendida pelo modelo SDN. Existem iniciativas na indústria com o mesmo objetivo. O Broadband Forum, consórcio responsável pela padronização do xDSL, incluiu uma referência ao SDN na sua visão para o futuro (BBF,

2015), apesar de ainda não fornecer detalhes de como irá integra-lo. O ONF, mantenedor do padrão OpenFlow, tem um grupo de trabalho para definir uma arquitetura de rede de acesso definida em software (ONF, 2016). Existe ainda uma iniciativa promovida pela operadora AT&T (EUA), denominada CORD (ON.Lab, 2015a), que difere dos demais modelos ao utilizar virtualização em larga escala da infraestrutura da rede. Esta última iniciativa é mais promissora, com grandes operadoras anunciando pilotos ao redor do mundo no último ano (ON.Lab, 2016).

Independente da vertente escolhida, toda empresa precisa justificar uma mudança tão disruptiva como o SDN na construção e operação de sua infraestrutura. Esse foi um dos objetivos do projeto SDCN, um convênio entre o Instituto de Informática da UFRGS e a Parks S/A Comunicações Digitais, indústria nacional do setor de equipamentos de telecomunicações. O projeto visava investigar a aplicação do paradigma SDN em redes de acesso GPON, e identificar vantagens e desafios dessa abordagem. Esta dissertação foi desenvolvida no contexto dessa parceria, e deriva da necessidade de estabelecer uma metodologia para comparar a solução existente com as alternativas propostas.

Modelos tecno-econômicos são comumente utilizados para estimar o impacto de uma mudança na rentabilidade da operação. O custo total de propriedade (TCO) é uma métrica utilizada para esse fim, e exemplos de modelos que utilizam-na são encontrados em Verbrugge et al. (2005), Knoll (2015) e Bailey (2016). Existem ainda ferramentas sofisticadas para modelar a rede e os processos operacionais associados, e dessa forma obter uma estimativa do TCO ao longo do ciclo de vida da tecnologia. Um exemplo é o STEM (Implied Logic Limited, 2016), que combina modelos de alocação de custo e demanda, depreciação, utilização, manutenção e fluxo de caixa, e então permite a simulação de cenários parametrizáveis. Essas abordagens têm duas características em comum: focam em prever o impacto financeiro de uma proposta e são custosas de construir. Apesar de estar embutido indiretamente na análise, o custo computacional de gerenciar a rede não é abordado. Tampouco é possível realizar uma avaliação superficial da proposta, algo desejado no projeto SDCN, já que possuem dezenas de parâmetros de entrada.

O presente trabalho desenvolveu um modelo de comparação de arquiteturas de rede que preenche essas lacunas. O foco do modelo são os serviços oferecidos ao assinante e o custo de gerenciamento dos mesmos. A análise é realizada em duas dimensões. Na primeira o esforço de operar a rede é estimado através de uma análise qualitativa, de forma similar ao realizado por outros modelos, porém sem utilizar o custo financeiro como métrica. Ao invés disso utiliza-se uma medida da complexidade da operação. O

segundo eixo é o custo em recursos exigido para provisionar e monitorar cada serviço. Essa estimativa é gerada através do uso de simulação de tempo discreto dos elementos e protocolos relevantes. O simulador fornece uma medida do consumo de memória e utilização da rede em cada cenário estudado, que são combinadas para estimar o custo de recursos. A soma das duas análises permite identificar as tendências de comportamento dos serviços geradas pela adoção de uma nova arquitetura de rede.

O uso de simulação neste trabalho demandou a construção de modelos dos equipamentos e protocolos envolvidos. Elegu-se o pacote NS-3 como ferramenta de simulação, principalmente devido a sua flexibilidade e a sua biblioteca de componentes reutilizáveis. Definir e implementar modelos para todos os serviços analisados pode tornar-se tão oneroso quanto as técnicas que desejamos suplantarmos, por isso utilizamos uma abordagem indireta. São simulados apenas os componentes essenciais, e consumo de recursos por cada serviço é inferido a partir deles.

Motivação

Esta dissertação foi produzida no contexto do convênio SDCN, uma parceria firmada em 2015 entre o Instituto de Informática da UFRGS e a Parks S/A Comunicações Digitais, onde investigou-se a aplicação do paradigma SDN em redes de acesso GPON, que atualmente são construídas segundo a recomendação TR-156 (BBF, 2008b). O projeto teve como objetivo identificar os benefícios e desafios dessa abordagem, e apontar requisitos para futuros projetos de produtos desenvolvidos nesse segmento.

O projeto identificou dois obstáculos que motivaram esta dissertação. O primeiro é a inexistência no mercado de um consenso sobre a arquitetura SDN para a aplicação desejada. Adotar qualquer uma das propostas existentes era visto como uma decisão precoce pela Parks, e dessa forma uma arquitetura de referência neutra precisava ser definida. O segundo é que uma vez estabelecida a proposta de rede, não havia uma metodologia de comparação utilizando as métricas desejadas, e nem adequada aos recursos disponíveis no convênio.

Objetivos

O objetivo principal desta dissertação é definir um modelo de comparação de arquiteturas de redes de acesso. O modelo deve auxiliar a estimar requisitos técnicos dos equipamentos e infraestrutura envolvidos, tais como memória e capacidade de transmissão. A instanciação desse modelo deve ter um custo reduzido, e para isso aceita-se sacrificar a precisão. Um objetivo secundário é criar e disponibilizar à comunidade modelos da rede de acesso convencional e de elementos OpenFlow para uso no simulador NS-3.

Organização da dissertação

Esta dissertação está organizada da seguinte forma. No capítulo 2 revisamos conceitos de redes de acesso Banda Larga, as arquiteturas recomendadas por corpos técnicos da indústria e os serviços oferecidos aos assinantes. A seguir, no capítulo 3, apresentamos o paradigma de redes definidas por software (SDN). Revisaremos as iniciativas para aplicar esse conceito a redes de acesso e agregação e os desafios enfrentados, além de apresentar um modelo próprio para esta finalidade, denominado SDCN. O capítulo 4 introduz o simulador NS-3, juntamente com os modelos desenvolvidos para os experimentos deste trabalho. Um modelo de comparação entre arquiteturas de rede é proposto no capítulo 5, utilizado para confrontar o modelo de rede de acesso tradicional e o SDN no capítulo 6. Finalmente no capítulo 7 apresentamos nossas considerações finais sobre a aplicação de SDN em redes de operadoras e provedores.

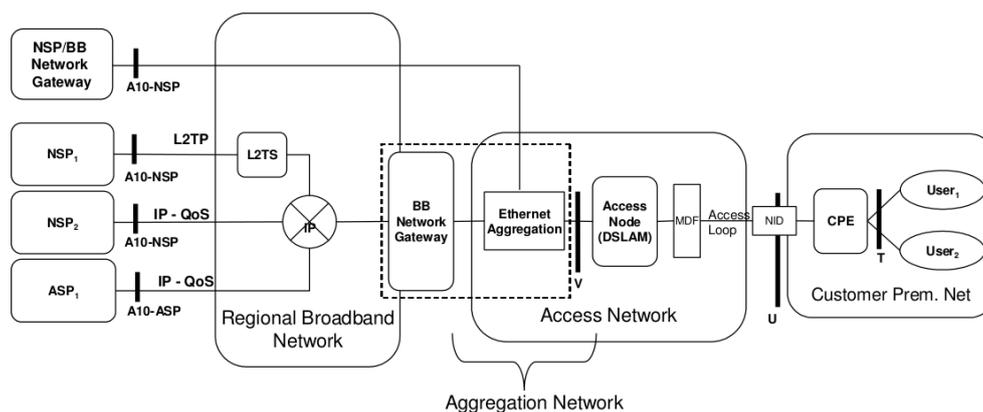
2 REDES REGIONAIS E DE ACESSO

Redes regionais e de acesso (RAN) constituem a maior parte da infraestrutura de um provedor de Internet (ISP), reunindo todos os elementos entre o *backbone* IP e o assinante. Desde a década de 1990 foram criados diversos consórcios com o objetivo de definir padrões para redes regionais e de acesso (RAN), como o Broadband Forum (BBF) e o CableLabs. O primeiro foi formado por operadoras de telefonia fixa dos EUA, e concentra-se no serviço de acesso fixo (*wireline*), principalmente com as tecnologias xDSL e xPON. Já o CableLabs é uma empresa sem fins lucrativos fundada por operadores de cabo norte-americanos, e coordena a evolução do padrão DOCSIS. Segundo dados da Anatel (2016) as tecnologias ADSL e GPON respondem por 60% dos assinantes fixos brasileiros, e por isso este trabalho optou por utilizar as recomendações do BBF como referência.

O BBF periodicamente propõe novas arquiteturas e modelos de serviço, motivado principalmente por mudanças no cenário econômico e tecnológico. A versão em vigor é descrita na recomendação TR-101 (BBF, 2011), publicada pela primeira vez em 2006. A Figura 2.1 ilustra o RAN, e seus principais componentes e interfaces de interesse serão descritos a seguir. Historicamente os documentos do Fórum eram direcionados apenas a tecnologias de acesso sobre linhas telefônicas (xDSL). Apesar de introduzir o uso de fibra ótica (FTTx) e de enlaces de rádio nas versões atuais, optou-se por manter algumas nomenclaturas inalteradas para compatibilidade com textos anteriores.

O RAN é dividido em três domínios: *Customer Premises Network* (CPN), *Access Network* e *Regional Broadband Network*. O primeiro domínio compreende os equipamentos instalados nas dependências do assinante, cujo controle administrativo seja do ISP. O

Figura 2.1: Arquitetura do Regional/Access Network (BBF, 2011)



segundo, *Access*, é o de maior capilaridade, utilizando tecnologias de última milha como xDSL, xPON e rádio para transportar as sessões do assinante até elementos concentradores. No interior dessa rede existe um bloco destacado na figura, chamado *Aggregation Network*, que provê resiliência, controle de congestionamento e serviços Multicast à infraestrutura. Por último existe o domínio *Regional*, onde residem os serviços e capacidades IP do RAN.

O BBF especifica as funções de quatro interfaces do RAN. A primeira, *T*, é localizada dentro do domínio *Customer* e atua entre o modem e outros pontos de acesso do usuário, onde sessões PPP são estabelecidas. Usualmente os ISPs fornecem um único equipamento que desempenha as duas funções, e *T* é interna a ele. A segunda é chamada *U*, e representa a interface WAN do modem, cuja função é converter os quadros Ethernet da rede CPN no encapsulamento requerido pela tecnologia de acesso empregada, por exemplo ATM. A interface *V* utiliza o padrão IEEE 802.1ad para fornecer as funções de agregação de tráfego, diferenciação de classe de serviço e isolamento de sessões de assinante. A última interface, *A10*, representa a conexão entre o RAN e redes de hierarquia mais alta. Essa ligação pode ser feita de quatro formas. No topo da figura existe um serviço legado, que não trafega pela rede regional. O caso seguinte ilustra um túnel de camada 2 sobre IP, tipicamente um serviço de rede virtual privada (VPN). O terceiro caso é o mais comum, onde um NSP (*Network Service Provider*) provê conectividade à Internet através do protocolo IP. Por fim há o cenário de conexão com um ASP (*Application Service Provider*), responsável por aplicações específicas como VoIP e vídeo sob demanda.

Os dois principais componentes do RAN são o *Access Node (AN)* e o *Broadband Network Gateway (BNG)*. O primeiro implementa uma ou mais tecnologias de acesso de última milha, gerenciando as especificidades de cada uma. Em alguns contextos esse elemento recebe nomes próprios como DSLAN (ADSL) e OLT (xPON). O AN tem ao menos uma interface *V* para conectar-se na rede de agregação Ethernet (*Ethernet Aggregation*). Já o BNG atua como borda da rede IP, sendo o elemento responsável por controlar as sessões de usuário, terminando qualquer túnel utilizado na rede de agregação. O BNG deve interagir com o AN através de protocolos que implementem o controle de políticas de tráfego Ethernet (BBF, 2008a), além de ser a contra-parte de serviços iniciados por este, como OAM e segurança. Também atua como um ponto de replicação de tráfego Multicast.

A arquitetura TR-101 é uma evolução do TR-059, com a troca do protocolo ATM

em favor do Ethernet motivada principalmente pelo suporte a um serviço Multicast mais sofisticado (*triple-play*). Apesar de largamente utilizada, essa arquitetura ainda é limitada e não permite a implantação de serviços e modelos de negócio que emergiram desde sua publicação em 2006. A resposta às novas demandas foi o surgimento de redes de nova geração (NGN), como a ITU-T Y.2011 (ITU-T, 2004) e a *Multi-Service Broadband Architecture* (BBF, 2007; BBF, 2012). Os principais requisitos de alto nível dessas propostas são:

- suporte a novos modelos de negócio;
- serviços IP com QoS;
- alocação de banda e QoS sob demanda;
- auto-configuração dos assinantes;
- simplificação de operação e provisionamento;
- planos de controle de aplicação e de rede distintos, compartilhando um banco de dados comum;
- suporte a múltiplas tecnologias de acesso;
- nomadismo;
- resiliência; e
- integração com outras arquiteturas orientadas a serviço, incluindo ETSI NGN, ITU-T NGN e *Web services*.

A proposta *Multi-Service Broadband Architecture*, uma evolução da arquitetura TR-101, é definida em três documentos. O primeiro, TR-144 (BBF, 2007), define alguns dos modelos de negócio desejados e os requisitos arquiteturais, enquanto o segundo, TR-145 (BBF, 2012), apresenta a arquitetura de referência e os requisitos funcionais da rede. A terceira recomendação, TR-178 (BBF, 2014), contém diversos cenários de aplicação e os requisitos nodais. A solução completa será construída utilizando-se blocos de diversas outras recomendações técnicas, algumas ainda em elaboração.

O modelo de referência do TR-144 (Figura 2.2) apresenta cinco novas interfaces, algumas já existentes porém não explicitamente descritas no modelo anterior. O ponto *W* representa a conexão entre o BNG e a rede *Aggregation Network*, onde o cabeçalho MPLS é adicionado ou removido dos quadros Ethernet. A interface *R* permite ao *Policy Controller* (BBF, 2013a) interagir com os elementos do RAN, principalmente o BNG. O ponto *M* é a interface entre a infraestrutura e o sistema de gerenciamento (EMS) do ISP. Por fim, as interfaces *G* e *Q* não fazem parte do escopo do modelo e não são descritas na

Figura 2.2: Nova arquitetura do Regional/Access Network

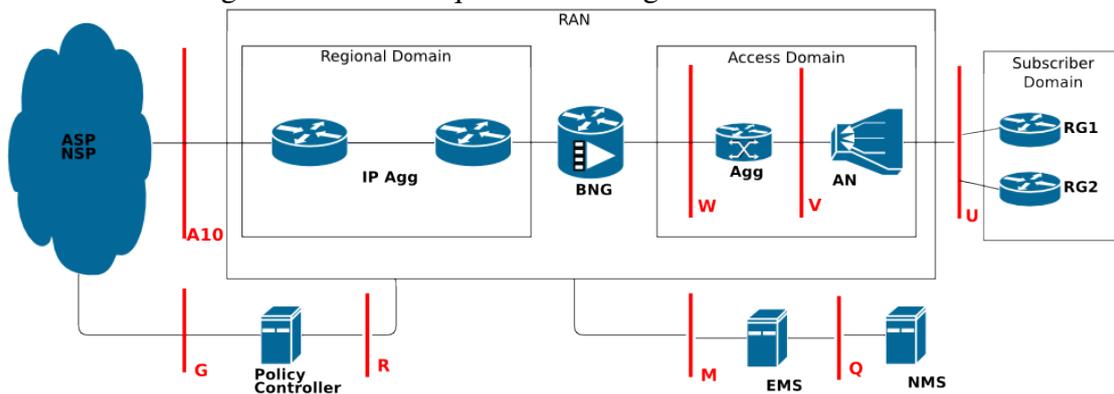
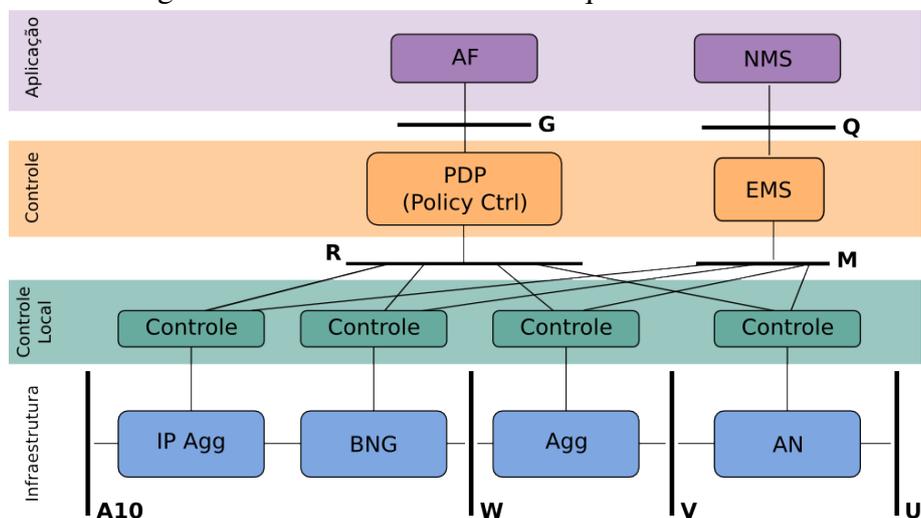


Figura 2.3: Plano de controle na arquitetura TR-144



recomendação, e ambas servem para sistemas externos interagirem com o ISP.

O modelo do plano de controle da arquitetura *Multi-Service* do BBF é similar ao utilizado pelas propostas anteriores, e pode ser representado em três camadas como visto na Figura 2.3. No topo há a camada de *Aplicação*, onde existem sistemas desenvolvidos por NSPs e ASP, e executados fora do domínio administrativo do RAN. A segunda camada é chamada de *Controle*, onde combina-se as requisições de todas as partes interessadas, aplicações e EMS, numa política global que deve ser implementada pela infraestrutura de rede. A última camada, o *controle local*, contém as funções executadas pelo software embarcado em cada elemento do plano de dados.

Entre as soluções técnicas que compõem a arquitetura NGN, pode-se destacar três alterações em relação às redes existentes. A primeira é a adoção de IP/MPLS tanto na rede de agregação quanto na de acesso. O avanço dessa tecnologia do núcleo da rede em direção ao nodo de acesso (AN) já era uma tendência, e o BBF está definindo uma abstração para emular serviços Ethernet e legados sobre essa nova rede. A segunda alteração é o

uso de hierarquias de BNGs, onde um nível oferece funções básicas da borda IP enquanto o outro implementa serviços específicos, como mobilidade, CGN e mecanismos de transição IPv6. Por fim, ocorreu a migração do acesso baseado em sessões PPP (PPPoE) para um serviço IP (IPoE), motivado pela necessidade de suportar tráfego Multicast em todos os níveis da rede.

2.1 Serviços

A arquitetura NGN do Broadband Forum favorece o uso de sessões de assinante IPoE em detrimento das sessões PPP das recomendações anteriores. A mudança possibilita o uso mais eficiente dos recursos na rede de agregação, movendo o último ponto de replicação Multicast do BNG para o AN. No entanto, também cria dificuldades para proporcionar os mesmos serviços que um túnel PPP oferece. A recomendação TR-146 (BBF, 2013b) descreve algumas soluções para esse problema.

O serviço de sessões é operado principalmente na rede de Acesso do RAN, com interações entre o AN e BNG, porém pode haver requisições direcionadas a outros elementos do RAN. Uma sessão pode ser decomposta em três estágios: estabelecimento, manutenção e encerramento.

O *estabelecimento* de uma sessão de assinante por ser induzido por um evento no plano de controle, onde uma ação administrativa cria uma sessão estática, ou no plano de dados, provocado por estímulos originados no CPE. No último caso o AN é responsável por autorizar a ativação do enlace junto ao ISP. Após o O BNG então cria a sessão IP, verificando credenciais e a disponibilidade de recursos junto ao NSP ou ASP quando necessário.

Na fase de *manutenção* o sistema deve monitorar a atividade do assinante para fins de cobrança, auditoria e demais obrigações regulatórias. A principal informação coletada são contadores de pacotes associados a filtros definidos no BNG. A recomendação exige que esses dados sejam exportados através do protocolo RADIUS para sistemas de gerência do ISP. Também deve ser possível alterar o perfil de serviço associado ao assinante. Isso é possível através de mensagens ANCP enviadas ao *Access Node*, para alterações no enlace, ou requisições DHCP ao CPE para reconfigurá-lo.

O *encerramento* de uma sessão pode ser controlado, iniciado pelo ISP ou usuário, ou ser abrupto, consequência de eventos externos. Em qualquer caso, o sistema deve ser capaz de detectar o final da sessão para liberar os recursos associados. Enquanto o pro-

tolocolo PPP utiliza mensagens LCP para ativamente monitorar o enlace, as sessões IPoE observam os contadores de pacotes de forma passiva. Uma vez que o assinante pode permanecer longos períodos de tempo sem transmitir dados, essa técnica precisa ser complementada por outros mecanismos. O principal é o uso do protocolo *BFD echo* (RFC-5880) no CPE, de forma a periodicamente gerar atividade no enlace e permitir o monitoramento a partir do BNG.

As sessões IPoE são o alicerce sobre o qual as demais aplicações de redes de acesso são estabelecidas. O restante desta seção revisará os principais serviços observados no mercado, e seu impacto na operação do provedor. As descrições dos aspectos operacionais foram obtidas através de entrevistas com a equipe de projetos da Parks S/A Comunicações Digitais.

Internet banda larga

Internet banda larga é um serviço básico de transporte de pacotes e conectividade à Internet. Caracteriza-se por uma taxa máxima contratada pelo assinante, e uma taxa mínima estabelecida por regulamentação do setor. A política de QoS é *best-effort*, onde todos os assinantes do serviço disputam recursos, e pacotes são descartados sem critério no caso de congestionamento.

O crescimento na demanda por banda não é acompanhado pelo aumento da receita, já que o valor das assinaturas está praticamente estabilizado no mundo, e o custo por bit trafegado não cai rápido o suficiente para sustentar a expansão da rede. Cada vez mais observam-se planos que estabelecem limites no volume de dados transportados mensalmente, e penalidades financeiras e/ou redução da taxa máxima quando esse valor é ultrapassado (SEN et al., 2013a).

A configuração deste serviço pode exigir uma coordenação entre diversas equipes dentro do provedor. Uma vez localizado o *Access Node* adequado, deve-se construir um enlace físico até o cliente, aonde um CPE é instalado e recebe uma configuração inicial. O perfil de serviço deve ser adicionado à base de dados RADIUS, que será consultado pelo BNG durante o estabelecimento da sessão. Quando o assinante contrata um plano com uma taxa garantida acima da média, pode ser necessário que estabeleça-se um circuito dedicado na rede de agregação.

Uma vez em operação, esse serviço é estável e requer pouco gerenciamento. Uma alteração no perfil, por exemplo quando o assinante troca de plano, pode exigir um esforço

semelhante ao usado para estabelecer o serviço pela primeira vez. Segundo dados da Parks obtidos junto aos seus clientes, em 2015 o custo de configuração desse serviço atingia R\$1000,00 para assinantes corporativos¹.

VoIP

O serviço de Voz sobre IP (VoIP) é ofertado por operadoras e provedores quando a tecnologia de acesso utilizada não dispõe de um canal dedicado para telefonia. Quando esse canal existe, por exemplo no xDSL, ele é preferido por integrar-se facilmente à infraestrutura de telefonia convencional (POTS), dispensando o uso de conversores para interconexão com outras redes STFC.

O tráfego de voz requer um canal de baixa latência (inferior a 100 ms) para garantir uma boa qualidade de experiência (QoE) ao assinante, no entanto a largura de banda exigida não é grande, na ordem de 160 kbps. Os pacotes de voz são marcados na origem com um *tag* VLAN e/ou DSCP designado pelo operador, utilizado na rede de agregação para diferenciar esse tráfego e aplicar a política desejada.

Na maioria dos casos, VoIP é comercializado como serviço de telefonia fixa convencional, e o assinante tem a expectativa de que ele se comporte como tal. Deseja-se utilizar aparelhos telefônicos de prateleira, com discagem a tom (DTMF), o que exige um conversor (ATA) para a interface digital. O CPE fornecido ao assinante frequentemente incorpora essa função.

