

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE INFORMÁTICA
CURSO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

ALEXANDRE GUSTAVO WERMANN

**DYNAMIX: Um Mercado de Acordos
Dinâmicos em Pontos de Troca de Tráfego**

Monografia apresentada como requisito parcial
para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia de Computação

Orientador: Prof. Dr. Marinho Pilla Barcellos
Co-orientador: Prof. Me. Pedro de Botelho
Marcos

Porto Alegre
Dezembro de 2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Prof. Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitora: Profa. Jane Tutikian

Pró-Reitor de Graduação: Prof. Vladimir Pinheiro do Nascimento

Diretora do Instituto de Informática: Profa. Carla Maria Dal Sasso Freitas

Coordenador do Curso de Engenharia de Computação: Prof. Raul Fernando Weber

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

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Carlos e Marciela, e ao meu irmão Henrique, por todos os conselhos e por me propiciarem as condições necessárias para que essa etapa fosse concluída. Obrigado por me ensinarem a batalhar pelos meus sonhos.

À Franciele, pela companhia, paciência e compreensão. Obrigado por me apoiar a seguir em frente e sempre acreditar no meu potencial.

Agradeço aos meus orientadores Marinho Pilla Barcellos e Pedro de Botelho Marcos por me acolherem com toda disposição no decorrer do trabalho. Obrigado pelos conselhos e conversas fora de hora.

Agradeço ao IX-RS, em especial ao Leandro Márcio Bertholdo, por disponibilizar os traços dos acordos bilaterais analisados neste trabalho.

Aos professores Alberto Egon Schaeffer-Filho e Lisandro Zambenedetti Granville por aceitarem meu convite para contribuir na elaboração deste trabalho.

Às pessoas que contribuíram ou fizeram parte da minha formação acadêmica. Muito obrigado.

RESUMO

Os Pontos de Troca de Tráfego (IXPs, do inglês *Internet eXchange Points*) possuem um papel fundamental na arquitetura da Internet. A rica conectividade oferecida pelos IXPs permite diminuição da distância, redução dos custos e maior facilidade de troca de tráfego entre seus membros. Atualmente, acordos de troca de tráfego possuem natureza estática, sendo estabelecidos em dias ou semanas. Isso atrasa a adaptação de sistemas autônomos a mudanças na topologia e/ou carga, e não permite que o preço de enlaces varie conforme oferta e demanda, resultando em contratos de longa duração e recursos super-provisionados. Nesse contexto, o presente trabalho apresenta uma proposta de mercado de acordos dinâmicos em Pontos de Troca de Tráfego, denominada DYNAMIX, buscando oferecer uma maior dinamicidade no estabelecimento de acordos entre sistemas autônomos.

Palavras-chave: Ponto de Troca de Tráfego. Mercado. Economia da Internet.

ABSTRACT

Internet eXchange Points (*IXPs*) play a key role in Internet architecture. The rich connectivity provided by IXPs decreases distances, reduces costs and improves