A rede de dados de voz usualmente utiliza um circuito separado do serviço Internet, e o CPE possui duas interfaces T internas. O provisionamento do serviço pode ser realizado de através da plataforma de gerenciamento remoto do CPE, ou de forma não integrada (CRUZ et al., 2011). No primeiro caso utiliza-se protocolos como o CWMP e o SNMP. No segundo caso os parâmetros específicos do serviço VoIP são extraídos de um arquivo obtido via TFTP, enquanto a interface de rede é configurada via DHCP. O último caso é o mais encontrado.

¹Apenas custo operacional, excluindo custos do CPE e cabeamento

IPTV

A difusão de canais de TV pode ocorrer de duas formas numa rede de acesso. A primeira é utilizar um canal auxiliar no meio físico, multiplexado em frequência com os dados. A segunda é utilizar a rede de dados para difusão através de IP (IPTV). A primeira abordagem é comumente usada por ser mais simples, mantendo o gerenciamento dos serviços de dados e TV isolados. No entanto, o crescimento da grade de canais, a oferta de imagens de maior resolução, e principalmente a popularização do vídeo sob demanda está criando uma tendência de migração para uma plataforma IP unificada.

O gerenciamento do receptor de TV (STB) está fora do escopo deste trabalho, assim como a difusão por canal auxiliar. O serviço IPTV requer banda garantida, e como o *jitter* elevado é mais prejudicial do que a latência elevada, essa característica deve ser monitorada. Tipicamente utiliza-se um circuito dedicado na rede de agregação para garantir a qualidade de experiência do assinante. Assim mesmo, mais de 80% das interrupções do serviço decorrem de problemas no RAN (HU et al., 2010).

O serviço de vídeo sob demanda frequentemente utiliza um circuito previamente estabelecido, compartilhado com todos os assinantes, e não requer configuração dinâmica da rede de agregação. Já o serviço de difusão utiliza grupos Multicast IP para uso eficiente dos recursos, e o RAN modifica-se em resposta as ações do STB. Nessa aplicação, cada canal de TV é transmitido num grupo Multicast próprio, e as grades possíveis são mapeadas em perfis de acesso. Os perfis residem inicialmente no BNG, e são replicados em cada nodo de acesso (AN). Durante a ativação do CPE, o RAN obtém do ASP o perfil associado aquele assinante, e utiliza-o para filtrar requisições de associação IGMP/MLD.

Banda sob demanda

Tecnologias como computação em nuvem e Big-Data estão popularizando-se entre usuários corporativos, e estão criando um novo perfil de consumo de banda na interface WAN. Observam-se picos de demanda de 10 a 20 vezes o valor médio, e com duração de poucas horas. Em alguns cenários o provedor cria planos que incentivam financeiramente o assinante a mover esses picos para horários menos congestionados (SEN et al., 2013b), porém nem sempre isso é possível. O que esses assinantes precisam é de um serviço de Banda sob demanda (*Bandwidth on Demand*, BWoD) que através de uma API permita o redimensionamento da conexão conforme a necessidade, por um período limitado,

evitando desperdício.

Efetivamente o serviço BWoD não é oferecido por operadoras tradicionais. Entre os obstáculos enfrentados, destacam-se dois. O primeiro é a falta de padrões para automatização, exigindo que o operador integre sua plataforma de gerenciamento (OSS/BSS) com sistemas de diferentes fabricantes, através de APIs distintas, o que é oneroso. O impacto pode ser mitigado limitando-se o número de fornecedores, porém essa restrição da concorrência pode elevar o custo de aquisição dos equipamentos. Outro obstáculo é que alterações frequentes das características da rede através de protocolos distribuídos podem gerar instabilidades, provocando uma degradação no desempenho da rede.

Pay for QoS

A recente mudança no perfil do assinante de Internet Banda Larga criou um dilema para os provedores. A expansão de serviços baseados na rede e conteúdo *Over-the-top* (OTT)² gerou uma demanda pela ampliação da infraestrutura, porém esses mesmos consumidores não estão dispostos a custear esse investimento. Nessa circunstância o provedor deve optar entre permitir a degradação dos serviços ou realizar o investimento com a receita atual, reduzindo a rentabilidade do negócio. Frequentemente opta-se pela última.

A possibilidade de permitir a degradação de serviços *best-effort* em favorecimento de serviços *gerenciados*, melhor remunerados, é discutida por Mitra e Wang (2012). Em seu modelo os autores analisam a rentabilidade do provedor na presença dessas duas classes de serviços, e demonstram que o crescimento demasiado de uma gera um incentivo para o provedor expandir a outra, de forma que sempre existam ambas. No entanto, não há garantia de que o serviço *best-effort* receberá recursos suficientes.

Diante da possibilidade de degradação do serviço *best-effort*, uma terceira opção que está surgindo: o ISP participar da receita gerada por serviços OTT, com os assinantes, ou provedores ASP, pagando pela qualidade garantida do serviço recebido (*Pay for QoS*). O serviço implica em diferenciação do tráfego dependendo da origem (provedor ASP) e destino (assinante), uma prática que pode violar regras clássicas de neutralidade de rede. Acredita-se que nos próximos anos a regulamentação do setor em diversos países passará por ajustes, e permitirá algum grau de diferenciação dos fluxos e políticas melhores do que *best-effort* (ONF, 2013c). Onde essa prática não é proibida, como nos EUA, já existem

²Conteúdo *Over-the-top* (OTT) é a distribuição por terceiros de áudio, vídeo e outras mídias aos assinantes do ISP, sem mediação ou controle do mesmo.

casos onde o ISP é remunerado pelo ASP para distribuir conteúdo que demande taxas de transferência elevadas (MA; LUI; MISRA, 2013).

Redes convencionais disponibilizam poucas modalidades de *Pay for QoS*, oferecidas principalmente na forma de serviços gerenciados. Os pacotes dos fluxos prioritários são identificados no CPE, e então trafegam por circuitos diferenciados previamente estabelecidos pela engenharia de tráfego. A operadora pode requerer vários dias para disponibilizar esse serviço, e seu custo é proibitivo para clientes domésticos.

Roteadores Gerenciados (MRCP)

Um serviço popular entre usuários corporativos é a contratação de roteadores gerenciados pela operadora (*Managed Router on Customer Premises*). Essa modalidade permite que essas empresas usufruam de serviços sofisticados de rede, sem despendem o investimento em equipamentos e técnicos especializados. O serviço também é vantajoso para a operadora ao reduzir os erros de configuração que geram insatisfação e desistência dos assinantes (Accenture, 2008).

Os roteadores utilizados nesse serviço são mais sofisticados do que os CPEs de acesso doméstico, e tipicamente mais caros. Uma vez que não há padronização de interfaces de configuração, é necessário um treinamento específico para correta instalação e configuração de cada modelo. Não é possível manter o corpo técnico qualificado em todas as plataformas, o que leva a operadora a restringir o número de fornecedores homologados para cada serviço.

A evolução do serviço depende do fabricante oferecer um novo *firmware*, e isso combinado com o volume e dispersão geográfica desses equipamentos gera um grande desafio operacional. Tipicamente gasta-se entre 12 e 18 meses para planejar, testar e executar uma atualização de um serviço existente. O custo operacional médio dessa atualização entre os clientes da Parks era de R\$450,00 por CPE no ano de 2015.

3 REDES DEFINIDAS POR SOFTWARE

Redes definidas por software (SDN) são uma abordagem recente para o projeto e operação de redes de computadores. Enquanto em sistemas convencionais o plano de controle está fortemente acoplado aos equipamentos de rede, em sistemas SDN este é exercido por uma entidade externa, logicamente centralizada e totalmente programável chamada Controlador. O plano de dados é simplificado, com uma interface de configuração padronizada, e os equipamentos precisam apenas classificar os pacotes de dados nos fluxos definidos pelo Controlador e adotar as ações especificadas pelo mesmo.

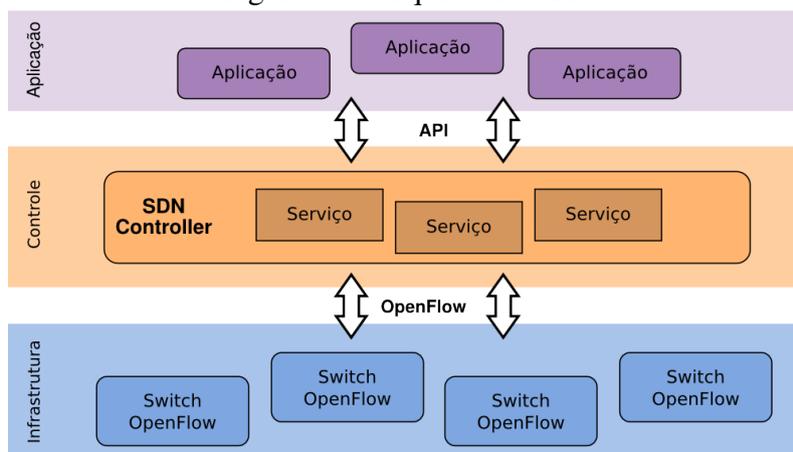
A principal vantagem da abordagem SDN é que a funcionalidade da rede pode ser definida após a implantação da mesma, sob controle do operador da rede. Novos serviços podem ser adicionados no controlador, sem modificar os equipamentos do plano de dados. A rede passa a evoluir no ritmo de software e não mais de órgãos normativos e da indústria eletrônica. É possível explorar novas técnicas de manutenção de estado, sejam distribuídas, centralizadas ou híbridas. A separação de camadas do modelo TCP/IP perde força, pois para um switch SDN o pacote é um trem de bits e a fronteira entre os cabeçalhos de protocolo não tem relevância.

A arquitetura SDN (Figura 3.1) é baseada em três camadas: infraestrutura, controle e aplicação. A camada de *Infraestrutura* consiste de switches e roteadores, físicos e virtuais, que implementam uma arquitetura lógica comum. A camada de *Controle* contém um plano de controle logicamente centralizado, o controlador SDN, onde o sistema operacional de rede (NOS)¹ é executado. O NOS é responsável por abstrair a infraestrutura sob o controlador e oferecer uma visão homogênea e consolidada dos recursos para as aplicações acima dele. Esse sistema utiliza três interfaces distintas de comunicação para interagir com as aplicações, com outros controladores e com substrato de rede. Finalmente, na camada de *Aplicação* estão as aplicações de usuário, de orquestramento de recursos e serviços de rede. Estas utilizam a abstração oferecida pelo controlador SDN para gerenciar elementos virtualizados.

Tornar o conceito de SDN numa implementação de uso geral requer que pelo menos dois requisitos sejam atendidos. Primeiro deve existir uma arquitetura lógica comum a todos os elementos de rede que o controlador SDN irá gerenciar. Segundo, é

¹Originalmente *sistema operacional de rede* designava um sistema operacional com funcionalidades de rede, como suporte a pilha TCP/IP. O termo caiu em desuso quando a Internet se popularizou e essas características se tornaram comuns. No contexto SDN essa designação foi adotada para indicar um sistema que provê uma interface de controle de rede programável.

Figura 3.1: Arquitetura SDN



necessário um protocolo padronizado para comunicação desses elementos. Ambos os requisitos são atendidos pelo OpenFlow (ONF, 2015), que é tanto um protocolo quanto a especificação da estrutura lógica dos elementos de rede. O consórcio Open Networking Foundation (ONF) é atualmente responsável pela elaboração e promoção deste padrão. Atualmente o uso do padrão OpenFlow em redes SDN é tão difundido que frequentemente os dois se confundem, apesar de SDN ser um conceito mais amplo.

O OpenFlow foi apresentado por McKeown et al. (2008) como uma forma de viabilizar o uso de protocolos experimentais na infraestrutura da rede de produção, sem que o tráfego normal seja afetado nem requerendo alterações frequentes no *firmware* desses elementos. O trabalho foi motivado pela constatação de que não havia um método eficaz de validar novas propostas, o que por sua vez inibia a adoção em larga escala. Equipamentos de rede tipicamente tem um acoplamento forte entre seus componentes de hardware e software, e seus fabricantes não oferecem interfaces abertas que permitam alterações no comportamento de qualquer módulo. A virtualização da rede foi vista como uma alternativa, mas os esforços para criar redes programáveis de larga escala se mostraram custosos, pois soluções como o *Click* (KOHLENER et al., 2000) e o *XORP* (HANDLEY; HODSON; KOHLER, 2003) não tem a performance nem a densidade de portas desejada.

O OpenFlow apresenta similaridades com soluções anteriores, como o *4D* (GREENBERG et al., 2005) e o *Ethane* (CASADO et al., 2007). A proposta 4D é uma arquitetura nova composta por quatro planos: Decisão, Disseminação, Descoberta e Dados. Existe o princípio de um plano de controle desacoplado dos elementos de rede, e de um plano de dados simplificado. O plano de Descoberta tem a função de obter a topologia da rede e as capacidades de cada elemento. O plano de Disseminação é usado para comunicação do estado dos planos de Dados e Descoberta para o de Decisão, e de configurações

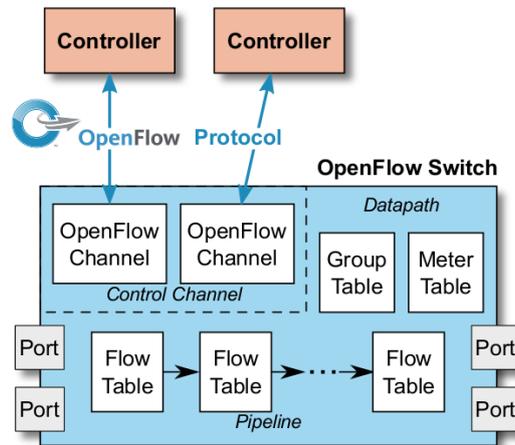
deste até a camada de dados. O plano de Decisão combina algumas atribuições do NOS e de aplicações do SDN, enquanto o plano de Descoberta não existe nesta abordagem e suas funções podem ser exercidas por uma aplicação comum. Apesar do OpenFlow definir um protocolo para comunicação do controlador com os elementos de rede, existe uma lacuna sobre como as funções do plano de Disseminação são suportadas, especialmente como se estabelece a conectividade entre os planos de controle e dados.

O Ethane pode ser considerado um precursor do OpenFlow, com uma arquitetura muito similar onde existem um controlador e switches especializados. Esta proposta é focada em segurança, e se dá ênfase ao controle de acesso de usuários através de políticas pré-estabelecidas. A manipulação do plano de dados é análoga ao OpenFlow, com cada elemento de rede possuindo uma tabela de fluxos preenchida pelo controlador. Ao contrário do 4D, o Ethane é uma evolução da arquitetura existente e permite uma implantação gradual. O principal diferencial da abordagem OpenFlow é uma maior flexibilidade obtida com o controlador programável via API, enquanto o Ethane utiliza uma linguagem limitada para descrever políticas de encaminhamento de pacotes. O OpenFlow também suporta uma gama maior de opções no classificador de fluxos, além de novas ações.

O plano de controle programável da arquitetura SDN representa uma mudança significativa na forma de implementar redes de computadores. Funcionalidades passam a ser programadas através de um modelo centralizado, em contraste com as aplicações distribuídas utilizadas atualmente. Privilegia-se o uso de abstrações de alto nível, como usuários e serviços, ao invés de endereços físicos dos elementos. O impacto desejado é similar ao do surgimento dos sistemas operacionais de computadores, que simplificaram o desenvolvimento de aplicações ao fornecer abstrações de alto nível para recursos de *hardware* e informações armazenadas (GUDE et al., 2008). Para tanto se propõe o uso de *sistemas operacionais de rede* (NOS).

Um sistema operacional de rede (NOS) é executado em Controladores SDN, e tipicamente é um sistema distribuído para aumentar a escalabilidade e resiliência da arquitetura. As principais funções do NOS são manter a vista de rede e realizar a tradução de abstrações de alto nível em elementos físicos. A *vista de rede* (*network view*) é uma consolidação dos dados coletados pelos Controladores, e a escolha da granularidade desses dados é crucial para o equilíbrio entre escalabilidade e flexibilidade. Deseja-se que a representação da rede seja concreta o suficiente para realizar as tarefas típicas de administração, e ao mesmo tempo abstrata ao ponto de não modificar-se rapidamente. A solução encontrada é utilizar o nível dos switches, os elementos do plano de dados, porém sem

Figura 3.2: Switch OpenFlow (ONF, 2015)



o estado do tráfego de dados. O controle da rede é exercido no nível de fluxos, uma sequência de pacotes que compartilham características como o valor de alguns campos de cabeçalho. Novamente essa escolha é um compromisso entre o controle por pacote, inviável num sistema centralizado para topologias de qualquer escala, e regras por prefixo IP, que não permitem a diferenciação de serviços.

Assim como um sistema operacional convencional, o NOS deve prover interfaces padronizadas para que aplicações possam ser desenvolvidas sem que manipulem recursos de *hardware* diretamente. Serviços tipicamente oferecidos incluem pesquisa na vista de rede, captura de pacotes, temporizadores, armazenamento de dados e programação dos elementos de rede. A interface desses serviços, chamada *Northbound API*, é específica de cada implementação de NOS, e no momento não há preocupação com a portabilidade de sistemas. A construção da vista de rede e a programação dos switches também exige uma interface bem estabelecida, o *Southbound API*. Atualmente o padrão de mercado para essa interface é o protocolo OpenFlow.

O *Switch OpenFlow* proposto por McKeown et al. é orientado a fluxo de pacotes. Explora-se os *flow-tables* (tabelas de fluxo) de equipamentos de rede, recursos tipicamente presentes em *hardware* modernos. Normalmente construídos com TCAMs, esses componentes têm desempenho superior ao necessário para atingir a taxa de dados nominal das interfaces, porém cada fabricante usa critérios de classificação de fluxo diferentes, além de um conjunto distinto de ações possíveis sobre estes. Os autores identificaram um conjunto de funcionalidades pequeno que é comum a maioria das implementações, e que ao mesmo tempo é grande o suficiente para permitir a flexibilidade de programação desejada.

Os principais componentes da arquitetura lógica de um switch OpenFlow (Fi-

gura 3.2) são uma ou mais tabelas *flow-table*, uma tabela *group-table* e um canal de comunicação *OpenFlow Channel*. A versão corrente do padrão (ONF, 2015) descreve um terceiro tipo de tabela chamada *meter-table*, opcional, usada para implementar QoS por fluxo. Através do protocolo OpenFlow o controlador SDN pode adicionar, modificar e remover entradas de um *flow-table*, tanto reativamente, ao receber um pacote, quanto proativamente, devido a decisões tomadas pelas aplicações.

O switch tem *Portas OpenFlow*, que são interfaces de rede por onde os pacotes entram e saem do dispositivo. É mandatório o suporte a portas físicas, lógicas e reservadas. O primeiro tipo representa as portas presentes no *hardware*, tipicamente num mapeamento um-para-um². As portas lógicas são abstrações de nível mais alto, como um túnel ou agregação de enlaces. A configuração destas abstrações não faz parte do escopo do OpenFlow, e estas portas devem se comportar como uma porta física. As portas reservadas exercem funções especiais, como enviar o pacote ao controlador ou desviar o processamento para outro *flow-table*.

Um pacote de dados tem associado meta-informações durante seu processamento pelo switch OpenFlow. Algumas delas podem ser utilizadas pelo classificador, por exemplo a porta de ingresso e o identificador de túnel (*Tunnel-ID*). Este último é preenchido apenas por portas lógicas, e seu significado exato depende do tipo de porta. Existem ainda meta-informações usadas pelo processamento, como o *Action-Set* que dita as transformações que o pacote sofrerá. Nem todas as ações previstas no padrão são mandatórias, e os equipamentos devem implementar um conjunto mínimo contemplando o descarte do pacote e o seu encaminhamento para uma porta, para o controlador e para uma entrada em *group-table*. Esta tabela permite *multicast*, *broadcast* e balanceamento de carga, entre outros serviços.

O número de tabelas *flow-table* presentes nos elementos de rede não é padronizado, somente se requer que exista ao menos uma. Quando existem duas ou mais é possível criar um *pipeline* de processamento. O número de entradas em cada tabela também não é determinado pelo padrão, e cabe ao Controlador monitorar o uso e implementar políticas de substituição. Cada tabela é composta de entradas com a seguinte estrutura:

- classificador, que usa valores de campos de protocolos, a porta de ingresso e meta-informações;
- uma prioridade indicando a precedência desta entrada;

²O switch pode ser virtual, e nesse caso uma *porta física* seria uma porta virtualizada e não uma porta do *hardware*

- contadores atualizados quando um pacote é associado a esta entrada;
- instruções para processamento;
- temporizadores controlando o tempo de vida desta entrada na tabela; e
- um *cookie*, um valor opaco definido pelo controlador (não é usado pelo switch).

A manutenção destas tabelas é feita pelo Controlador SDN, que utiliza o protocolo OpenFlow para modificá-las. O classificador e a prioridade formam o identificador de cada entrada, usado na alteração e remoção de entradas. Os fluxos descritos em *flow-table* podem ser estáticos ou dinâmicos, no último caso um temporizador controla o tempo de vida da entrada. Pode-se usar um tempo absoluto desde a sua criação ou o período de inatividade como critério de expiração. O Controlador SDN é notificado quando ocorre um evento de expiração.

O padrão OpenFlow prevê a existência de dois tipos de switch. A versão *OpenFlow-only* trabalha exclusivamente com o modelo OpenFlow, não possuindo qualquer autonomia. Fluxos são classificados usando todos os critérios disponíveis, limitados pela implementação do *flow-table* no *hardware*. Cabeçalhos de qualquer camada podem ser acessados, inclusive protocolos não padronizados. A segunda versão de switch, *OpenFlow-hybrid*, é aquela com suporte ao OpenFlow mas que também possui um plano de controle tradicional, logicamente existindo dois *pipelines* de encaminhamento. Deve existir um classificador na admissão dos pacotes que decida qual mecanismo utilizar, mas o funcionamento desse componente não faz parte do escopo do padrão. Nesses equipamentos o encaminhamento OpenFlow suporta uma ação de direcionar o pacote para o processamento normal.

Enquanto o protocolo OpenFlow gerencia o plano de dados do switch, o protocolo *OF-Config* (ONF, 2013b) controla parâmetros operacionais. Esta especificação define um contexto operacional chamado *OpenFlow Capable Switch*, um dispositivo físico ou virtualizado que contém recursos que podem ser associados a um ou mais *OpenFlow Logical Switches*. Esses últimos são instâncias da arquitetura lógica definida anteriormente. O OF-Config é codificado em XML e transportado por mensagens do protocolo NETCONF (RFC-6241).

Desde o final de 2009, quando a primeira versão estável foi publicada, a especificação OpenFlow sofreu diversas revisões, algumas apenas esclarecendo comportamentos, enquanto outras modificaram mensagens ou até mesmo a arquitetura de referência. A tabela 3.1 elenca as principais modificações introduzidas. Tipicamente as evoluções são incrementais, porém a introdução de TLV's gerou uma quebra de compatibilidade entre

Tabela 3.1: Evolução do padrão OpenFlow

Publicação	Versão	Principais Alterações
31/12/2009 - 1.0	0x01	versão inicial
28/02/2011 - 1.1	0x02	múltiplas tabelas de fluxo, configuração de grupos e portas virtuais
05/12/2011 - 1.2	0x03	OpenFlow Extensible Match (OXM) e IPv6
13/04/2012 - 1.3	0x04	contadores por fluxo e canais OpenFlow auxiliares
01/08/2012 - 1.3.1	0x04	melhoria na negociação de versão
25/04/2013 - 1.3.2	0x04	permite conexões iniciadas pelo controlador
05/08/2013 - 1.4.0	0x05	mensagens alteradas para usar TLV's, suporte a portas óticas, monitoramento de alteração em fluxo, operações em lote
27/09/2013 - 1.3.3	0x04	registra porta TCP 6653 no IANA
27/03/2014 - 1.3.4	0x04	corrige uso do <i>shim</i> MPLS
16/12/2014 - 1.5.0	0x06	tabelas de <i>egress</i> , OpenFlow eXtensible Statistics (OXS), operações agendadas
26/03/2015 - 1.3.5	0x04	adiciona transportes alternativos
26/03/2015 - 1.4.1	0x05	clarificações sobre a versão 1.4.0
26/03/2015 - 1.5.1	0x06	clarificações sobre a versão 1.5.0

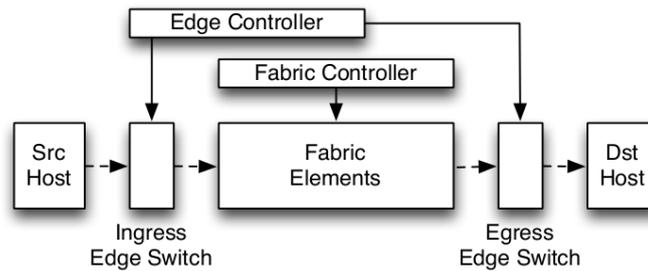
Fonte: ONF (2015)

as versões 0x04 e 0x05. Controladores OpenFlow tipicamente suportam diversas implementações simultaneamente, e durante o estabelecimento do canal seguro existe uma negociação da versão e de extensões a serem utilizadas.

A utilização do padrão OpenFlow em um switch torna seu projeto simples e duradouro, já que toda a evolução é feita no plano de controle. No entanto o emprego desse projeto gera novos desafios para os fabricantes, alguns investigados por Curtis et al. (2011). A principal constatação dos autores é que o típico switch *OpenFlow-hybrid*, o mais encontrado atualmente, possui um processador hospedeiro de pequena capacidade. No modo OpenFlow essa CPU passa a responder por toda a comunicação entre o switch e o Controlador, provocando uma degradação expressiva no desempenho. Isso é corroborado pelo trabalho de Pongrácz et al. (2013), que conclui que o impacto no desempenho ao tornar o switch programável é negligenciável. Curtis et al. também argumentam que o objetivo de controle e visibilidade total do Controlador é muito ambicioso e gera os problemas de escalabilidade descritos. Ambas as questões ainda são tema de debate na indústria.

Já Casado et al. (2012) questiona a união das interfaces *Host-Network* e *Packet-Switch*, cuja separação no padrão MPLS é considerada por muitos uma evolução em relação a Internet original. Em redes existentes o cabeçalho IP do pacote é avaliado apenas

Figura 3.3: Extensão do modelo SDN (CASADO et al., 2012)



na rede de borda, a partir do qual um novo cabeçalho L2 (*shim*) é inserido. Os equipamentos do núcleo da rede podem utilizar apenas o *shim* para tomar decisões sobre o encaminhamento do pacote. Numa rede baseada no padrão OpenFlow, por outro lado, todos os equipamentos devem ser capazes de avaliar todos os cabeçalhos presentes. Os autores identificam três problemas nessa abordagem. O primeiro é que o *hardware* não é simplificado como propagandeado. Um switch nesse padrão deve ser capaz de avaliar todos os cabeçalhos presentes, potencialmente fazendo comparações e pesquisas com centenas de bits. Um switch de núcleo MPLS analisa apenas o *shim*, com poucas dezenas de bits. O segundo problema é que a interface *Host-Network* evolui rapidamente, gerando novos requisitos no classificador de pacotes. O padrão OpenFlow demanda que todos os equipamentos sejam atualizados para suportar esses novos cabeçalhos, ao invés de apenas aqueles na borda da rede. Por fim essa abordagem atrela desnecessariamente os *hosts* e o núcleo da rede. Uma alteração no comportamento dos clientes, por exemplo adotando o protocolo IPv6, exige interações com todos os equipamentos. O padrão MPLS permite abstrair esse tipo de alteração.

A proposta de Casado et al. para corrigir essas limitações do modelo SDN visto atualmente é a introdução de um novo elemento, chamado *network fabric* (Figura 3.3). Conceitualmente o que se propõe é a separação do protocolo OpenFlow em duas variações, uma para a borda e outra para o núcleo da rede. Atualmente o protocolo foi definido para suportar os recursos comumente encontrados em switches, o que é insuficiente na interface *Host-Network* e excessiva em *Packet-Switch*. Na proposta a versão de borda é mais flexível que a atual, enquanto no *fabric* suporta-se uma variação do modelo MPLS.

Os switches do *fabric* têm um conjunto limitado de ações, restringindo-se ao encaminhamento dos pacotes a partir uma marca inserida na borda. Conformação do tráfego deve ser feita fora do núcleo, assim como restrições de acesso. Manter a simplicidade do núcleo é essencial para manter a neutralidade de fabricantes, outra promessa do OpenFlow. Adicionar recursos além do estritamente necessário permite que alguns os imple-

mentem, buscando um diferencial, enquanto outros não o façam, buscando um menor custo. Esse fenômeno já ocorre com os equipamentos existentes, onde alguns fabricantes seguem utilizando a versão 1.0 do protocolo para evitar a complexidade adicionada nas versões seguintes.

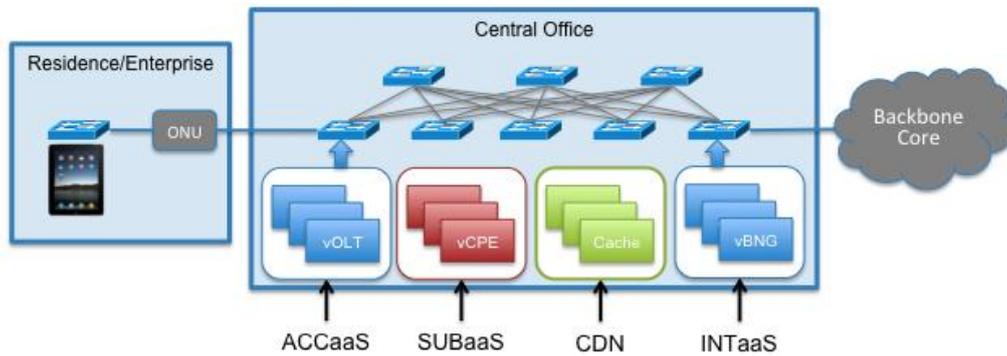
3.1 Uso de SDN em redes de Acesso Banda larga

Assim como ocorreu em *datacenters*, muitos vislumbraram benefícios na adoção de SDN em redes de operadoras e provedores de acesso. A NTT fez testes promissores com redes de transporte Ethernet (ONF, 2013a), enquanto Naudts et al. (2012) e Costa-Requena, Guasch e Santos (2015) estudaram seu emprego em redes móveis. A implementação de *operadoras virtuais*, que devem tornar-se comuns no futuro, foi discutida por Yiakoumis et al. (2011). Em todos esses casos, a adoção do paradigma SDN promoveu o uso mais eficiente dos recursos, consequentemente reduzindo os custos relacionados a infraestrutura (CAPEX e OPEX).

Empregar o paradigma SDN em redes de acesso e agregação pode oferecer vantagens além da redução de custos (KERPEZ et al., 2014). Permite que continuamente desenvolva-se novos produtos com pouco, ou nenhum, investimento em novos equipamentos ou *firmwares*. O uso de SDN também possibilita novas formas de gerenciar a rede, através da visão centralizada do Controlador. Atualmente o plano de Controle do provedor é uma composição de sistemas especializados produzidos por diferentes fornecedores, e o ISP é responsável por integrar todos eles.

O emprego efetivo de redes definidas por software ainda não é difundido em operadoras e provedores (SDN Central, 2013). A lenta adoção do mercado é justificada por diversos fatores, entre os quais destacamos dois. O primeiro é a falta de padronização das interfaces de programação, o que dificulta a interoperação de sistemas de fabricantes diferentes. Apenas a interface *Southbound* tem um protocolo bem estabelecido, o OpenFlow, e mesmo esse é considerado um padrão em desenvolvimento devido as frequentes versões publicadas (Tabela 3.1). O segundo fator é que propriedades importantes das redes RAN ainda são objetos de estudo no novo paradigma, como resiliência (STAESSENS et al., 2011; ARAUJO et al., 2014; PETRY; SILVA; BARCELLOS, 2015), escalabilidade (YU et al., 2010; CURTIS et al., 2011; YEGANEH; TOOTOONCHIAN; GANJALI, 2013) e interoperabilidade (SEZER et al., 2013). As distâncias em redes de acesso são muito superiores aquelas vistas em *datacenters*, na ordem de dezenas de quilômetros, o que torna

Figura 3.4: Visão geral da arquitetura CORD (ON.Lab, 2015b)



a localização do Controlador outro problema não resolvido (HELLER; SHERWOOD; MCKEOWN, 2012; MÜLLER et al., 2014).

Uma abordagem para contornar as limitações existentes é mapear o problema numa solução conhecida. Um exemplo é a recente iniciativa *Central Office re-architected as a Datacenter* (ON.Lab, 2015a), ou *CORD*, que transforma o RAN num *datacenter*. O projeto é promovido pela operadora norte-americana AT&T, que além de definir os principais requisitos técnicos e também mobiliza seus parceiros na indústria para viabilizar o modelo. A implementação de referência é focada no serviço de acesso Banda Larga, e utiliza a tecnologia GPON. O projeto é inteiramente construído com software e hardware abertos. O funcionamento dos conceitos e componentes do CORD foi demonstrado em simpósios e convenções no último ano, porém não há previsão para o início da operação comercial.

A solução CORD utiliza a técnica de virtualização de funções de rede (NFV) para substituir equipamentos especializados por equivalentes virtuais. Essas funções executam em máquinas virtuais providas por um orquestrador de recursos em nuvem (OpenStack), e utilizam um controlador SDN (ONOS) para prover conectividade entre os elementos virtualizados. O projeto desenvolveu um orquestrador de serviços, chamado *XOS* (ON.Lab, 2015d), que combina os três sistemas para fornecer uma abstração de alto nível que denominaram *tudo-como-um-serviço* (XaaS). Há três implementações de XaaS de interesse. A primeira é *acesso-como-um-serviço* (ACCaaS), que virtualiza o *Access Node* (OLT). A segunda é chamada *assinante-como-um-serviço* (SUBaaS), que transfere a maior parte das funções do CPE para um VM na nuvem. Já a terceira, *Internet-como-um-serviço* (INTaaS), virtualiza o BNG. A Figura 3.4 mostra o encadeamento desses componentes XaaS para implementar todas as funções do RAN dentro do *datacenter*.

Além de diversos componentes de software aberto, o CORD também disponibilizou projetos de hardware especializados, que estendem o paradigma SDN para além de

switches. Esses equipamentos são necessários por serviços como o ACCaaS, que utiliza um *Access Node* GPON (OLT) com um agente OpenFlow integrado (OCP, 2015). Assim como ocorreu nos switches, esse OLT foi reduzido aos componentes mínimos, essencialmente um conversor entre os meios GPON e Ethernet, e o plano de controle foi movido para o Controlador.

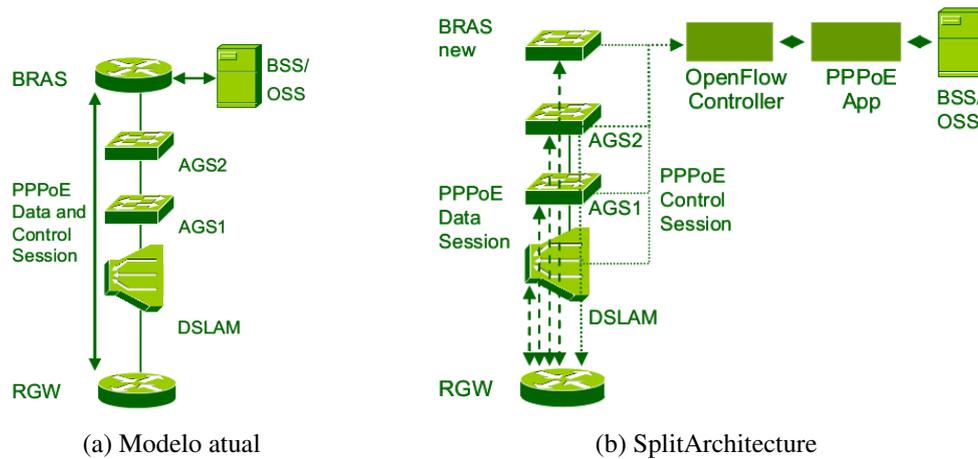
O CORD pode ser considerado uma evolução da arquitetura *SplitArchitecture* (KIND et al., 2012), proposta do projeto SPARC da União Europeia. O objetivo do SPARC foi implementar uma divisão na arquitetura de roteamento IP na Internet, separando os planos de dados e controle através do paradigma de redes definidas por software. A abordagem de ambos foi semelhante, substituir elementos especializados utilizados atualmente por equipamentos compatíveis com o protocolo OpenFlow, e então virtualizar esses serviços. A principal diferença em relação ao CORD é que evitou-se a necessidade de desenvolver hardware, já que os CPEs, *Access Nodes* e switches OpenFlow utilizados são produtos comerciais. Esta abordagem permite uma migração gradual de redes existentes, reutilizando a infraestrutura do ISP.

O primeiro caso de estudo do *SplitArchitecture* foi uma rede de acesso baseada na arquitetura TR-101, que utiliza um serviço de sessão PPPoE (Figura 3.5a). Nessa aplicação existe um roteador (RGW) em cada cliente, onde inicia-se um túnel PPP transportado sobre Ethernet. Existe um equipamento para terminação da tecnologia de acesso, um DSLAN no caso de ADSL/VDSL ou um OLT para FTTx, além alguns switches L2 de agregação. O túnel PPP é terminado num *Broadband Remote Access Server* (BRAS), onde os pacotes são desencapsulados e transmitidos através da rede da operadora. Esse servidor também é responsável pela verificação de credenciais e contabilidade do volume de dados utilizado por cada usuário.

A proposta (Figura 3.5b) substitui o BRAS por um switch OpenFlow capaz de terminar o túnel PPP. O estabelecimento desses túneis pode ser feito através do protocolo OF-Config, e então eles passam a ser vistos pelo Controlador como uma porta do switch. O plano de controle do PPPoE é desviado para o Controlador no primeiro nó compatível com o OpenFlow, e passa a ser tratado por uma aplicação. Elimina-se dessa forma o principal gargalo desse tipo de rede, o BRAS, e possibilita-se políticas de serviço mais flexíveis. Outra vantagem dessa abordagem é permitir a troca de tecnologia sem modificações profundas na infraestrutura. Um exemplo é a troca do acesso via túneis PPPoE por sessões IP configuradas via DHCP, onde apenas a aplicação precisa ser modificada.

O projeto SPARC foi concluído em 2012, com a disponibilização de diversos ar-

Figura 3.5: Serviço PPPoE com SplitArchitecture (KIND et al., 2012)



tefatos, tais como a arquitetura de referência para redes de acesso, mecanismos para emulação de serviços MPLS sobre OpenFlow e um plano de controle recursivo, onde cada domínio SDN é visto como um elemento de rede para os domínios de nível superior. Para viabilizar esta solução foram necessárias extensões aos protocolos OpenFlow e OF-Config, muitas ainda em análise pelo ONF.

O impacto financeiro da migração para o SplitArchitecture também foi analisado pelo projeto, que concluiu que a adoção de SDN em redes de acesso deve gerar uma redução de 12,0% no custo de equipamentos (CAPEX) e de 10,7% no custo operacional (OPEX) (SPARC, 2012). Os fatores que permitem uma economia no investimento em capital são o menor custo dos switches OpenFlow, quando comparados a roteadores MPLS com capacidade de tráfego agregado semelhante, e a dispensa de algumas das licenças de software, principalmente de VPN entre alguns sítios. Essas reduções compensam o valor gasto com Controladores OpenFlow e com o desenvolvimento de aplicações para o mesmo. A redução dos custos operacionais deve-se principalmente à automação de rotinas, e atinge 3,0% no provisionamento e 6,0% no gerenciamento de serviços. Espera-se um pequeno acréscimo (0,5%) no custo de manutenção de infraestrutura devido a introdução de Controladores em *datacenters*.

A economia prevista pelo modelo SPARC depende de algumas condições. A principal é a existência de software livre de alta qualidade para uso nos Controladores. Apesar de ser uma incógnita no término do projeto, atualmente existem pelo menos duas alternativas que devem atender os requisitos do SplitArchitecture: ONOS (ON.Lab, 2015c) e OpenDaylight (ODL, 2013). Outra premissa é que os *Secure Channel's* dos switches sejam transportados por fibras óticas ociosas em cabos já existentes. Apenas a aquisição de transceptores óticos foi prevista, sem o lançamento de novos cabos, algo que pode

comprometer a redução de CAPEX prevista.

As demais incertezas descritas no relatório final do SPARC são: custo de um Controlador (hardware), número de elementos OpenFlow suportado por Controlador, variação do preço de atacado de equipamentos OpenFlow em compras de grande volume, variação de preços de roteadores em resposta ao surgimento do mercado OpenFlow, variação de preços de switches devido a concorrência entre fabricantes. A análise de sensibilidade sobre esses parâmetros mostrou que o cenário SplitArchitecture é vantajoso mesmo com grandes variações das entradas.

3.2 Serviços

A migração de redes de acesso convencionais para o paradigma SDN representa também uma mudança na gerência da rede, o que geralmente é justificado por dois objetivos (FUJITSU, 2013). O primeiro é simplificar o sistema para permitir que serviços sejam disponibilizados mais rapidamente. O segundo é racionalizar o uso dos recursos, gerando redução de custos de operação, ou ainda incrementando as receitas.

Enquanto o tempo de espera por um serviço e a geração de receitas são fáceis de mensurar, a redução de custos de operação (OPEX) é difícil de verificar-se na prática (Plexxi, 2014). Uma explicação é que a redução na quantidade de Homem-Hora gasta em cada tarefa tipicamente não reflete-se na eliminação de postos de trabalho, e sim em tarefas adicionais que a mesma equipe pode desempenhar. Demonstrar a relação entre as novas oportunidades e o ganho de eficiência proporcionado pela automação pode ser complexo em algumas organizações.

Além do impacto operacional, mover o plano de controle para um elemento centralizado pode aumentar o tráfego associado com a operação da rede. Isto é indesejado em redes de operadoras, pois ao contrário de *datacenters* onde há redes dedicadas ao tráfego OpenFlow, em operadoras esses pacotes compartilham os mesmos canais que os dados dos assinantes. Dessa forma, a capacidade alocada para controle é subtraída daquela que pode ser comercializada, e impacta na rentabilidade da infraestrutura.

Os serviços apresentados na seção 2.1 podem ser classificados em quatro classes de acordo com o impacto do modelo SDN em sua operação. A primeira reúne aqueles que dependem de comunicação constante entre os elementos do RAN. A segunda representa funções de rede virtualizadas, enquanto a terceira contém os serviços de engenharia de tráfego. Por fim, a última classe compreende as aplicações *over-the-top* (OTT).

Serviços com comunicação constante

Os serviços de Internet Banda Larga e IPTV exemplificam a primeira classe, a mais afetada pela mudança de arquitetura. Existe um aumento do tráfego de controle, principalmente aquele associado à manutenção das sessões de assinante. Ao mover essa função para o Controlador, também é preciso transferir o estado do BNG e a comunicação com os elementos de acesso. No caso do IPTV é a sinalização Multicast (IGMP/MLD) que deve ser mediada pelo Controlador.

Funções de rede virtualizadas

Roteadores gerenciados (MRCP) são um exemplo de função de rede que pode ser virtualizada, permitindo que o roteador tradicional seja substituído por um demarcador (EDD) OpenFlow. Ao custo de capacidade de processamento no *datacenter*, essa abordagem reduz o tempo de homologação de aplicações ao tornar a planta mais homogênea, e dispensa as interfaces de configuração proprietárias. Roteadores virtuais podem ser personalizados segundo as necessidades de cada cliente, e novas funcionalidades podem ser adicionadas sem interrupção do serviço.

Aplicações de engenharia de tráfego

Aplicações de engenharia de tráfego compreendem os serviços de Banda sob Demanda (BWoD) e Pay for QoS. Aplicações de roteamento e balanceamento de carga do Controlador são utilizadas para estabelecer caminhos diferenciados, e o protocolo OpenFlow para configurar os elementos de rede. O processo é semelhante ao utilizado na rede convencional, porém a adoção de uma única interface de configuração viabiliza a sua automatização. A visão centralizada da rede facilita o monitoramento, reduzindo o custo associado com penalidades por violação de contrato (SLA). Utilizar uma rede programável permite oferecer esse serviço por fluxo IP, e o próprio assinante poderia, através de um portal, requerer um tratamento diferenciado.

Serviços *Over-the-top*

A classe de serviços OTT pode ser exemplificada pelo VoIP. Uma vez que esses serviços interagem pouco com a rede de acesso e estão fora do controle administrativo do operador, tanto o benefício quanto o impacto do modelo SDN sobre sua operação é pequeno.

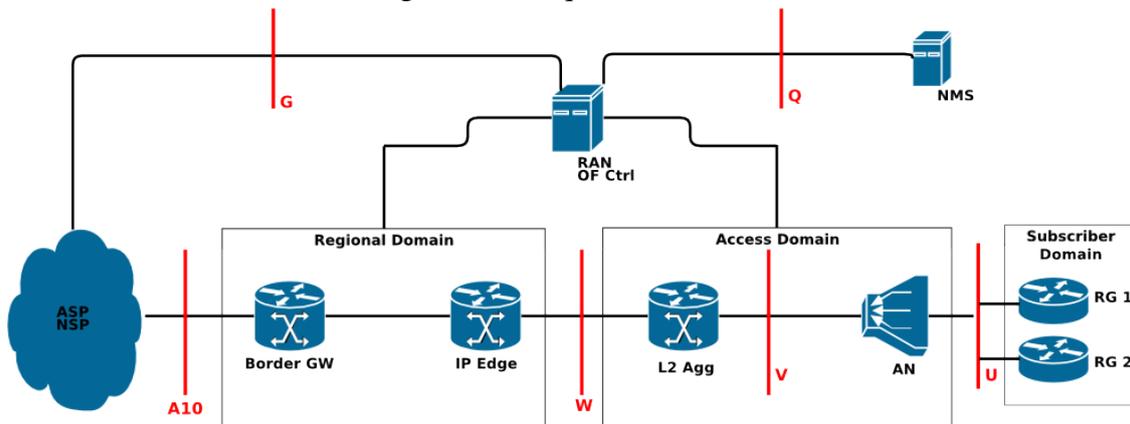
3.3 Arquitetura SDCN

O presente trabalho foi desenvolvido no contexto do projeto SDCN, um convênio entre o Instituto de Informática da UFRGS e a Parks S/A Comunicações Digitais. O projeto teve como objetivo investigar a aplicação dos conceitos de SDN as redes de acesso GPON. Uma das metas do projeto era estudar estratégias de migração das arquiteturas TR-101 (BBF, 2011) e TR-144 (BBF, 2007) para o novo modelo.

Tanto a proposta SplitArchitecture quando a CORD foram avaliadas durante o projeto. A primeira oferece um caminho para a migração gradual entre o modelo atual e uma rede SDN, em contraste com segunda, que representa uma quebra de conceito. Pequenos provedores, o mercado alvo da Parks, devem optar pela primeira, já que frequentemente não possuem experiência em construir e manter um *datacenter*, e não atuam em regiões com grande concentração de assinantes, o que é fundamental para manter as distâncias curtas e para beneficiar-se da economia de escala. Por esse motivo este projeto focou numa proposta de arquitetura de rede definida em software inspirada no SplitArchitecture, que também foi denominada *SDCN*.

O SDCN é uma arquitetura de redes de acesso que incorpora o protocolo OpenFlow para virtualizar nodos especializados. Esta proposta utiliza o TR-144 como ponto de partida, e adiciona elementos OpenFlow em pontos de interesse. A abordagem permite que estabeleça-se paralelos entre a infraestrutura existente e aquela proposta. Nesta versão inicial virtualizou-se o BNG, devido a sua localização central na topologia, e manteve-se o *Access Node* convencional. Essa opção é uma simplificação da implementação, e não uma restrição do modelo. Em versões futuras pode-se explorar um AN compatível com OpenFlow, como requerido pelo modelo CORD. Os principais blocos da arquitetura SDCN são apresentados na Figura 3.6, e discutidos a seguir. Alguns aspectos importante, tais como segurança, resiliência e a distribuição de controladores, foram omitidos ou simplificados para tornar o modelo de comparação (cap. 5) mais compreensível.

Figura 3.6: Arquitetura SDCN



- **Border GW** é o equipamento de ligação do provedor com redes de hierarquia mais alta (NSP). Em redes convencionais é um roteador de grande porte, que na proposta SDCN foi virtualizado e substituído por um switch OpenFlow. A interface *A10* representa a sinalização BGP necessária para interconexão entre os sistemas autônomos (AS). A viabilidade dessa implementação em redes SDN foi demonstrada por Bennesby et al. (2012).
- **IP Edge** são switches OpenFlow que substituem os BNG/BRAS na função de terminador das sessões de assinante. Esses switches devem capturar a sinalização originada nos ANs e CPEs e encaminhá-la ao Controlador, onde aplicações virtualizam as funções de controle de sessão. A solução é similar à empregada nas propostas SplitArchitecture e CORD.
- **L2 Aggr** é uma rede de transporte MPLS convertida para o padrão OpenFlow. A viabilidade dessa abordagem foi demonstrada por Kempf et al. (2011).
- **Access Node (AN)** reúne um conversor de meio e um switch. Apesar de existir esforços para definir um elemento gerenciável através dos protocolos OpenFlow e OF-Config (ALSHABIBI; HART, 2016), ainda não existe consenso sobre como será sua interface, e por esse motivo optou-se por manter o *Access Node* convencional.
- **RAN OF-Ctrl** é o Controlador OpenFlow do RAN no padrão SDCN. Neste primeiro momento evitou-se especulações sobre as capacidades e características desse elemento, assumindo que existe apenas um controlador diretamente conectado a todos os switches.
- **RG (CPE)** são os roteadores residenciais e corporativos nas instalações do assinante, porém sob controle do provedor. Assim como feito no caso do AN, o modelo

SDCN mantém os RGs convencionais já existentes.

A proposta apresenta três domínios de rede similares aos do modelo do BBF: *Regional*, *Access* e *Subscriber*. Todos têm os mesmos requisitos funcionais e não-funcionais da rede convencional, e a principal diferença é a programabilidade adquirida com o novo paradigma. O domínio *Regional* abriga os serviços IP do provedor, e compreende os equipamentos desde a interconexão com redes de hierarquia mais alta (*Border GW*) até o *IP edge*. O domínio *Access* engloba a rede de transporte *L2 Aggr* e os *Access Nodes*. Por fim em *Subscriber* estão os RGs colocados nas dependências dos assinantes.

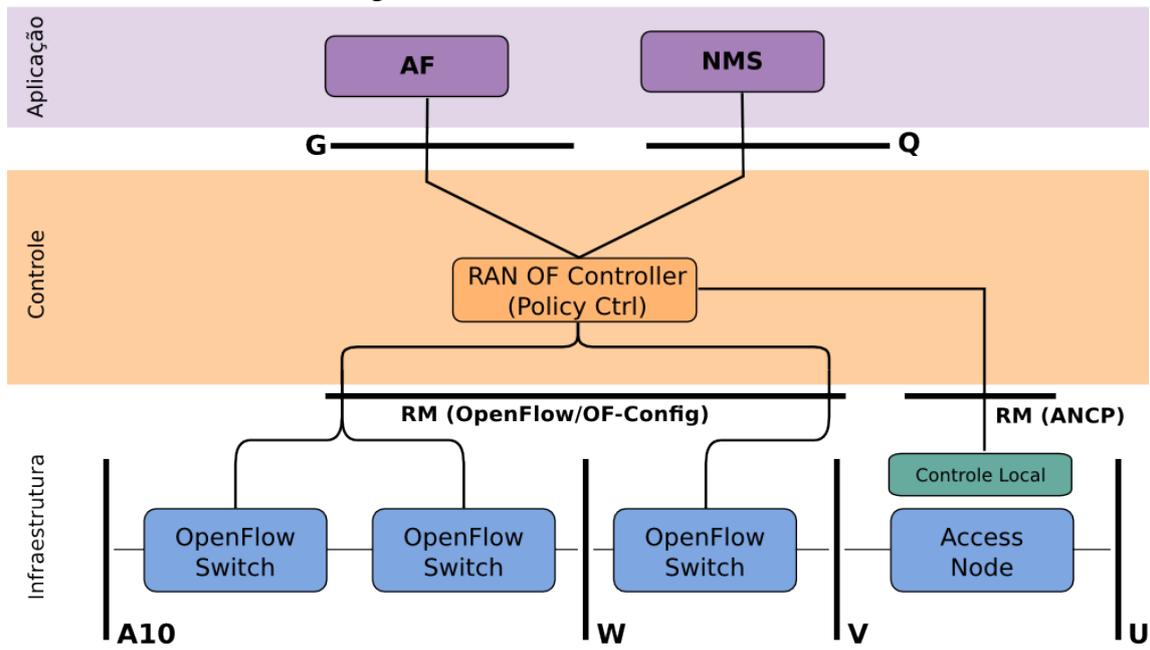
As interfaces *A10* e *U* foram definidas como limites da rede OpenFlow. A primeira é a fronteira do AS do provedor, enquanto a segunda é utilizada como limite entre as redes do provedor e do assinante, na interface WAN do RG. Essas fronteiras são as mesmas utilizadas no SplitArchitecture. Uma alternativa a ser explorada no futuro é substituir os equipamentos existentes por um demarcador de rede OpenFlow, e virtualizar o roteador, como definido no modelo CORD.

O plano de controle resultante é mostrado na Figura 3.7. Como esperado a adoção do modelo SDN eliminou o plano de controle local da maior parte dos elementos, restando apenas aquele associado ao *Access Node*. Enquanto a falta de padronização na arquitetura TR-144 resultou numa profusão de interfaces de gerenciamento, nesta proposta um conjunto reduzido é capaz de configurar e monitorar todos os elementos da rede. Dessa maneira, os pontos de referência *R* e *M* foram combinados em um novo ponto chamado *RM*, e apenas dois protocolos de gerenciamento são necessários: OpenFlow e OF-Config. A exceção é o *Access Node*, que ainda utiliza o protocolo ANCP devido apenas a limitações da implementação.

O novo plano de *Controle* utiliza os princípios de redes definidas por software para implementar as funções do *Policy Controller* e do EMS. O Controlador gerencia os switches diretamente e mantém a visão da rede, além de coletar dados de performance dos elementos. Sistemas NMS podem obter esses dados através da interface *Q*, que pode ser um agente SNMP ou um *web service*. Outros sistemas podem interagir com o RAN através da interface *G*, uma ponte entre protocolos legados e o Controlador.

O modelo SDCN diverge do SplitArchitecture principalmente controle e no gerenciamento da rede. Enquanto o último propôs um plano de controle recursivo e redefiniu as interfaces OAM existentes, o primeiro tem o objetivo de preservar o investimento já realizado em sistemas OSS/BSS, evitando incompatibilizar-se com o legado. O SDCN é uma proposta conservadora, servindo como primeiro passo em direção a adoção do paradigma

Figura 3.7: Plano de controle SDCN



SDN em larga escala.

4 SIMULAÇÃO DE UMA REDE DE ACESSO UTILIZANDO NS-3

O objetivo de nossas simulações é avaliar o impacto do paradigma SDN em redes de acesso, e em seus serviços. Para isso foi utilizado o NS-3 (NS-3, 2009), um simulador de redes. Foram criados dois modelos, um da rede convencional e outro utilizando switches OpenFlow e um controlador centralizado. O primeiro foi implementado segundo os padrões vigentes do BBF, e serviu para estabelecer um ponto de referência para comparação com a arquitetura SDCN (seção 3.3).

Foram desenvolvidos *modelos de tempo discreto*, que podem ser definidos como modelos onde as variáveis de estado do sistema são alteradas apenas em momentos discretos, em que ocorrem eventos em consequência do término de atividades e dos atrasos (BANKS, 1998). O NS-3 executa esses modelos através de um mecanismo de três fases (NS-3, 2016a). A primeira consulta uma lista de eventos agendados, e avança o tempo simulado até a próxima mudança de estado. A segunda examina o sistema em busca de todas as atividades e atrasos finalizados neste instante, liberando os recursos associados. A última fase é iniciar novas atividades, alocando recursos que se tornaram disponíveis. O processo é repetido por um número suficiente de rodadas para que o tempo simulado atinja o limite estipulado pelo usuário.

Criar modelos específicos para cada serviço descrito na seção 2.1 é custoso, e restringiria a análise a apenas aqueles. Ao invés disso, a abordagem adotada foi identificar aspectos que tenham influência em todos os serviços, e medir o impacto do paradigma SDN sobre eles. O BNG é utilizado como ponto de referência na rede convencional, enquanto o controlador OpenFlow é adotado no modelo SDCN. Inicialmente identificou-se quatro classes de uso de recursos por serviços de rede. A primeira é o uso de CPU, que quando excessivo pode degradar a operação de todo o sistema. Apesar de relevante, optou-se por não utilizá-la neste trabalho por depender da eficiência da implementação, algo difícil de estimar em sistemas que ainda são uma proposta. A segunda classe é a utilização de memória principal (RAM) nos elementos da rede. A quantidade de memória disponível em equipamentos não é um limitador tão grande quanto já foi no passado, mas ainda é um recurso limitado. As demais classes compreendem o uso da rede, e que foi analisada em duas situações. O resultado final foram três variáveis de saída de cada modelo, todas mensuradas em *bytes*, definidas a seguir:

- O **Tamanho do estado** mantido para cada CPE ativo na rede. O uso de memória pode ser influenciado pela eficiência da implementação, e minimizamos esse efeito

considerando apenas parâmetros que são consultados ou transferidos entre nodos, ignorando variáveis internas. O espaço utilizado para armazenar uma mesma informação foi mantido constante em todos os modelos;

- Tráfego de um **Serviço estático**, definido como o tráfego de dados observado para estabelecer uma sessão de assinante. Contabiliza-se as mensagens de controle geradas desde o momento em que o AN detecta a ativação CPE até que o serviço de Internet banda larga esteja estabelecido;
- Tráfego de um **Serviço dinâmico**, medido pela atividade na rede gerada por ações do assinante que desencadeiam uma alteração no estado da rede, seja a criação de um circuito ou a aplicação de uma nova política. Essa medida considera o tráfego de controle desde a solicitação do CPE até o instante em que a requisição é atendida e o estado da rede estabiliza-se.

Uma vez que o projeto SDCN não previa a construção de redes reais, optou-se por variáveis que permitissem a verificação analítica da correção dos modelos. Dependendo da disponibilidade de recursos e de dados para validação do modelo, outras variáveis podem ser acrescentadas na comparação, tais como o uso de CPU e tempo em segundos para um serviço ser provisionado ou modificado.

Definidas as saídas dos modelos, pode-se definir os componentes necessários para sua construção. Redes de acesso banda larga convencionais utilizam uma coleção de protocolos e serviços de redes, alguns limitados ou ausentes na distribuição do simulador NS-3. A proposta SDCN prevê o reuso de ANs e CPEs existentes, e a utilização das interfaces de configuração e controle já disponíveis, sem introduzir novos protocolos além do OpenFlow. Os seguintes modelos de protocolos foram criados pelo projeto SDCN e reutilizados nesse trabalho:

- IGMP (RFC-2236), para controle de grupos Multicast;
- RADIUS (RFC-2865 e RFC-2866), para autenticação e controle de sessão;
- DHCP (RFC-2131), para configuração dos CPEs;
- BFD (RFC-5880), para monitorar conectividade fim-a-fim;
- ANCP (RFC-6320), para gerenciamento dos ANs.

As redes simuladas têm duas simplificações importantes em relação as arquiteturas analisadas. A primeira é a substituição de circuitos MPLS e MetroInternet por canais Ethernet convencionais. Assumimos que todos os circuitos foram estabelecidos antes do início de cada simulação, e que suas características são imutáveis durante a execução

da mesma, de forma que protocolos de sinalização como o *LDP* e o *IS-IS* tornam-se desnecessários. A segunda é a omissão de elementos de monitoramento da rede (EMS e NMS) existentes na recomendação. O tráfego SNMP gerado por esses sistemas seria equivalente em ambas as simulações, e pode ser suprimido sem prejuízo.

Uma rede de acesso também emprega equipamentos especializados, inexistentes num simulador genérico como o NS-3. Os modelos desses componentes de hardware serão descritos nas seções 4.1 e 4.2, juntamente com a topologia utilizada em cada simulação. A seção 4.3 analisa os resultados das simulações.

4.1 Modelagem da arquitetura TR-144 no NS-3

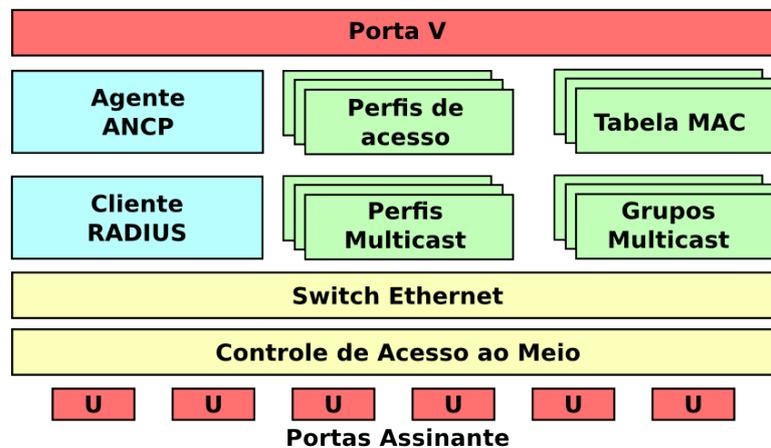
Nesta seção descrevemos a modelagem da arquitetura de acesso de banda larga multi-serviço (TR-144) apresentada no capítulo 2. Além de switches e roteadores, utiliza-se duas classes de equipamentos especializados, o *Access Node* (AN) e o *Broadband Network Gateway* (BNG). Esses modelos não fizeram parte do escopo do projeto SDCN, e foram desenvolvidos pelos autores para uso em simulações com o NS-3 neste trabalho.

Um *Access Node* contém um conversor de interfaces e um elemento de agregação de tráfego, os pontos de referência U e V da arquitetura respectivamente. O comportamento do nodo é similar a um switch convencional. Na interface U os equipamentos de acesso dos assinantes (CPE) conectam-se numa topologia estrela (xDSL, xPON) ou barramento (DOCSIS), dependendo da tecnologia de transporte adotada. A quantidade de clientes comportado por um único AN pode variar entre poucas centenas, em pequenos provedores, até alguns milhares, em regiões com grande concentração de assinantes. Já a interface V conecta o AN à rede de agregação MetroEthernet ou MPLS do provedor. Nela é realizada a agregação, classificação e conformação do tráfego dos assinantes.

A Figura 4.1 mostra os principais blocos do modelo de *Access Node* desenvolvido. A base utilizada foi o modelo de um switch Ethernet existente no NS-3, ao qual foi incorporado recursos dos novos protocolos desenvolvidos, principalmente o *IGMP snooping* e uma tabela de associações Multicast. O controle do switch foi modificado para impedir a comunicação direta entre CPEs, de forma que todo tráfego originado num assinante deve ser encaminhado ao BNG. O *Agente ANCP* e o *Cliente RADIUS* representam as interfaces de controle do AN, enquanto o *Controle de Acesso ao Meio* modela características da tecnologia de acesso empregada.

O estado do equipamento simulado contém duas tabelas de interesse. Os *Perfis*

Figura 4.1: Modelo de Access Node



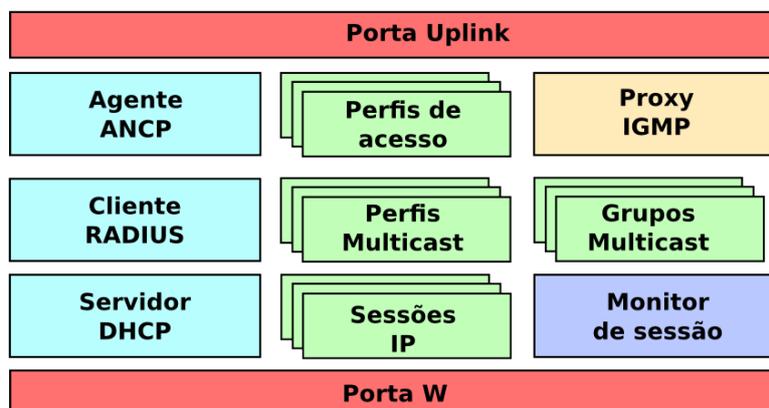
de Acesso, uma instância para cada assinante habilitado, contém a configuração da porta U correspondente. O modelo representa apenas as taxas máximas de transmissão e recepção permitidas. Já os *Perfis Multicast* são listas de acesso associadas a um ou mais assinantes. Contem blocos de endereços IP e a ação desejada quando um cliente solicita uma adesão (JOIN) naquele bloco. O modelo suporta permitir incondicionalmente, negar incondicionalmente (lista branca ou negra) ou ainda consultar o BNG sob demanda (lista cinza). Todos os perfis são recebidos do BNG via agente ANCP durante a inicialização, assim como a associação entre perfis de acesso e perfis Multicast.

Uma vez que a tecnologia de acesso não influencia nos experimentos desejados, optou-se por utilizar canais Ethernet entre o AN e o CPE, numa topologia ponto-a-ponto similar a vista na tecnologia xDSL. Dessa forma o hardware simulado tem tantas *Portas de Assinante* quanto o número de CPEs conectado a ele. Essas portas são administradas pelo *Controle de Acesso ao Meio*, que utiliza os Perfis de Acesso para determinar os parâmetros do canal simulado, e para manter contadores de tráfego individualizados. As transições no estado do enlace do assinante são informadas ao operador da rede através do cliente RADIUS.

A porta V foi modelada como uma interface Ethernet, a exemplo das portas U. As funções de classificação e conformação de tráfego não fazem parte do modelo, pois são desnecessárias aos experimentos. Em todas as simulações o canal entre o AN e o BNG foi definido com vazão suficiente para que não ocorresse descarte ou contenção de tráfego.

O *Broadband Network Gateway* (BNG) desempenha as funções de agregação IP e de terminação das sessões de assinante, conectando os domínios regional e de acesso

Figura 4.2: Modelo de BNG



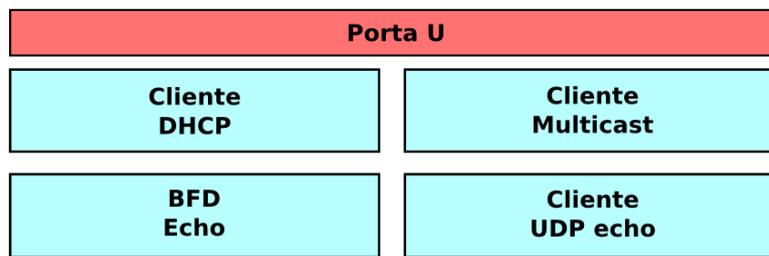
do RAN. Tipicamente cada BNG responde por milhares de assinantes, distribuídos em poucos ANs. As sessões de assinante podem ter a forma de túneis PPP ou de sessões IP. O primeiro caso é associado principalmente a tecnologia ADSL e a arquitetura TR-101, enquanto o último é recomendado para novas implantações segundo o TR-144. Adotamos o modelo de sessões IP em nossas simulações.

O modelo de BNG implementado neste projeto é mostrado na Figura 4.2. O nodo comporta-se como um roteador com duas interfaces, uma voltada para o núcleo da rede (Uplink) e outra para a rede de acesso (W). Há cinco blocos de controle: o agente ANCP, o cliente RADIUS, um servidor DHCP, um *proxy* IGMP e um monitor de sessões de assinante. A configuração é armazenada em dois tipos de perfis, de acesso e Multicast. O BNG mantém o estado de cada sessão de assinante, assim com das associações em grupos Multicast.

O agente ANCP do BNG opera como mestre dos agentes existentes nos nodos de acesso, realizando a configuração inicial dos mesmos com a transferência dos perfis de acesso. Quando um CPE é ativado, o AN responsável por ele utiliza seu agente para descobrir o perfil de serviço designado ao assinante. Após o estabelecimento do enlace, o CPE utiliza o protocolo DHCP para iniciar uma sessão IP. O *Monitor de sessão* mantém esses estados, e envia essas informações ao operador da rede via RADIUS. Ao contrário de túneis PPP, que possuem mecanismos intrínsecos para manutenção, o estado das sessões IP precisa ser monitorado indiretamente através de contadores de tráfego individualizados por assinante.

O serviço Multicast implementado utiliza apenas listas cinzas, onde a autorização para ingresso em grupos é intermediada pelo agente ANCP. Ao contrário do observado

Figura 4.3: Modelo de CPE



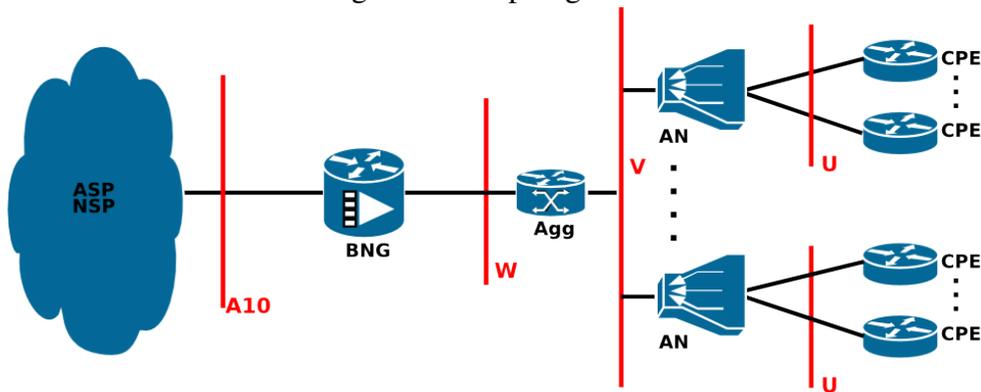
em equipamentos reais, não há consulta a outros sistemas no modelo, e todos os pedidos são permitidos. O BNG possui um *proxy* IGMP para disciplinar a requisição de recursos ao ASP, armazenando numa tabela a relação entre grupos Multicast e nodos de acesso.

Assim como a interface V do AN, a interface W foi modelada como uma porta Ethernet convencional, sem utilizar os protocolos MPLS ou MetroEthernet. A rede de agregação de acesso não foi representada explicitamente, e todos os nodos de acesso subordinados estão conectados diretamente ao BNG. A capacidade dos canais utilizados foi definida como grande o suficiente para não haver contenção, e sendo fixada em vazão de 10 Gbps e latência de 10 ms.

O modelo do CPE utilizado na simulação foi fornecido pelo projeto SDCN, consistindo no roteador já existente no NS-3 acrescido de aplicações (Figura 4.3) que lhe dão o comportamento desejado. O cliente DHCP monitora o estado da porta U, e inicia o estabelecimento de uma sessão IP quando necessário. O cliente BFD também é ativado nesse momento, e periodicamente gera tráfego na interface WAN para manter a sessão ativa junto ao BNG. Já os clientes *UDP echo* e *Multicast sink* são utilizados de acordo com o experimento. O primeiro gera um tráfego UDP com intervalo constante entre pacotes, direcionado a um nodo fora do RAN. Esse padrão equivale ao serviço VoIP. O segundo é um consumidor de tráfego Multicast, e utiliza o protocolo IGMP para mediar sua associação a um grupo configurável, o equivalente do serviço IPTV.

A topologia utilizada nos experimentos com o modelo TR-144 é apresentada na Figura 4.4. Foi instanciado apenas um BNG, que serve de ponto de referência para mensurar as variáveis descritas no início deste capítulo. O número de elementos no domínio *Access* é arbitrário, e não impacta nos resultados. Isso deve-se ao fato de não haver interação entre os assinantes, os canais Ethernet estarem dimensionados para não haver contenção, e as variáveis consideradas serem coletadas para cada CPE individualmente.

Figura 4.4: Topologia TR-144



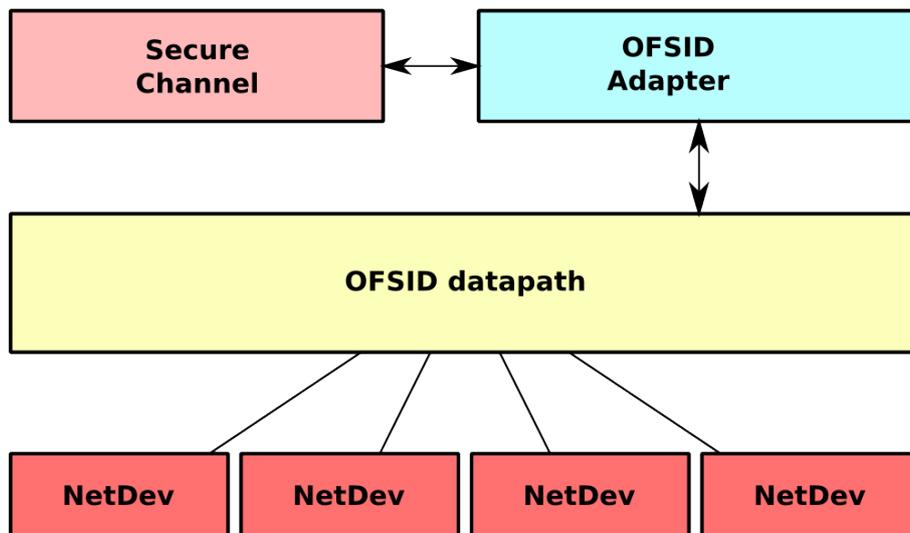
Dois nodos foram conectados ao BNG através da interface A10, representando um NSP e um ASP. O primeiro contém o servidor da aplicação UDP echo, que envia para a origem os pacotes gerados pelo cliente no CPE. Este servidor é usado no experimento com um serviço estático, onde medimos o tráfego de gerência para o seu estabelecimento. O segundo contém a fonte Multicast utilizada como serviço dinâmico, onde mede-se o tráfego necessário para atender a requisição do usuário. O tamanho do estado, a terceira variável, é obtida do BNG quando todos os serviços estão estabelecidos. Os resultados obtidos serão apresentados na seção 4.3.

4.2 Modelagem da arquitetura SDCN no NS-3

A arquitetura SDCN foi apresentada na seção 3.3. Assim como foi feito com o TR-144, esta modelagem foi construída sobre os elementos básicos do simulador NS-3. Os modelos de *Access Node* e CPE definidos na seção anterior foram reutilizados nessa modelagem. O simulador dispõe de um módulo OpenFlow, no entanto os requisitos das simulações previstas exigiram modificações extensas nesse módulo, que afetaram os modelos do protocolo, do switch e do controlador.

O suporte OpenFlow do NS-3 é derivado do pacote OFSID (NS-3, 2016b), uma implementação de referência para um switch em software. As classes definidas no simulador são um Adaptador para as rotinas em linguagem C do pacote. Apesar de funcional, a opção pelo OFSID gerou dois problemas graves, que precisaram ser corrigidos. Visto que o pacote OFSID não foi projetado para funcionar como uma biblioteca, e sim como uma aplicação independente, comportamentos errôneos foram observados. Identificou-se que ao criar-se mais de uma instância de switch no mesmo contexto de execução, a inexistência de um isolamento adequando dos dados provocava a corrupção das tabelas

Figura 4.5: Modelo de switch OpenFlow



de fluxos. Esse defeito foi corrigido estendendo estruturas conter um identificador da instância, modificando rotinas para referenciá-lo. O segundo problema é que a versão do protocolo OpenFlow implementado era anterior à padronização. Existem liberações mais recentes do OFSID, que implementam a versão 1.1 da especificação, porém não é possível utilizá-las já que interfaces de programação foram quebradas sem preocupação com retro-compatibilidade. Uma vez que substituir o pacote era tão oneroso quanto criar modelos novos, a solução adotada foi atualizar o pacote apenas até a versão 1.0 do padrão, e corrigir defeitos pontuais.

O modelo de switch OpenFlow construído ao redor do OFSID foi refatorado para incorporar os novos recursos da versão 1.0 do protocolo, necessárias para o Controlador mapear as capacidades de cada elemento. A Figura 4.5 apresenta os principais blocos do modelo. O *Secure Channel* é uma interface Ethernet diretamente conectada ao Controlador, utilizada pelo agente OpenFlow do switch. Uma simplificação do modelo é não utilizar criptografia nessa comunicação. O *OFSID datapath* é uma caixa-preta que implementa um switch OpenFlow funcional. Através do *OFSID Adapter*, uma classe que facilita a interação entre o simulador e a biblioteca OFSID, o NS-3 processa os pacotes de dados segundo a tabela de fluxos. O tempo de atraso do modelo foi arbitrado em 30 ns, um valor compatível com o observado em equipamentos reais. As simulações previstas neste trabalho são indiferentes ao tempo de atraso. Por fim, cada *NetDev* é uma porta Ethernet conectada à caixa-preta do OFSID, por onde os pacotes são recebidos e transmitidos.

O Controlador original do NS-3 era rudimentar, sem separação entre o sistema

operacional de rede (NOS) e as aplicações do usuário. O projeto SDCN optou por descartá-lo e criar um novo modelo, com um NOS responsável por descobrir a topologia e manter a visão da rede, além de definir uma interface para as aplicações. Essa implementação facilitou o reuso de aplicações e a criação de simulações mais complexas.

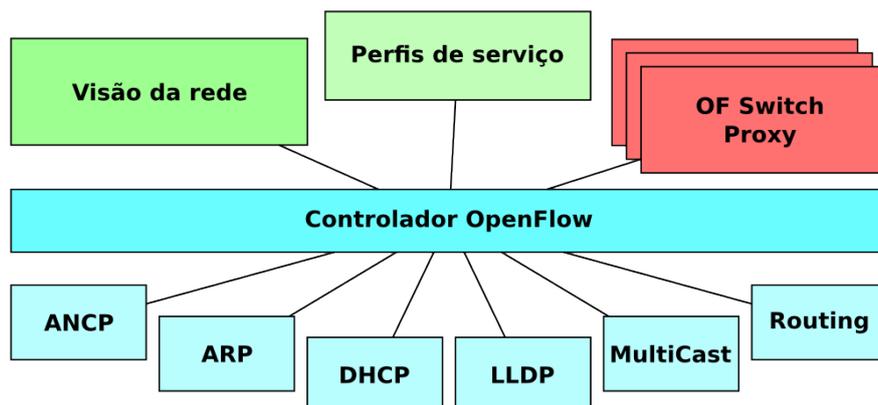
Os blocos principais do novo modelo são vistos na Figura 4.6. Os Controladores modernos são orientados a *intenções*, onde o programador define uma ação que a rede deve desempenhar, por exemplo permitir comunicação bidirecional entre os nodos A e B, e o sistema produz as mensagens OpenFlow que materializam aquela ação. No entanto, o Controlador SDCN não possui tal sofisticação, e foi inspirado em projetos como o *Beacon* (ERICKSON, 2013), onde o programador é auxiliado em tarefas corriqueiras mas deve conhecer o funcionamento do protocolo para definir fluxos na rede. O objetivo desse modelo é apenas permitir a simulação de redes definidas por software.

Existem duas bases de dados no modelo do Controlador. A primeira é a *Visão da Rede*, um grafo não-direcionado construído durante a simulação pelas aplicações, que podem criar vértices ou então adicionar informações a um já existente. Existem duas classes de vértices: *Nodo* e *Switch*. A principal distinção é que *Nodos* são terminais, enquanto *Switches* permitem transito através do mesmo. O grafo também é utilizado para determinar o caminho mínimo entre dois nodos através do algoritmo Bellman–Ford. A segunda base é chamada *Perfis de Serviço*, e contém os perfis de acesso e Multicast dos assinantes, disponível para consulta pelas aplicações. Sua inicialização é realizada antes do início de cada simulação.

Cada *OF Switch Proxy* encapsula o estado relacionado a um switch OpenFlow conectado, tais como o Secure Channel, controle de transação e capacidades do equipamento. Uma vez que o Controlador utiliza um formato interno para representar mensagens OpenFlow, esta classe é responsável pela conversão em pacotes OpenFlow válidos antes de enviá-los pela rede, assim como o caminho inverso. Cada instância de *proxy* está associada a um nodo do tipo *Switch* na *Visão da Rede*.

O *Núcleo* do Controlador SDCN é uma interface de acesso à *Visão da Rede* e um escalonador de aplicações. O modelo é baseado em eventos, sejam oriundos da rede ou de temporizadores. Os pacotes capturados pelos switches e enviados ao Controlador são entregues a todas as aplicações numa cadeia de tratadores, onde cada um pode consumir o pacote, apenas analisá-lo ou então ignorá-lo. Também existem notificações para alterações na topologia, por exemplo descoberta de um switch. Aplicações dispõem de um recurso para sincronizar o estado global da rede. Essa ação envia um comando de barreira

Figura 4.6: Modelo de Controlador OpenFlow

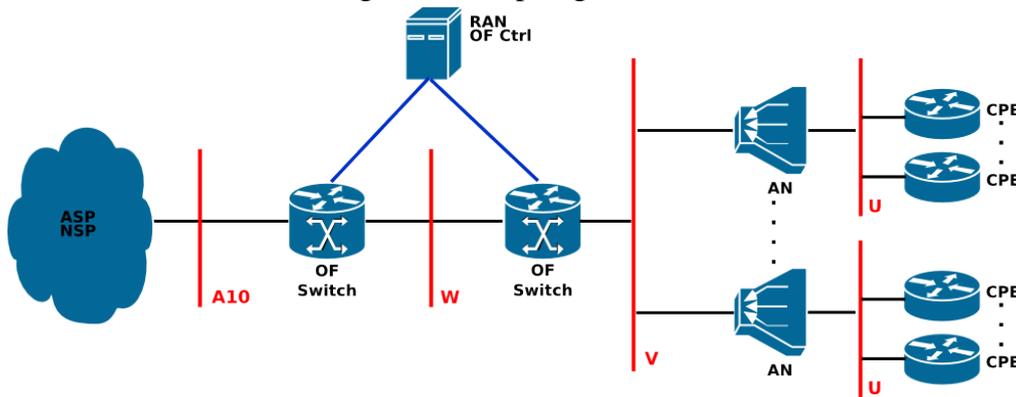


para todos os switches, e notifica o requerente quando todos os elementos responderem a requisição.

Há quatro aplicações essenciais para funcionamento da rede. A primeira é chamada *LLDP*, e utiliza o protocolo homônimo para descobrir a topologia. A aplicação periodicamente inunda a rede com mensagens de anúncio (LLDPDU), que são capturadas pelos switches e encaminhadas ao Controlador. Essa informação permite determinar quais portas são internas (conectadas a outros switches), e quais devem participar de grupos de difusão (Broadcast). A segunda é chamada *ARP*, e tanto coleta informações sobre os nodos e endereços IP quando responde a requisições de descoberta ARP emitidas por outros nodos. Estas duas aplicações fornecem a maior parte das informações contida na Visão da Rede. Outra aplicação é a *Routing*, responsável pelo estabelecimento de caminhos dentro da rede. Esse módulo funciona tanto de forma autônoma quanto como um serviço. No primeiro caso ele responde a eventos de fluxo desconhecido dos switches, estabelecendo um caminho entre origem e destino a partir das informações da Visão da Rede. Quando usado como serviço, esse módulo é utilizado por outras aplicações para definir fluxos a partir de um filtro parametrizável. Um exemplo deste uso é a aplicação *Multicast*, a última aplicação essencial, que exerce a função de IGMP Snooping na rede, interceptando as mensagens IGMP que ingressam e estabelecendo fluxos Multicast sob demanda.

As demais aplicações são específicas do cenário de provedores de acesso. O módulo *DHCP* implementa o gerenciamento de sessões IP. A base do servidor DHCP utilizado é a mesma do modelo TR-144, porém aqui foi especializada para interagir com a Visão da Rede e publicar os endereços IP dos assinantes ativos. A mesma abordagem foi empregada em *ANCP*, que especializa o agente do BNG para ser utilizado como uma

Figura 4.7: Topologia SDCN



aplicação. Os perfis de acesso e Multicast são obtidos da base de dados do Controlador. Quando uma sessão de assinante é estabelecida, o módulo ANCP cria um fluxo para Internet entre o CPE e o NSP. A aplicação também coleta periodicamente contadores de pacotes dos fluxos, utilizados para manutenção da sessão.

A topologia utilizada nos experimentos com o modelo SDCN é apresentada na Figura 4.7. Foi instanciado apenas um Controlador, que serve de ponto de referência para mensurar as variáveis descritas no início deste capítulo. Assim como no cenário TR-144, número de elementos no segmento de acesso é arbitrário, e não impacta nos resultados.

Os experimentos previstos nessa topologia são equivalentes aos descritos na seção 4.1. A principal diferença são os nodos que representam o NSP e ASP foram conectados a um switch OpenFlow, uma vez que o BNG foi substituído pelo mesmo. O tamanho do estado mantido por CPE agora é mensurado no Controlador.

4.3 Resultados da simulação

Uma vez construídos os modelos necessários para ambas as arquiteturas, foi possível executar os experimentos e coletar dados. No início deste capítulo definimos três variáveis de interesse, o tamanho do estado mantido para cada CPE ativo, o tráfego observado para estabelecer uma sessão de assinante e o tráfego gerado por um serviço dinâmico, onde ações do assinante geram alteração no estado da rede.

Os experimentos definidos não contêm eventos aleatórios que gerem variância das medidas coletadas. Utilizando os modelos implementados, as variáveis consideradas poderiam ser impactadas apenas por mal funcionamento da rede ou de nodos. Não foi definido um modelo de falha para os dispositivos de rede, já que não faz parte do escopo desse trabalho estudar tais cenários. Dessa forma eliminou-se uma gama de eventos que pode-

riam provocar o descarte e a retransmissão de pacotes. O congestionamento dos enlaces, outra causa possível de descarte, foi evitado com a utilização de canais Ethernet superdimensionados. Por fim, os nodos foram programados para atender todas as requisições corretamente, e dentro dos limites de tempo estabelecidos pelos protocolos utilizados. A aleatoriedade remanescente, o instante de tempo em que cada mensagem é enviada, não é suficiente para modificar o tamanho do estado nem do tráfego observado.

A tabela 4.1 sumariza os valores extraídos dos traços de execução gerados pelo NS-3. Em todas as propriedades analisadas, o modelo SDCN provocou um aumento do consumo de recursos.

Tabela 4.1: Resultado da simulação

Experimento	TR-144 (bytes)	SDCN (bytes)
Tamanho do estado	460	714
Serviço estático	1562	2166
Serviço dinâmico	368	1710

O tamanho do estado estado mantido para cada CPE na arquitetura TR-144 é a combinação das diversas sessões criadas, além dos dados armazenados internamente no BNG, o ponto de observação utilizado. Existe ainda uma sessão entre o AN e o CPE, na rede de distribuição, mantida pelo primeiro e por esse motivo ignorada na contabilização de recursos. O BNG armazena informações sobre a sessão IP e quaisquer circuitos estabelecidos na rede de agregação, totalizando 460 Bytes. O modelo SDCN transfere esse estado para o Controlador, e adiciona dois blocos de dados a esse total, atingindo 714 Bytes. O primeiro corresponde ao custo de representar o assinante na Visão da Rede, mais oneroso uma vez que o Controlador sabe a topologia exata da rede, enquanto o BNG conhece apenas a relação entre o CPE e o AN. O segundo bloco corresponde a contadores de pacotes utilizados para manutenção da sessão. No BNG a detecção de inatividade é efetuada no plano de controle local, mas no modelo SDCN esses dados precisam ser exportados para o Controlador executar essa tarefa.

O tráfego para um serviço estático nas simulações construídas é aquele necessário para o CPE estabelecer uma sessão IP junto ao NSP. No modelo TR-144 são utilizados os protocolos ANCP, RADIUS e DHCP nesse processo. O ANCP é utilizados para estabelecer o circuito entre o BNG e o CPE, passando pelo AN. O protocolo RADIUS é necessário para requisitar autorização ao NSP para estabelecer a sessão. Finalmente o DHCP é empregado para provisionar os parâmetros IP do CPE. O custo total dessas

transações é de 1562 Bytes. A adoção do paradigma SDN alterou a dinâmica, mas não reduziu a comunicação. O Controlador incorporou o agente ANCP e o cliente RADIUS do BNG, com as mesmas atribuições descritas anteriormente. Devido a necessidade de definir um fluxo na rede OpenFlow para transportar os dados do assinante, o custo dessa propriedade subiu para 2166 Bytes.

Finalmente, o tráfego observado num serviço dinâmico é o que apresentou o maior incremento na comparação entre os modelos, 368 Bytes para a arquitetura TR-144 contra 1710 Bytes da proposta SDCN. A justificativa para esta observação é a mudança do paradigma distribuído para o centralizado. Executar uma alteração no estado da rede OpenFlow de forma consistente, preservando as políticas de tráfego e garantindo o tratamento correto de todos os fluxos, é uma tarefa complexa. Os trabalhos de Reitblatt et al. (2011) e Katta, Rexford e Walker (2013) exemplificam estratégias para essa finalidade. O método escolhido no modelo simulado é a utilização de barreiras OpenFlow, emitidas pelo Controlador, para sincronizar o estado dos switches.

5 MODELO DE COMPARAÇÃO DE CUSTOS EM REDES DE ACESSO

Neste capítulo definimos um modelo de comparação entre arquiteturas de rede de acesso, sob o ponto de vista do custo de gerenciamento dos serviços oferecidos ao assinante. A proposta é uma ferramenta para analisar rapidamente o impacto da migração, combinando simulação com uma análise qualitativa da complexidade de operar o serviço. O objetivo não é quantificar o custo financeiro da migração, e sim identificar oportunidades de melhoria na operação.

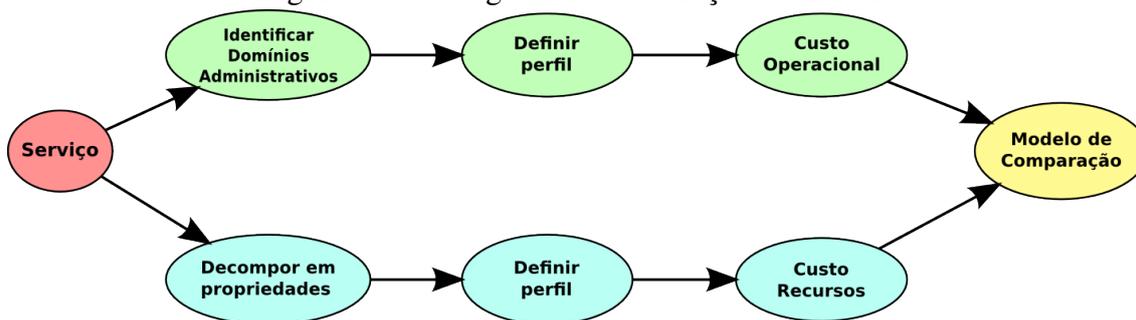
Não há escassez de modelos na literatura com finalidade similar. O trabalho de Szegedi (2007) oferece um modelo de estimativa de custos de capital (CAPEX) em redes GMPLS que poderia ser adaptado para outros cenários. Já Verbrugge et al. (2005) apresenta uma modelagem detalhada dos custos operacionais (OPEX) de operadoras. O *custo total de propriedade* (TCO) é outra métrica utilizada, e representa a soma do CAPEX e OPEX ao longo do ciclo de vida da tecnologia. Exemplos de uso do TCO podem ser encontrados em Bailey (2016) e Knoll (2015). Análises tecno-econômicas entre tecnologias equivalentes também são comuns, por exemplo entre GPON e EPON em Bonilla, Barbosa e Moschim (2009).

O principal diferencial do modelo proposto em relação aos existentes é o foco no gerenciamento, e não apenas no custo financeiro de construir e operar a rede. Dessa forma, o modelo serve como apoio para decisões de projeto de sistemas de gerência. A comparação de duas arquiteturas apenas pelo uso de recursos, como feito no capítulo 4, carece de alguns fatores que poderiam justificar a migração para uma solução baseada em SDN. Como visto na seção 3.2, além de racionalizar o uso de recursos, simplificar o sistema é um objetivo importante.

A comparação é realizada entre a *arquitetura de referência*, tipicamente a solução atual, e uma ou mais arquiteturas propostas. O modelo proposto analisa cada serviço de rede em duas dimensões. A primeira dimensão é o custo em recursos utilizados, derivado de estimativas produzidas a partir dos resultados de simulações. Escolhemos essa métrica porque a quantidade de recursos alocadas à gerência de um serviço é um indicativo do seu impacto na rentabilidade da infraestrutura. O segundo eixo é o número de domínios de configuração envolvidos, usado para estimar a complexidade em disponibilizar os serviços aos assinantes. A existência de múltiplos domínios impacta no provisionamento e no diagnóstico de falhas, e contribui para a complexidade total da operação.

A construção do modelo de comparação tem duas fases. A primeira compreende

Figura 5.1: Fluxograma de construção do modelo



a construção de modelos para o simulador de tempo discreto NS-3. Independentemente do número de serviços em análise, é realizada apenas uma vez, e foi detalhada no capítulo 4. A fase seguinte segue o fluxo apresentado na Figura 5.1, onde para cada serviço de interesse realiza-se duas análises. As etapas superiores (verde) geram o eixo do *Custo Operacional*, e serão detalhadas na seção 5.1, enquanto as inferiores (azul) produzem o eixo do *Custo Recursos*, descritas na seção 5.2. Ao final do processo as duas análises são combinadas num gráfico de dispersão (seção 5.3), onde pode-se identificar o impacto da migração de arquitetura em cada serviço.

5.1 Custo operacional

Existem diversos métodos para estimar o custo operacional (OPEX) de serviços de rede. Pode-se utilizar modelos tecno-econômicos detalhados, como visto em Verbrugge et al. (2006), onde todas as rotinas administrativas são analisadas e monetizadas. Essa tarefa pode ser auxiliada por ferramentas de análise de negócios como o STEM (Implied Logic Limited, 2016). O resultado é uma estimativa com alto grau de confiança, porém bastante trabalhosa de obter-se. O modelo proposto neste trabalho almeja ser uma ferramenta rápida, por isso privilegia-se metodologias mais leves, mesmo ao custo da precisão. Um exemplo de métrica compatível com nossos objetivos é o número de domínios administrativos.

Benson, Akella e Shaikh (2011) afirmam que o OPEX domina o TCO ao longo da vida útil da tecnologia, e que este custo é resultado da complexidade crescente de executar manobras operacionais nessa rede. Esta complexidade é originada na diversidade de interfaces de configuração, que exigem equipes com treinamento específico, na dificuldade de automatizar rotinas, e nos problemas de coordenação entre equipes. Dessa forma, definimos um *domínio administrativo* como o conjunto de elementos de rede que é gerenciado

Tabela 5.1: Exemplo de domínios administrativos

Domínio	Peso	
	Referência	Proposta A
Domínio A	1	1
Domínio B	8	5
Domínio C	1	0

pelo mesmo grupo de pessoas, compartilhando os mesmos requisitos de treinamento e subordinados ao mesmo gerente. Equipamentos especializados e que exigem habilidades específicas, como o BNG e o *Access Node*, são domínios de apenas um elemento, enquanto todos os switches da rede de agregação formam um único domínio.

O *Custo Operacional* de cada serviço analisado pelo modelo de comparação é estimado através dos seguintes passos (Figura 5.1). Primeiro, identifica-se os domínios administrativos relevantes na arquitetura de referência e em cada proposta, analisa-se cada arquitetura e estima-se um peso para o esforço de gerenciá-lo. Esse peso não tem unidade, e sua concepção é inspirada no *Planning Poker* (RASMUSSEN, 2010) utilizado em métodos ágeis. Sugere-se utilizar o mesmo estilo de escala derivada da sequência de Fibonacci: 0, 1, 2, 3, 5, 8, 13. A tabela 5.1 exemplifica o resultado obtido ao final dessa etapa. Quando diversos serviços estão sendo avaliados, pode-se construir essa tabela iterativamente, reusando os domínios identificados anteriormente.

O segundo passo é definir o perfil de cada serviço considerado. Nesta etapa é gerado um mapa relacionando os domínios administrativos de cada arquitetura com os serviços que os afetam. Um serviço afeta um domínio quando exige ações deste para seu funcionamento, e não quando seus dados apenas cruzam o mesmo.

O último passo dessa análise é atribuir um escore ao serviço para cada arquitetura em análise. Esse valor é o somatório dos pesos dos domínios em cada uma delas, combinando as informações da tabela e do mapa gerados, e será usado como ordenada do ponto que representa o serviço no gráfico. Os custos operacionais obtidos são adimensionais, e representam uma medida da complexidade de operar cada serviço.

5.2 Custo de Recursos

O *Custo de Recursos* de um serviço representa a parcela da infraestrutura que precisa ser reservada para a configuração e monitoramento da mesma. Essa componente é importante em redes de operadoras e provedores, já que os elementos de gerên-

Tabela 5.2: Exemplo de pesos das propriedades simuladas

Serviço	Tamanho do estado	Serviço estático	Serviço dinâmico
Serviço A	10,00%	80,00%	10,00%
Serviço B	10,00%	80,00%	10,00%
Serviço C	30,00%	20,00%	50,00%

cia (NMS/EMS) competem com os assinantes por recursos, impactando na rentabilidade da operação. Essa realidade difere daquela vista em *datacenters*, onde frequentemente existem recursos exclusivos para o gerenciamento, tais como redes fisicamente independentes e módulos de gerenciamento de *chassis* e servidores *blade* com CPU própria.

Esta análise será realizada utilizando dados de simulação, e não uma análise qualitativa como feito na seção 5.1. A principal razão para empregar uma abordagem diferente é que o uso de recursos é difícil de ser estimado apenas através da definição do serviço e da arquitetura, ao contrário do custo operacional. Podem existir interações entre os elementos da rede que são difíceis de prever e quantificar. O uso criterioso de simulação pode produzir estimativas de melhor qualidade com menos esforço. A abordagem escolhida é evitar criar experimentos e modelos específicos para cada serviço de rede analisado. Ao invés disso identificamos classes de uso de recursos presentes em todos os serviços, definimos experimentos para observá-las e mensuramos o consumo de cada uma. O peso total do serviço pode ser obtido pela soma ponderada do consumo em cada classe, de forma análoga ao que foi proposto na seção anterior para o custo operacional.

Os dados de simulação são colhidos apenas uma vez para cada arquitetura em consideração, e são utilizados para gerar os custos de todos os serviços de interesse. Os detalhes desses experimentos podem ser encontrados no capítulo 4. O custo final de recursos é obtido através de três passos (Figura 5.1), de forma agnóstica quanto à arquitetura. O primeiro passo é decompor o serviço nos três aspectos descritos acima: tamanho do estado gerenciado, comunicação para provisionamento estático e comportamento dinâmico. Isso é feito através do estudo dos protocolos e elementos envolvidos. O segundo passo é estimar a contribuição de cada aspecto no consumo total de recursos do serviço. O resultado é uma tabela como 5.2.

O passo final é gerar o escore do serviço, o que é feito através do somatório dos custos levantados na simulação ponderados pela contribuição tabelada no passo anterior. Este escore é usado como abscissa do ponto que representa o serviço no gráfico.

5.3 Construção do gráfico comparativo

A última etapa da construção do modelo de comparação proposto é a criação de um gráfico de dispersão combinando as duas análises anteriores. O objetivo deste passo é permitir a identificação visual do comportamento dos serviços considerados em cada arquitetura em análise. O eixo das ordenadas representa o Custo Operacional de cada serviço, obtido seguindo os passos descritos na seção 5.1. Este eixo não tem unidade, pois o custo é representado por um valor de complexidade adimensional. Já o eixo das abcissas contém o Custo em Recursos, derivado das simulações conforme apresentado na seção 5.2, representado em Byte. A Figura 6.1 irá demonstrar este gráfico.

6 AVALIAÇÃO DE REDES DE ACESSO COM O MODELO PROPOSTO

Neste capítulo utiliza-se o modelo de comparação descrito anteriormente para avaliar a arquitetura SDCN (seção 3.3) em relação ao padrão de mercado TR-144 (cap. 2). Ao final do processo o modelo irá revelar os benefícios e limitações de cada solução, sob o ponto de vista gerenciamento dos serviços oferecidos ao assinante.

Os serviços considerados nesta comparação são aqueles discutidos na seções 2.1 e 3.2: Internet Banda Larga, VoIP, IPTV, Banda sob Demanda (BWoD), Pay for QoS (PQS) e Roteadores Gerenciados (MRCP). Esta seleção contém as demandas mais frequentes dos assinantes, segundo a visão do BBF para redes de próxima geração. O conjunto mescla serviços convencionais, como Internet Banda Larga, com aplicações cujo comportamento é dinâmico e determinado por ações do usuário, tais como BWoD, onde acredita-se que o modelo SDN possa oferecer vantagens.

Segundo o processo apresentado no capítulo anterior, os custos operacionais e de recursos de cada serviço são calculados de forma independente. O Custo Operacional é obtido através de três passos: identificação de domínios, definição de perfis e cálculo da complexidade. O Custo de Recursos também é gerado em três etapas: decomposição dos serviços em aspectos, elaboração de perfis e cálculo do consumo. Existe ainda uma etapa prévia, a construção de modelos de simulação, já realizada e discutida no capítulo 4. A execução desses passos será detalhada a seguir.

Custo Operacional

1. **Identificação do domínios administrativos.** Identificou-se 9 domínios distintos na arquitetura TR-144: MRCP, CPE, Rede de distribuição, *Access Node*, Rede de agregação L2, BNG, Rede de agregação IP, NSP e ASP. Enquanto o modelo SDCN tem diversos domínios em comum com a solução existente, a adoção do padrão OpenFlow eliminou alguns planos de controle locais, principalmente nas redes de agregação, e conseqüentemente os domínios associados a eles. Em contrapartida surgiu um novo, o Controlador, totalizando 10 domínios em análise. A tabela 6.1 mostra o resultado desse primeiro passo.

As estimativas de complexidade apresentadas na tabela utilizam a escala definida pelo modelo (0, 1, 2, 3, 5, 8, 13), e foram obtidas através da dinâmica de *planning*

Tabela 6.1: Domínios administrativos

Domínio	Peso	
	TR-144	SDCN
MRCP	5	3
CPE	1	1
Rede de distribuição	1	0
Access Node	5	2
Rede de agregação L2	2	0
BNG	8	0
Rede de agregação IP	3	1
NSP	1	1
ASP	1	1
OF-Controller	0	8

poker com 5 engenheiros da Parks. Estabeleceu-se como complexidade unitária o elemento mais simples da rede, o CPE, e então os demais foram determinados iterativamente, sempre comparando um elemento em relação aos já classificados.

2. **Relacionar serviços e domínios.** Um serviço afeta um domínio quando exige ações deste para seu funcionamento, e não quando seus dados apenas cruzam o mesmo. A tabela 6.2 apresenta o resultado da análise das arquiteturas, identificando quais domínios são afetados por cada serviço. Por simplicidade, o mapa não faz separação entre as arquiteturas, uma vez que essa informação já foi representada no passo anterior. Um exemplo é o Controlador OpenFlow, que apesar de existir apenas no modelo SDCN, foi relacionado a todos os serviços.

Tabela 6.2: Mapa de serviços e domínios

Domínio	Internet	VoIP	IPTV	BWoD	PQS	MRCP
MRCP	-	-	-	-	-	X
CPE	X	X	X	X	X	X
Rede de distribuição	X	X	X	X	X	-
Access Node	X	X	X	X	X	-
Rede de agregação L2	X	X	X	X	X	-
BNG	X	X	X	X	X	X
Rede de agregação IP	X	X	X	X	X	-
NSP	X	-	-	-	-	-
ASP	-	X	X	-	-	-
OF-Controller	X	X	X	X	X	X

Os domínios relacionados aos elementos da rede de transporte participam de todos os serviços, com exceção de roteador gerenciado (MRCP), devido a necessidade de estabelecer circuitos para cada um deles. O provedor NSP fornece conectividade à Internet, e afeta apenas o acesso básico. Já os provedores ASP interagem apenas

com os serviços que fornecem.

3. **Cálculo do custo operacional.** O custo operacional é obtido combinando os resultados dos dois passos anteriores, para cada arquitetura. O custo de um serviço é a soma dos pesos dos domínios associados. A tabela 6.3 contém o resultado desse passo.

Tabela 6.3: Custo operacional para redes de acesso

Serviço	TR-144	SDCN	Δ
Internet Banda Larga	22	14	-36,36 %
VoIP	21	13	-38,10 %
IPTV	21	13	-38,10 %
Banda sob Demanda	20	12	-40,00 %
Pay for QoS	20	12	-40,00 %
Roteadores Gerenciados	14	12	-14,29 %

Dentro da expectativa criada pelo modelo SDN, a complexidade de gerenciamento dos serviços foi reduzida em todos os cenários analisados. Uma vez que os domínios referentes aos elementos de transporte participam da maioria dos serviços, e o modelo SDCN impacta principalmente neles, observou-se uma redução homogênea nesses casos. A exceção é o serviço MRCP, que engloba apenas quatro domínios e por isso tem oportunidades menores de beneficiar-se do paradigma SDN.

Custo de Recursos

1. **Decompor serviços em propriedades.** O modelo elegeu três propriedades de interesse para análise do uso de recursos: tamanho do estado gerenciado, comunicação para provisionamento estático e comportamento dinâmico. Na arquitetura TR-144, todas são mensuradas no BNG, contabilizando os dados transferidos entre este e o *Access Node*, ASP e NSP. Já no modelo SDN, tem-se a adição dos dados coletados dos switches para controle de sessão. A comunicação utilizada no provisionamento foi analisada pelo tráfego de protocolos de controle, tais como ANCP, IGMP e OpenFlow.

Dentre os serviços em análise existem três classes distintas, definidas pela propriedade dominante. A primeira classe é daqueles onde o tamanho do estado tem o maior impacto, como é o caso dos Roteadores Gerenciados, onde o operador pre-

cisa manter parâmetros de configuração de diversas aplicações oferecidas à rede local do assinante. O segundo grupo contém serviços cujo maior custo é o de provisionamento inicial. Internet Banda Larga e VoIP são exemplos desse grupo onde, uma vez estabelecido um circuito, são raras as modificações. Finalmente existe um grupo de serviços fortemente influenciados por ações do assinante, tais como IPTV, PQS e BWoD.

2. **Definir perfis de serviço.** A partir da decomposição realizada no passo anterior, pode-se estimar a contribuição de cada propriedade no custo de recursos total de um serviço. Novamente utilizou-se uma dinâmica com os mesmo engenheiros da Parks. Foram utilizadas duas regras para atribuir os pesos. Primeiro, nenhuma propriedade pode ter contribuição inferior a 10,0 %. Segundo, a granularidade também é de 10,0 %. O objetivo dessas regras é evitar a ilusão de uma precisão que o modelo não tem, já que essencialmente é uma análise qualitativa dos serviços. A tabela 6.4 apresenta a distribuição resultante desta análise.

Tabela 6.4: Pesos das propriedades simuladas

Serviço	Tamanho do estado	Serviço estático	Serviço dinâmico
Internet Banda Larga	10,0 %	80,0 %	10,0 %
VoIP	10,0 %	80,0 %	10,0 %
IPTV	30,0 %	20,0 %	50,0 %
Banda sob Demanda (BWoD)	20,0 %	30,0 %	50,0 %
Pay for QoS (PQS)	20,0 %	30,0 %	50,0 %
Roteadores Gerenciados (MRCP)	40,0 %	50,0 %	10,0 %

O custo dos serviços de Internet Banda Larga e VoIP é fortemente influenciado pelo provisionamento inicial, já que são aplicações estáticas durante longos períodos. Enquanto os serviços de IPTV, BWoD e PQS funcionam de maneira reativa, modificando características da rede estimulados por ações do assinante. Esse grupo recebeu um peso maior para o custo dinâmico. Aplicações Multicast, como IPTV, também tem uma influência significativa do tamanho do estado, já que é necessário manter a tabela de associação, e por isso essa propriedade recebeu uma fração maior do que nos demais casos. Finalmente existe o serviço MRCP, onde a principal dificuldade é armazenar as configurações e transferi-las ao equipamento a cada início de sessão do assinante.

3. **Cálculo do custo de recursos.** O custo de recursos é obtido combinando os resultados do passo anterior com os resultados de simulação apresentados na seção 4.3,

para cada arquitetura. O custo de um serviço é a soma ponderada das propriedades. A tabela 6.5 contém o resultado desse passo.

Tabela 6.5: Custo de recursos para redes de acesso (bytes)

Serviço	TR-144	SDCN	Δ
Internet Banda Larga	1332,40	1975,20	48,24%
VoIP	1332,40	1975,20	48,24%
IPTV	634,40	1502,40	136,82 %
Banda sob Demanda (BWoD)	744,60	1647,60	121,27 %
Pay for QoS (PQS)	744,60	1647,60	121,27 %
Roteadores Gerenciados (MRCP)	1001,80	1539,60	53,68%

A mudança para um modelo de controle centralizado, como o SDN, gera um fluxo maior de comandos de gerenciamento, uma vez que o Controlador precisa coletar informações de todos os nodos para manter a Visão da Rede. Alterações de características de um serviço em tempo de execução são ainda mais custosas, como visto em BWoD e PQS, pois demanda Barreiras OpenFlow para sincronizar os elementos e evitar um comportamento errôneo durante a transição entre estados.

Modelo completo

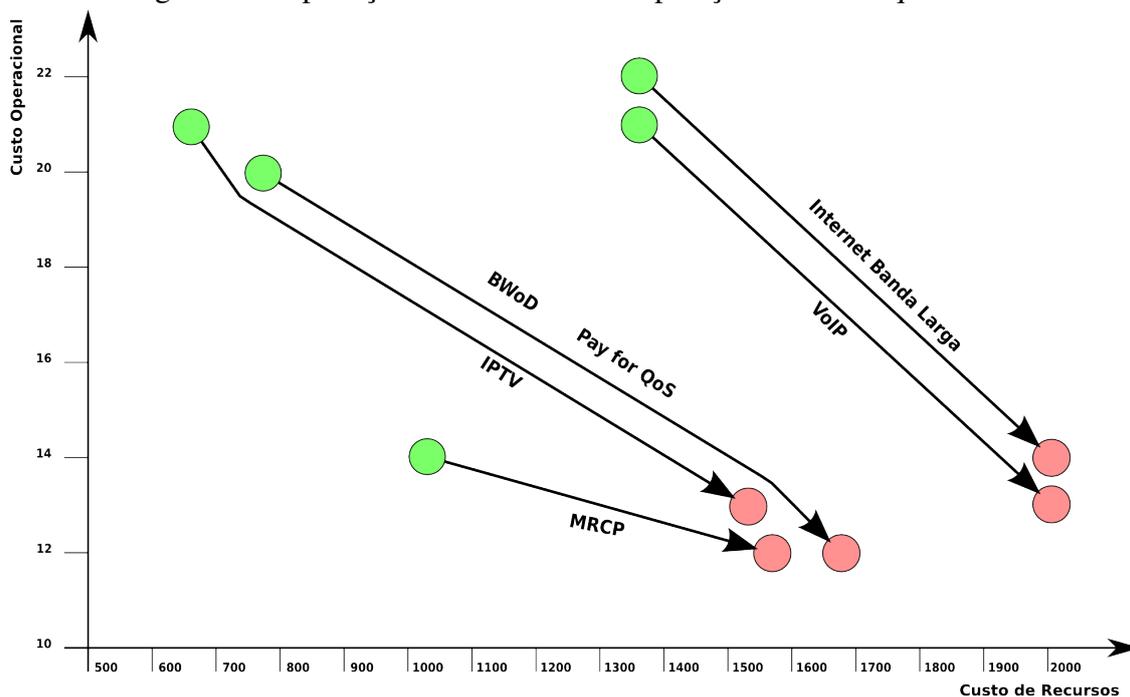
O modelo de comparação de arquiteturas de rede é construído através da combinação das análises do custo operacional e do custo de recursos. A execução de todos os passos descritos anteriormente gera a tabela 6.6, que combina os resultados apresentados nas tabelas 6.3 e 6.5.

A comparação dos efeitos da mudança de arquitetura sobre cada serviço é melhor estudada graficamente. A Figura 6.1 apresenta o gráfico de dispersão gerado a partir do

Tabela 6.6: Instanciação do modelo para redes de acesso

Serviço	TR-144		SDCN	
	Custo Operacional	Custo Recursos	Custo Operacional	Custo Recursos
Internet Banda Larga	22	1332,40	14	1975,20
VoIP	21	1332,40	13	1975,20
IPTV	21	634,40	13	1502,40
Banda sob Demanda (BWoD)	20	744,60	12	1647,60
Pay for QoS (PQS)	20	744,60	12	1647,60
Roteadores Gerenciados (MRCP)	14	1001,80	12	1539,60

Figura 6.1: Aplicação do modelo de comparação as duas arquiteturas



modelo. O eixo das ordenadas representa o custo operacional, adimensional, enquanto as abscissas indicam o custo de recursos, em bytes. A escala de cada eixo foi ajustada para melhor visualização. Os pontos verdes representam os serviços na arquitetura TR-144, enquanto os vermelhos correspondem à proposta SDCN. As setas são apenas indicativas, e relacionam as diferentes instâncias de cada serviço. O objetivo do modelo proposto é efetuar uma análise simplificada, capaz de identificar tendências e oportunidades de melhoria, e não propõe-se a determinar os custos exatos. Dessa forma, a movimentação dos serviços é mais relevante do que o posicionamento final de cada um.

Observa-se a existência agrupamentos de serviços na arquitetura TR-144. O primeiro deles reúne os serviços de Internet Banda Larga e VoIP, aqueles que requerem o provisionamento de um circuito dedicado, uma operação custosa por envolver atividades em diversos domínios administrativos. O segundo grupo reúne os serviços de IPTV e de engenharia de tráfego (BWoD e PQS), que apesar de também exigirem um provisionamento complexo, englobando vários domínios, não possuem tantos parâmetros para transferir entre eles. A migração para a arquitetura SDCN proporcionou a mesma redução da complexidade nos dois grupos, originada na simplificação da rede de transporte e agregação. Também houve um crescimento no uso de recursos em ambos os grupos, mais acentuado no segundo grupo devido ao predomínio de características dinâmicas, ditadas pelo assinantes, naqueles serviços.

O serviço MRCP aparece como único representante de seu grupo na arquitetura

TR-144, por possuir características distintas dos demais serviços. Apesar de englobar poucos domínios administrativos, o tamanho do estado associado é considerável. Ao migrar para a arquitetura SDCN, o roteador gerenciado passa a ter interações com serviços virtualizados no Controlador SDN, o que é mais custoso do que acessar serviços tradicionais distribuídos. Por outro lado, a concentração de aplicações no Controlador simplifica a administração.

A expectativa da proposta SDCN era que a adoção do paradigma SDN reduzisse a complexidade de gerenciamento dos serviços, beneficiando-se da Visão centralizada da rede, e de interface OpenFlow unificada, para configurar e monitorar a infraestrutura. Esse objetivo foi alcançado segundo o resultado do modelo, já que todos os serviços apresentaram uma redução do custo operacional. Os resultados são compatíveis com análises quantitativas existentes sobre a adoção do modelo SDN, como visto no projeto SPARC (seção 3.1). O diferencial é que aqui foram obtidos através de um estudo da complexidade associada à infraestrutura e aos serviços que deseja-se oferecer ao assinante.

O aumento de até 136,0% no tráfego associado ao gerenciamento também é alinhado com o observado em outros estudos, porém dessa vez obtidos através de simulação. O crescimento do tráfego revela que a redução da complexidade da operação é obtida, em parte, com o maior uso da capacidade da rede. Essa informação é útil ao planejar-se a migração das redes existentes para o modelo SDN, já que a maior parte dos provedores opta por canais de gerenciamento *in-band*, ou seja, que disputam recursos com o tráfego do assinante.

Esta proposta não tem o objetivo de determinar o custo TOC de cada modelo de rede avaliado, ao contrário de outros modelos tecno-econômicos que através de análise quantitativa mapeiam todos os elementos da infraestrutura e seus custos associados. No entanto, a proposta pode ser utilizada para estimar o OPEX dos modelos de rede considerados, desde que conheça-se valores do modelo de referência. Uma vez que o *Custo Operacional* do modelo é um valor abstrato e adimensional, o resultado obtido é apenas uma aproximação, que pode ser utilizada para justificar um estudo mais detalhado.

7 CONCLUSÕES

Nessa dissertação foi proposto um modelo de comparação de arquiteturas de rede. Em relação às alternativas existentes, a proposta difere-se por focar nos aspectos relacionados aos serviços oferecidos ao usuário. Ao invés de estimar o custo financeiro da operação, o modelo preocupa-se com o gerenciamento da estrutura, com a quantidade de recursos destinados a esse fim e com a dificuldade de configurar e manter os serviços. O método de comparação combina dados obtidos a partir de simulação e de análise qualitativa da complexidade de operar um serviço nessa arquitetura. No final, o modelo pode indicar o impacto de uma modificação na arquitetura sobre os serviços ofertados.

A motivação para criar o modelo de comparação foi o surgimento de redes de acesso baseadas nos princípios de SDN, tais como as propostas SplitArchitecture (SPARC) e CORD (AT&T). A indicação do mercado que de operadoras de telefonia e provedores de Internet podem adotar um desses padrões motivou um estudo dos mesmos, e revelou a necessidade de estabelecer uma comparação com a arquitetura TR-144 existente. Para fins deste estudo utilizou-se a proposta SDCN, uma extrapolação dos resultados obtidos pelo SPARC para redes NGN.

O modelo de comparação utiliza dados obtidos através de simulação para estimar o consumo de recursos de cada serviço analisado. Elegeram-se o pacote NS-3, um simulador de redes de tempo discreto, como ferramenta para gerar esses resultados. Foram desenvolvidos modelos para diversos elementos de redes de acesso convencionais e OpenFlow, além dos protocolos necessários para sua operação. A complexidade de operar cada serviço é estimada através de comparações com quantidades conhecidas, utilizando uma escala própria.

Em relação às principais contribuições desta dissertação, destacamos:

- definição de um modelo de comparação de arquiteturas de rede focado no gerenciamento dos serviços oferecidos ao assinante.

Como contribuições secundárias, destacamos:

- criação de modelos da rede de acesso convencional para uso no simulador NS-3;
- criação de modelos OpenFlow para uso no NS-3.

Os resultados obtidos através do modelo de comparação indicam que a adoção dos princípios SDN em redes de acesso irá simplificar o gerenciamento da mesma. A redução do número de domínios administrativos promove uma operação com menos interações

homem-máquina e homem-homem, duas importantes fontes de falhas. Em contrapartida o padrão OpenFlow demanda mais recursos da infraestrutura, e uma vez que os tráfegos de assinantes e de gerência frequentemente compartilham os meios, pode impactar a rentabilidade da mesma.

Trabalhos derivados

O seguintes trabalhos derivados dessa dissertação foram produzidos até esta data:

- SOUZA, A. de; ROCHOL, J.; CECHIN, S. L. Subscriber session management on software defined carrier networks. In: **Symposium on Integrated Network and Service Management, 2015 IFIP/IEEE**. Ottawa, Canada: IEEE, 2015. (IM 2015).
- BLAZEJUK, A.; SOUZA, A. de; CECHIN, S. L. Problemas e soluções no desenvolvimento de componentes para o NS3: o caso do DHCP. In: **13^a Escola Regional de Redes**. Passo Fundo, Brasil: SBC, 2015. (ERRC 2015).

O artigo submetido ao IM2015 apresentou a proposta da arquitetura SDCN e como o serviço de sessões IP poderia ser implementado. Apesar de aceito como resumo (*short-paper*), terminou por ser excluído a pedido dos autores. Já o segundo foi um estudo de caso do desenvolvimento de modelos para o pacote NS-3.

Após a conclusão dos experimentos com simulação e da elaboração do modelo de comparação, identificamos a possibilidade de derivar outros quatro trabalhos a partir desta dissertação:

- um artigo apresentando a forma final da arquitetura SDCN e os resultados da simulação;
- um artigo introduzindo o modelo de comparação desenvolvido;
- um artigo apresentando os modelos desenvolvidos para as arquiteturas TR-144 e SDCN; e
- um tutorial sobre a construção de modelos de redes de acesso para o simulador NS-3.

Trabalhos futuros

Em relação aos trabalhos futuros, vislumbramos algumas tarefas que completam esta dissertação podendo dar origem a outros trabalhos. Alguns deles são:

- instanciar o modelo de comparação para a arquitetura SplitArchitecture (SPARC, 2013), investigando o impacto das simplificações utilizadas no modelo SDCN;
- instanciar o modelo de comparação para a arquitetura CORD (ON.Lab, 2015b), investigando o impacto da adoção do modelo NFV em redes de acesso definidas por software;
- estender o modelo de maneira a possibilitar que operadoras e provedores utilizem suas bases de dados de custos operacionais, gerando resultados mais próximos de sua realidade;
- adicionar novas dimensões ao modelo, tais como resiliência e escalabilidade. Os dados para essas análises podem ser obtidos através de simulação.
- avaliar outros serviços de rede, por exemplo Operadora Virtual (YIAKOUMIS et al., 2011). Nesse modelo de negócio uma empresa constrói e mantém os equipamentos da infraestrutura da rede de acesso, e então aluga frações dessa estrutura a uma ou mais Operadoras Virtuais; e
- construir uma rede real segundo a proposta SDCN, utilizando switches e controladores OpenFlow associados a um *Access Node* tradicional (OLT ou DSLAN), a fim de refinar o modelo.

REFERÊNCIAS

ACCENTURE. **Big trouble with “No Trouble Found” returns: confronting the high cost of customer returns.** [S.l.], 2008. Disponível em: <http://www.accenture.com/SiteCollectionDocuments/PDF/Accenture_Returns_Repairs.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. **Acessos: Banda larga fixa.** 2016. Disponível em: <<http://ftp.anatel.gov.br/dados/Acessos/>>. Acesso em: 20 oct. 2016.

ALSHABIBI, A.; HART, J. **Virtual OLT (vOLT).** 2016. Disponível em: <<http://opencord.org>>. Acesso em: 20 oct. 2016.

ARAÚJO, J. et al. Software-defined network support for transport resilience. In: **Network Operations and Management Symposium (NOMS), 2014 IEEE.** [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–8.

BAILEY, R. Elements of techno-economic modelling planning, provisioning and operation of virtualised networks. In: **2016 17th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (Networks).** [S.l.: s.n.], 2016. p. 25–30.

BANKS, J. **Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice.** [S.l.]: Wiley, 1998. (A Wiley-Interscience publication). ISBN 9780471134039.

BENNESBY, R. et al. An inter-AS routing component for software-defined networks. In: **Network Operations and Management Symposium (NOMS), 2012 IEEE.** [S.l.: s.n.], 2012. p. 138–145. ISSN 1542-1201.

BENSON, T.; AKELLA, A.; SHAIKH, A. Demystifying configuration challenges and trade-offs in network-based isp services. In: **Proceedings of the ACM SIGCOMM 2011 Conference.** New York, NY, USA: ACM, 2011. (SIGCOMM '11), p. 302–313. ISBN 978-1-4503-0797-0.

BONILLA, M. L.; BARBOSA, F. R.; MOSCHIM, E. Techno-economical comparison between GPON and EPON networks. In: **2009 ITU-T Kaleidoscope: Innovations for Digital Inclusions.** [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–5.

BROADBAND FORUM. **Broadband Multi-Service Architecture and Framework Requirements.** Fremont, CA, USA, 2007. Disponível em: <<http://www.broadband-forum.org/technical/download/TR-144.pdf>>.

BROADBAND FORUM. **Layer 2 Control Mechanism For Broadband Multi-Service Architectures.** Fremont, CA, USA, 2008. Disponível em: <<http://www.broadband-forum.org/technical/download/TR-147.pdf>>.

BROADBAND FORUM. **Using GPON Access in the context of TR-101.** Fremont, CA, USA, 2008. Disponível em: <<http://www.broadband-forum.org/technical/download/TR-156.pdf>>.

BROADBAND FORUM. **Migration to Ethernet-Based Broadband Aggregation**. Fremont, CA, USA, 2011. Disponível em: <http://www.broadband-forum.org/technical/download/TR-101_Issue-2.pdf>.

BROADBAND FORUM. **Multi-service Broadband Network Functional Modules and Architecture**. Fremont, CA, USA, 2012. Disponível em: <<http://www.broadband-forum.org/technical/download/TR-145.pdf>>.

BROADBAND FORUM. **Broadband Policy Control Framework**. Fremont, CA, USA, 2013. Disponível em: <http://www.broadband-forum.org/technical/download/TR-134_Corrigendum-1.pdf>.

BROADBAND FORUM. **Subscriber Sessions**. Fremont, CA, USA, 2013. Disponível em: <<http://www.broadband-forum.org/technical/download/TR-146.pdf>>.

BROADBAND FORUM. **Multi-service Broadband Network Architecture and Nodal Requirements**. Fremont, CA, USA, 2014. Disponível em: <<http://www.broadband-forum.org/technical/download/TR-178.pdf>>.

BROADBAND FORUM. **BBF Broadband 20/20 Vision**. Fremont, CA, USA, 2015. Disponível em: <<https://www.broadband-forum.org/broadband-forum-2020.php>>.

CASADO, M. et al. Ethane: taking control of the enterprise. **SIGCOMM Comput. Commun. Rev.**, ACM, New York, NY, USA, v. 37, n. 4, p. 1–12, ago. 2007. ISSN 0146-4833.

CASADO, M. et al. Fabric: a retrospective on evolving SDN. In: **Proceedings of the first workshop on Hot topics in software defined networks**. New York, NY, USA: ACM, 2012. (HotSDN '12), p. 85–90. ISBN 978-1-4503-1477-0.

COSTA-REQUENA, J.; GUASCH, V. F.; SANTOS, J. L. Software defined networks based 5G backhaul architecture. In: **Proceedings of the 9th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication**. New York, NY, USA: ACM, 2015. (IMCOM '15), p. 35:1–35:5. ISBN 978-1-4503-3377-1.

CRUZ, T. et al. How to provision and manage off-the-shelf sip phones in domestic and soho environments. In: **Local Computer Networks (LCN), 2011 IEEE 36th Conference on**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 42–49. ISSN 0742-1303.

CURTIS, A. R. et al. Devoflow: scaling flow management for high-performance networks. In: **Proceedings of the ACM SIGCOMM 2011 conference**. New York, NY, USA: ACM, 2011. (SIGCOMM '11), p. 254–265. ISBN 978-1-4503-0797-0.

ERICKSON, D. The beacon openflow controller. In: **Proceedings of the second ACM SIGCOMM workshop on Hot topics in software defined networking**. New York, NY, USA: ACM, 2013. (HotSDN '13), p. 13–18. ISBN 978-1-4503-2178-5.

FUJITSU NETWORK COMMUNICATIONS INC. **SDN and the Future of Service Provider Networks**. [S.l.], 2013. Disponível em: <<http://us.fujitsu.com/telecom>>. Acesso em: 10 jun. 2016.

- GOTH, G. Software-defined networking could shake up more than packets. **IEEE Internet Computing**, IEEE Computer Society, Los Alamitos, CA, USA, v. 15, n. 4, p. 6–9, 2011. ISSN 1089-7801.
- GREENBERG, A. et al. A clean slate 4d approach to network control and management. **SIGCOMM Comput. Commun. Rev.**, ACM, New York, NY, USA, v. 35, n. 5, p. 41–54, out. 2005. ISSN 0146-4833.
- GUDE, N. et al. NOX: towards an operating system for networks. **SIGCOMM Comput. Commun. Rev.**, ACM, New York, NY, USA, v. 38, n. 3, p. 105–110, jul. 2008. ISSN 0146-4833.
- HANDLEY, M.; HODSON, O.; KOHLER, E. Xorp: an open platform for network research. **SIGCOMM Comput. Commun. Rev.**, ACM, New York, NY, USA, v. 33, n. 1, p. 53–57, jan. 2003.
- HELLER, B.; SHERWOOD, R.; MCKEOWN, N. The controller placement problem. **SIGCOMM Comput. Commun. Rev.**, ACM, New York, NY, USA, v. 42, n. 4, p. 473–478, set. 2012. ISSN 0146-4833.
- HU, C. H. et al. Home network management for IPTV service operations: A service provider perspective. In: **Network Operations and Management Symposium Workshops (NOMS Wksp), 2010 IEEE/IFIP**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–7.
- IETF. **Forwarding and Control Element Separation WG Charter**. 2001. Disponível em: <<https://datatracker.ietf.org/wg/forces/charter>>. Acesso em: 10 ago. 2013.
- IMPLIED LOGIC LIMITED. **Strategic Telecoms Evaluation Model (STEM)**. 2016. Disponível em: <<https://www.implicitlogic.com/STEM/>>. Acesso em: 10 dec. 2016.
- INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **Next Generation Networks: Frameworks and functional architecture models**. Geneva, 2004.
- KATTA, N. P.; REXFORD, J.; WALKER, D. Incremental consistent updates. In: **Proceedings of the second ACM SIGCOMM workshop on Hot topics in software defined networking**. New York, NY, USA: ACM, 2013. (HotSDN '13), p. 49–54. ISBN 978-1-4503-2178-5.
- KEMPF, J. et al. OpenFlow MPLS and the open source label switched router. In: **Proceedings of the 23rd International Teletraffic Congress**. [S.l.]: International Teletraffic Congress, 2011. (ITC '11), p. 8–14. ISBN 978-0-9836283-0-9.
- KERPEZ, K. J. et al. Software-defined access networks. **IEEE Communications Magazine**, v. 52, n. 9, p. 152–159, September 2014. ISSN 0163-6804.
- KIND, M. et al. SplitArchitecture: Applying the Software Defined Networking Concept to Carrier Networks. In: **World Telecommunications Congress (WTC), 2012**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–6.
- KNOLL, T. M. Life-cycle cost modelling for NFV/SDN based mobile networks. In: **2015 Conference of Telecommunication, Media and Internet Techno-Economics (CTTE)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–8.

KOHLER, E. et al. The click modular router. **ACM Trans. Comput. Syst.**, ACM, New York, NY, USA, v. 18, n. 3, p. 263–297, ago. 2000.

MA, R. T.; LUI, J. C.; MISRA, V. On the evolution of the internet economic ecosystem. In: **Proceedings of the 22Nd International Conference on World Wide Web**. New York, NY, USA: ACM, 2013. (WWW '13), p. 849–860. ISBN 978-1-4503-2035-1.

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.

MITRA, D.; WANG, Q. A model-based study of the impact of managed services and the spawning of applications in broadband networks. In: **Proceedings of the 24th International Teletraffic Congress**. [S.l.]: International Teletraffic Congress, 2012. (ITC '12), p. 36:1–36:8. ISBN 978-1-4503-1896-9.

MÜLLER, L. F. et al. Survivor: An enhanced controller placement strategy for improving SDN survivability. In: **2014 IEEE Global Communications Conference**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1909–1915. ISSN 1930-529X.

NAUDTS, B. et al. Techno-economic analysis of software defined networking as architecture for the virtualization of a mobile network. In: **Software Defined Networking (EWSN), 2012 European Workshop on**. Darmstadt, Germany: [s.n.], 2012. p. 67–72.

NEC CORPORATION. **SDN & NFV: The Future for Telecoms**. 2014. Disponível em: <<http://www.nec.com>>. Acesso em: 26 mai. 2014.

NS-3 PROJECT. **NS-3 Network simulator**. 2009. Disponível em: <<https://www.nsnam.org>>. Acesso em: 4 sep. 2016.

NS-3 PROJECT. **NS-3 manual**. [S.l.], 2016. Disponível em: <<https://www.nsnam.org/docs/release/3.26/manual/ns-3-manual.pdf>>. Acesso em: 4 oct. 2016.

NS-3 PROJECT. **NS-3 model library**. [S.l.], 2016. Disponível em: <<https://www.nsnam.org/docs/release/3.26/models/ns-3-model-library.pdf>>. Acesso em: 4 oct. 2016.

OPEN COMPUTE PROJECT. **NFV OLT Line Card Specification**. 2015. Disponível em: <<http://www.opencompute.org/wiki/Telcos>>. Acesso em: 20 oct. 2016.

OPEN NETWORKING FOUNDATION. NTT Provider Edge Use Case. **Migration Use Cases and Methods**, Open Networking Foundation, p. 18–28, 2013.

OPEN NETWORKING FOUNDATION. **OpenFlow Management and Configuration Protocol 1.1.1**. 2013. Disponível em: <<https://www.opennetworking.org/sdn-resources/onf-specifications>>. Acesso em: 26 mai. 2013.

OPEN NETWORKING FOUNDATION. **Operator Network Monetization Through OpenFlow-Enabled SDN**. 2013. Disponível em: <<https://www.opennetworking.org/sdn-resources/onf-specifications>>. Acesso em: 26 mai. 2014.

OPEN NETWORKING FOUNDATION. **OpenFlow Switch Specification 1.5.1**. 2015. Disponível em: <<https://www.opennetworking.org/sdn-resources/onf-specifications/>>. Acesso em: 26 mai. 2015.

OPEN NETWORKING FOUNDATION. **Framework and Architecture for the Application of SDN to Carrier networks**. [S.l.], 2016. Disponível em: <<https://www.opennetworking.org/sdn-resources/onf-specifications/>>. Acesso em: 1 nov. 2016.

OPEN NETWORKING LAB. **Central office re-architected as a Datacenter**. 2015. Disponível em: <<http://opencord.org/>>. Acesso em: 20 oct. 2016.

OPEN NETWORKING LAB. **CORD: Central office re-architected as a Datacenter**. 2015. Disponível em: <<https://goo.gl/Ikt1y4>>. Acesso em: 20 oct. 2016.

OPEN NETWORKING LAB. **ONOS: Open Network Operating System**. 2015. Disponível em: <<http://onosproject.org/>>. Acesso em: 20 oct. 2016.

OPEN NETWORKING LAB. **XOS: a service abstraction layer for CORD**. 2015. Disponível em: <<http://opencord.org/>>. Acesso em: 20 oct. 2016.

OPEN NETWORKING LAB. **CORD Project Welcomes Five New Collaborators**. 2016. Disponível em: <<http://opencord.org/cord-project-welcomes-five-new-collaborators/>>. Acesso em: 20 oct. 2016.

OPENDAYLIGHT FOUNDATION. **OpenDaylight Controller**. 2013. Disponível em: <<https://www.opendaylight.org/>>. Acesso em: 10 ago. 2016.

PETRY, T.; SILVA, R. da Fonte Lopes da; BARCELLOS, M. P. Off the wire control: Improving the control plane resilience through cellular networks. In: **2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 5308–5313. ISSN 1550-3607.

PLEXXI. **OpEx savings and the ever-present emergence of SDN**. [S.l.], 2014. Disponível em: <<http://www.plexxi.com/2014/10/opex-savings-ever-present-emergence-sdn/>>. Acesso em: 10 jun. 2016.

PONGRÁCZ, G. et al. Cheap silicon: a myth or reality? picking the right data plane hardware for software defined networking. In: **Proceedings of the second ACM SIGCOMM workshop on Hot topics in software defined networking**. New York, NY, USA: ACM, 2013. (HotSDN '13), p. 103–108. ISBN 978-1-4503-2178-5.

RASMUSSEN, J. **The Agile Samurai: How Agile Masters Deliver Great Software**. 1st. ed. [S.l.]: Pragmatic Bookshelf, 2010. ISBN 1934356581, 9781934356586.

REITBLATT, M. et al. Consistent updates for software-defined networks: change you can believe in! In: **Proceedings of the 10th ACM Workshop on Hot Topics in Networks**. New York, NY, USA: ACM, 2011. (HotNets-X), p. 7:1–7:6. ISBN 978-1-4503-1059-8.

SDN CENTRAL LLC. **SDN Market Sizing**. USA, 2013. Disponível em: <<http://www.sdncentral.com/sdn-market-size/>>. Acesso em: 19 abr. 2014.

SEN, S. et al. A survey of smart data pricing: Past proposals, current plans, and future trends. **ACM Comput. Surv.**, ACM, New York, NY, USA, v. 46, n. 2, p. 15:1–15:37, nov. 2013. ISSN 0360-0300.

SEN, S. et al. When the price is right: Enabling time-dependent pricing of broadband data. In: **Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems**. New York, NY, USA: ACM, 2013. (CHI '13), p. 2477–2486. ISBN 978-1-4503-1899-0.

SEZER, S. et al. Are we ready for SDN? implementation challenges for software-defined networks. **IEEE Communications Magazine**, v. 51, n. 7, p. 36–43, July 2013. ISSN 0163-6804.

SPARC consortium. **Revised definition of use cases and carrier requirements**. [S.l.], 2012. Disponível em: <<http://www.fp7-sparc.eu/>>. Acesso em: 10 jun. 2014.

SPARC consortium. **Split Architecture Carrier Grade Networks**. 2013. Disponível em: <<http://www.fp7-sparc.eu/>>. Acesso em: 10 dez. 2013.

STAESSENS, D. et al. Software defined networking: Meeting carrier grade requirements. In: **Local Metropolitan Area Networks (LANMAN), 2011 18th IEEE Workshop on**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–6. ISSN 1944-0367.

SZEGEDI, P. Evaluation of scalable CAPEX models in ASON/GMPLS-based IP networks. **Campus-Wide Information Systems**, v. 24, n. 4, p. 292–302, 2007.

VERBRUGGE, S. et al. Methodology and input availability parameters for calculating opex and capex costs for realistic network scenarios. **JOURNAL OF OPTICAL NETWORKING**, OPTICAL SOC AMER, v. 5, n. 6, p. 509–520, 2006. ISSN 1536-5379.

VERBRUGGE, S. et al. Modeling operational expenditures for telecom operators. In: **Conference on Optical Network Design and Modeling, 2005**. [S.l.: s.n.], 2005. p. 455–466.

YEGANEH, S.; TOOTOONCHIAN, A.; GANJALI, Y. On scalability of software-defined networking. **Communications Magazine, IEEE**, v. 51, n. 2, p. 136–141, 2013. ISSN 0163-6804.

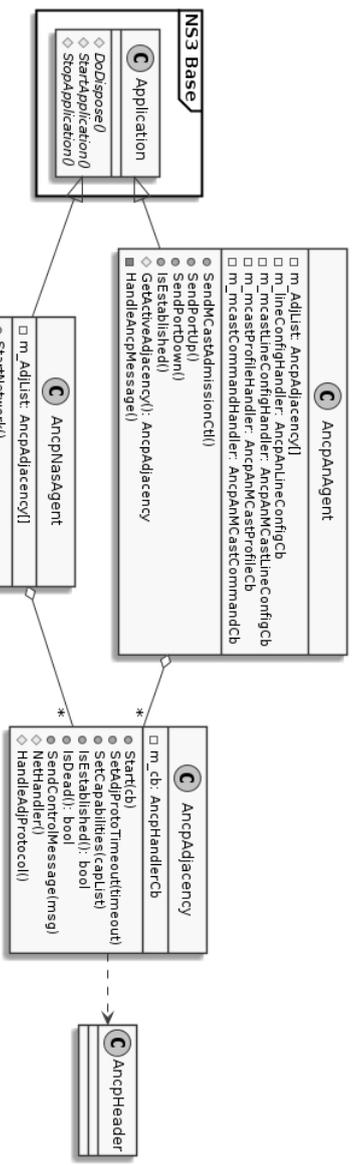
YIAKOUMIS, Y. et al. Slicing home networks. In: **Proceedings of the 2nd ACM SIGCOMM workshop on Home networks**. New York, NY, USA: ACM, 2011. (HomeNets '11), p. 1–6. ISBN 978-1-4503-0798-7.

YU, M. et al. Scalable flow-based networking with difane. In: **Proceedings of the ACM SIGCOMM 2010 conference**. New York, NY, USA: ACM, 2010. (SIGCOMM '10), p. 351–362. ISBN 978-1-4503-0201-2.

APÊNDICE A — DIAGRAMA DE CLASSES DO MODELO SIMULADO

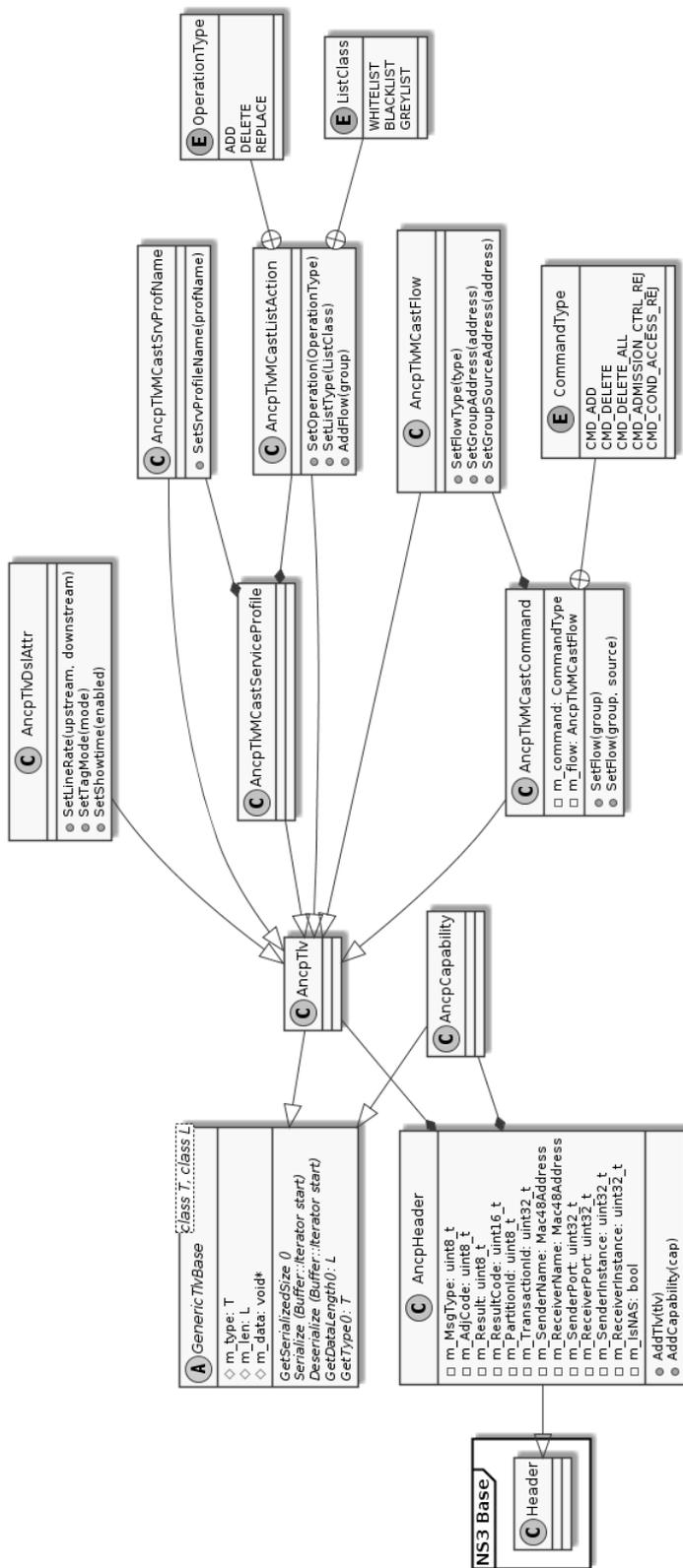
A seguir é apresentada a modelagem das classes implementadas no simulador NS-3:

- Agentes ANCP
- Protocolo ANCP (RFC6320)
- Modelo de Access Node
- Agentes ANCP
- Protocolo ANCP (RFC6320)
- Modelo de Access Node
- Cliente BFD-echo (RFC-5880)
- Plano de controle do BNG
- MAC Bridge (IEEE 802.1d)
- Protocolo DHCP (RFC-2131) e aplicações
- Protocolo IGMP (RFC-2236) e serviços Multicast
- Protocolo RADIUS (RFC-2865 e RFC-2866) e aplicações
- Protocolo OpenFlow
- Vista de Rede do controlador OpenFlow
- Controlador OpenFlow e aplicações
- Plano de controle do Switch OpenFlow



(c) 2015 Alexander Silva de Souza

Figura A.1: Agentes ANCP



(c) 2016 Alexander Silva de Souza

Figura A.2: Protocolo ANCP (RFC6320)

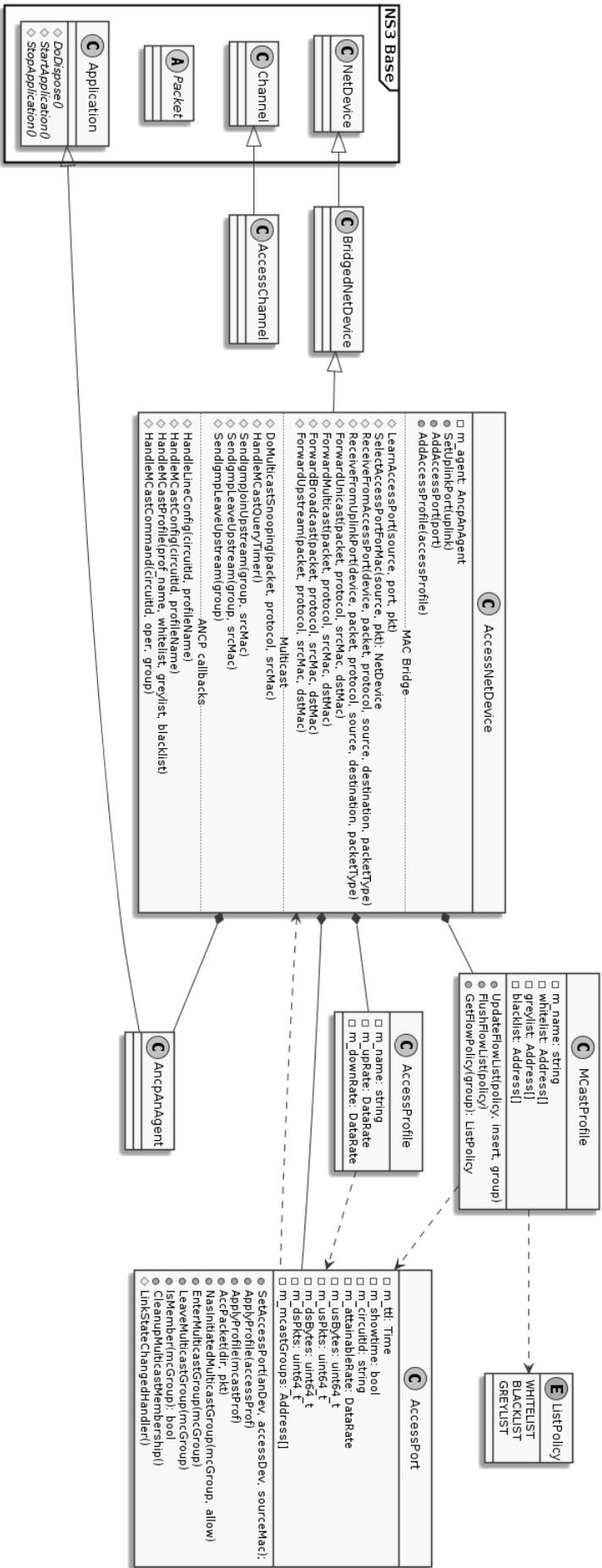
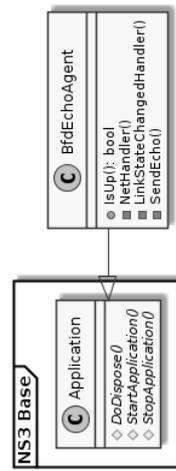


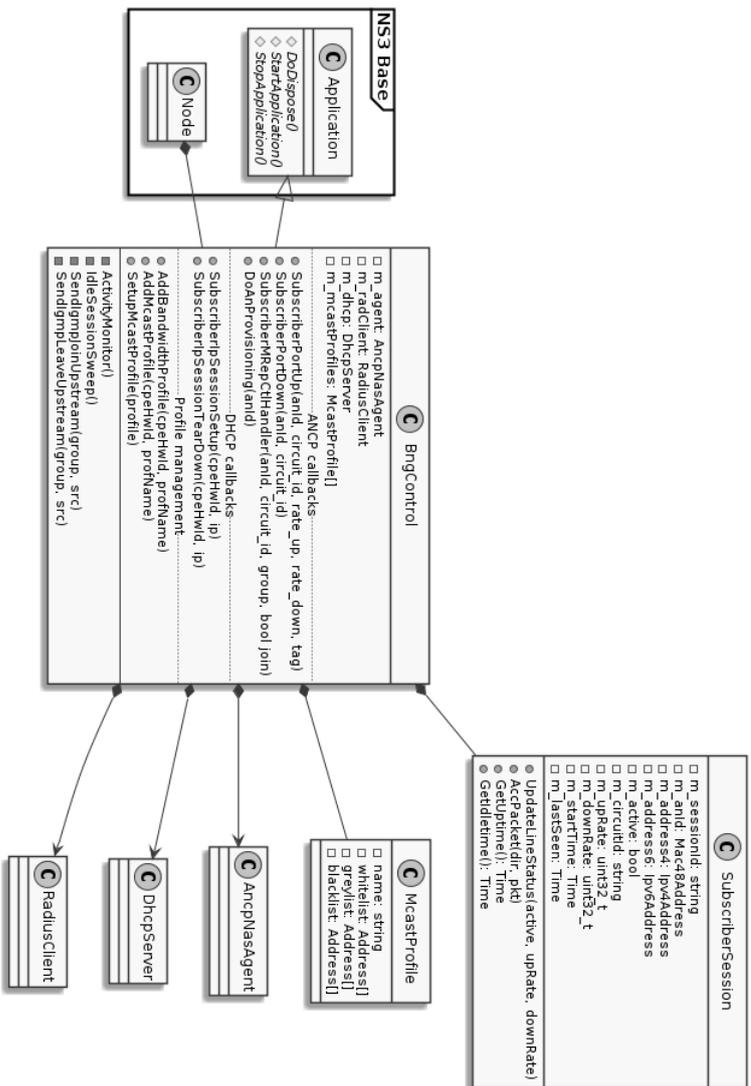
Figura A.3: Modelo de Access Node

(c) 2016 Alexander Silva de Souza



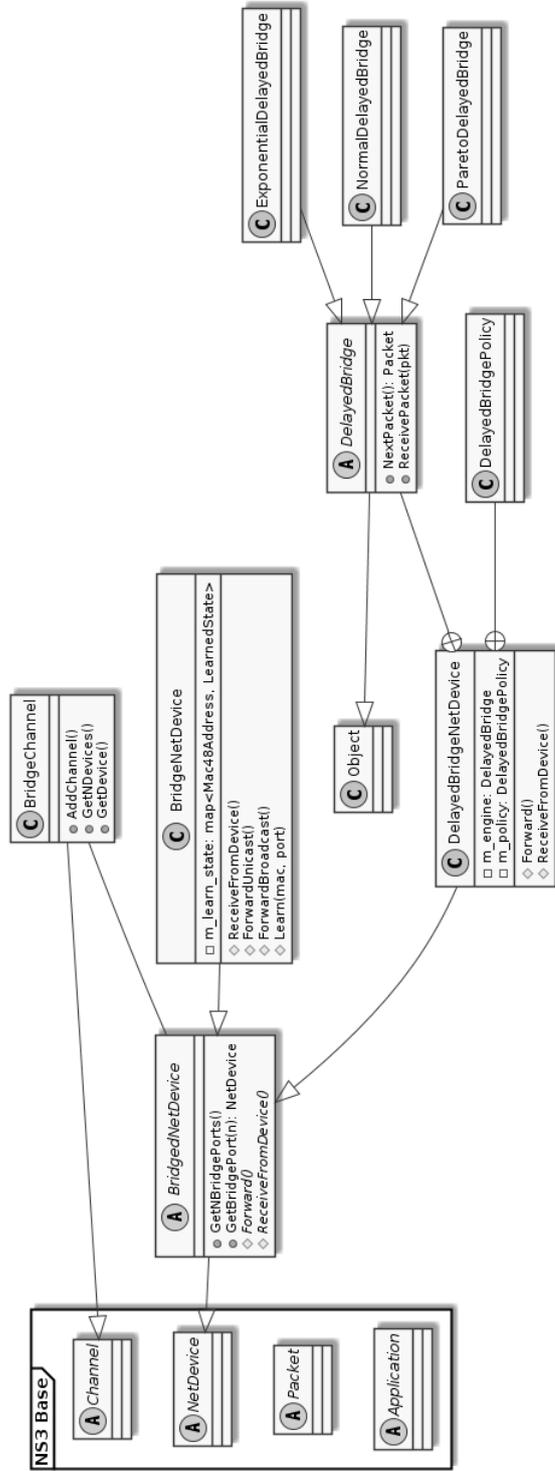
(c) 2016 Alexander Silva de Souza

Figura A.4: Cliente BFD-echo (RFC-5880)



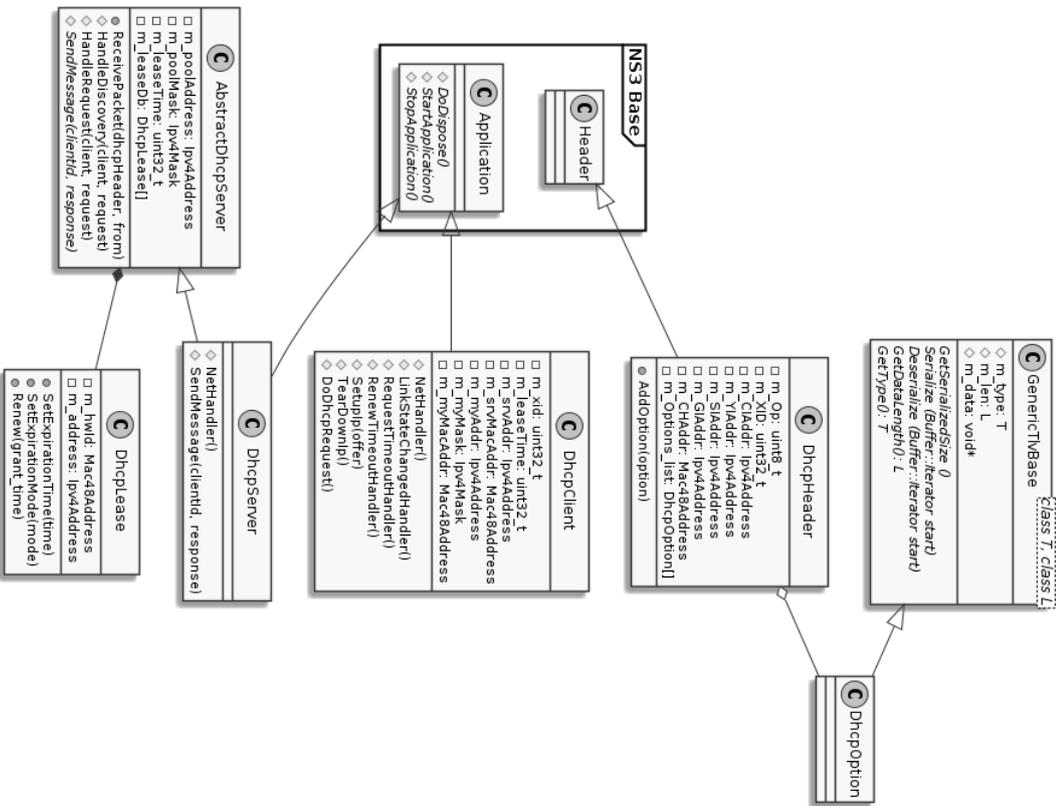
(c) 2015 Alexander Silva de Souza

Figura A.5: Plano de controle do BNG



(c) 2016 Alexander Silva de Souza

Figura A.6: MAC Bridge (IEEE 802.1d)



(c) 2016 Alexander Silva de Souza

Figura A.7: Protocolo DHCP (RFC-2131) e aplicações

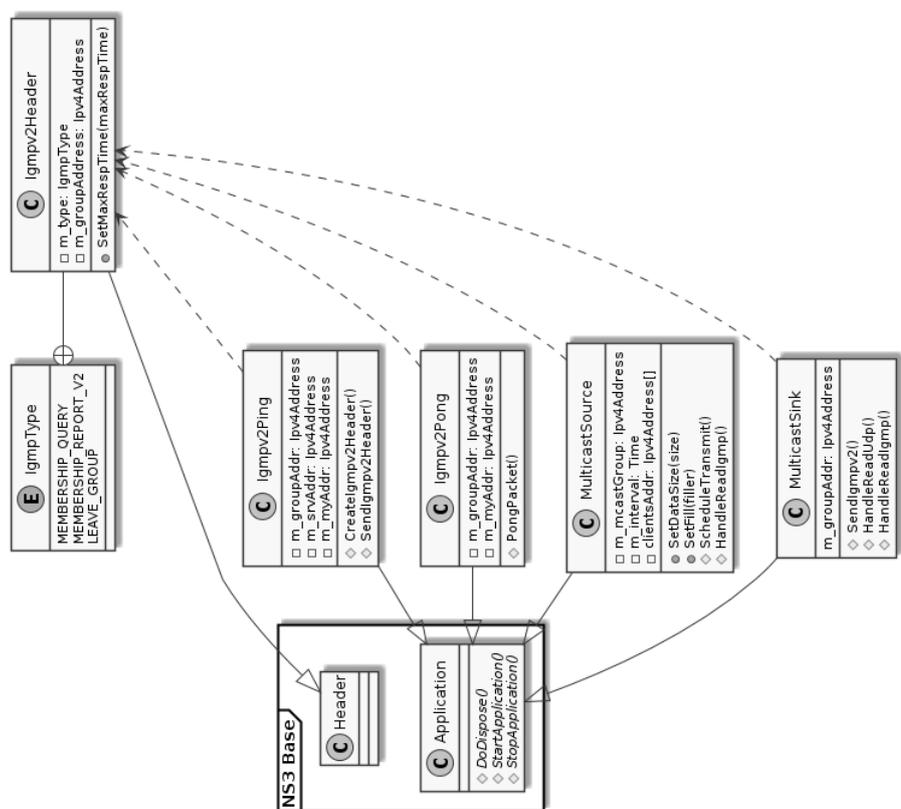
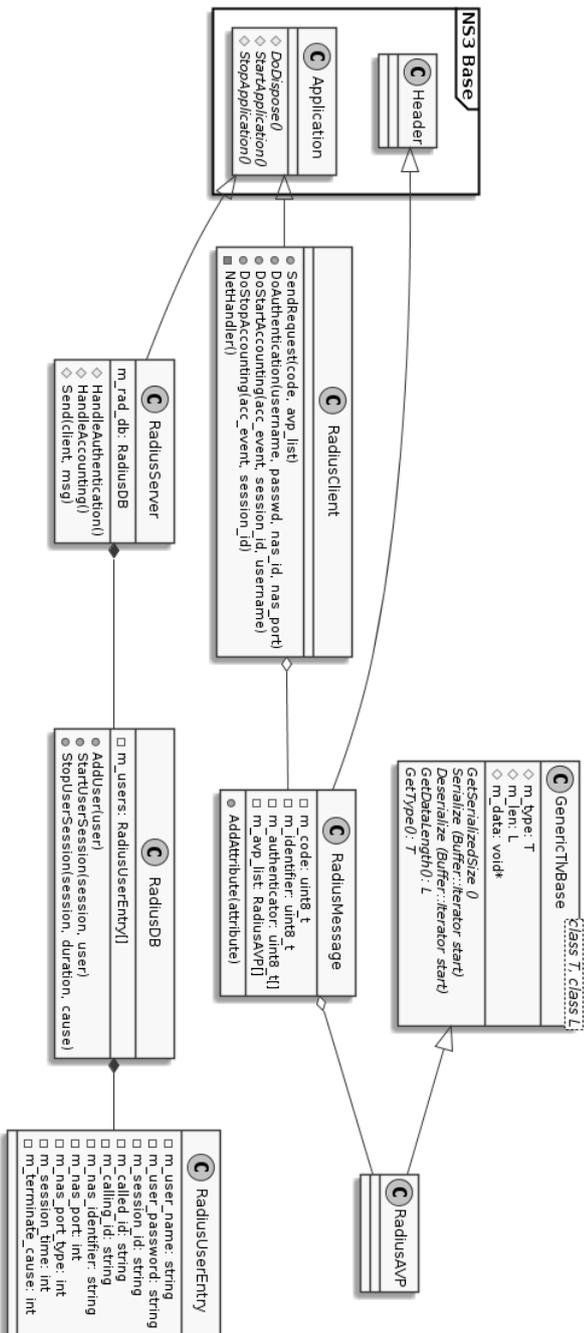
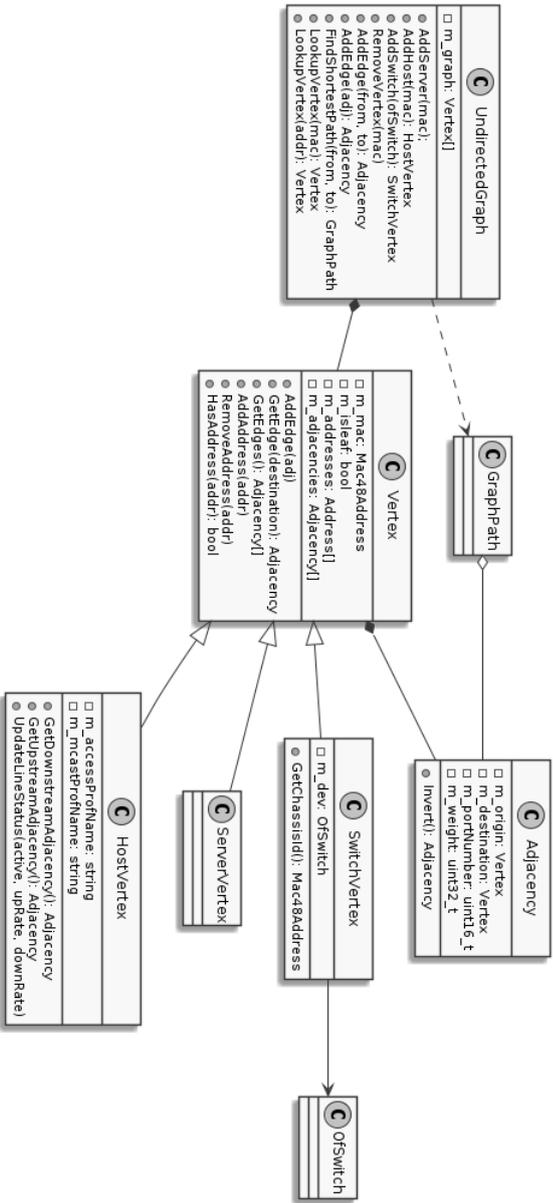


Figura A.8: Protocolo IGMP (RFC-2236) e serviços Multicast



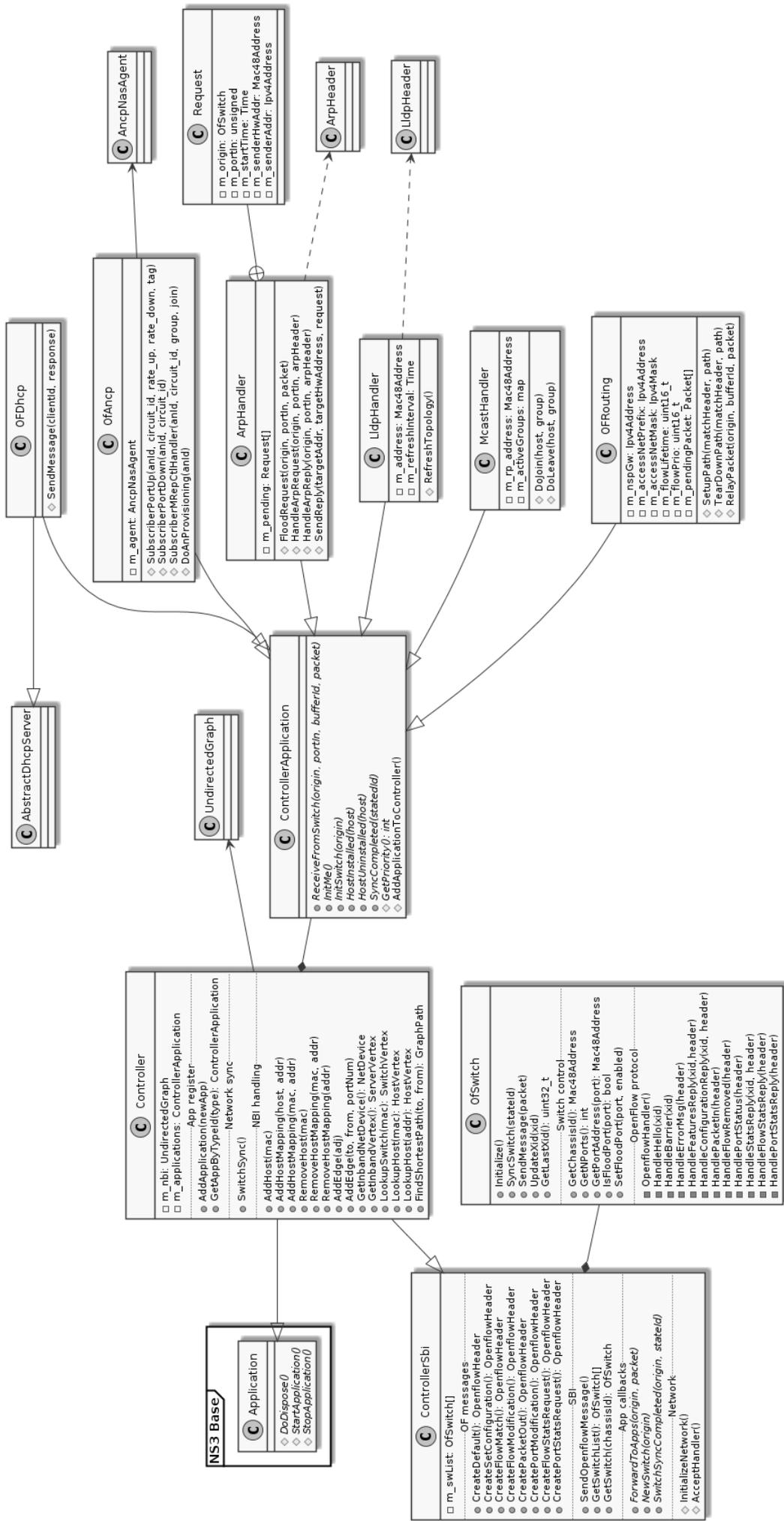
(C) 2015 Alexander Silva de Souza

Figura A.9: Protocolo RADIUS (RFC-2865 e RFC-2866) e aplicações



(c) 2015 Alexander Silva de Souza

Figura A.11: Vista de Rede do controlador OpenFlow



(c) 2016 Alexander Silva de Souza

Figura A.12: Controlador OpenFlow e aplicações

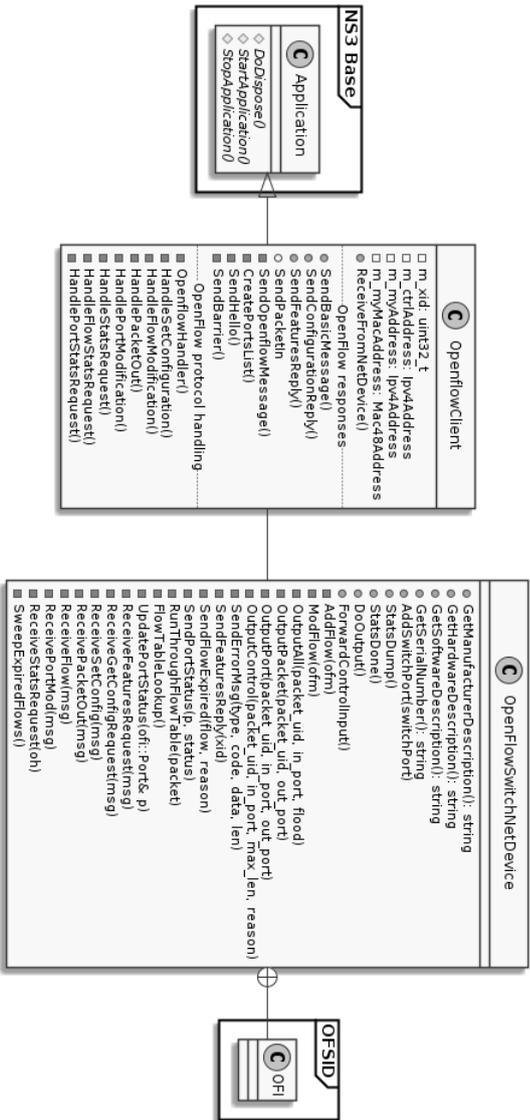


Figura A.13: Plano de controle do Switch OpenFlow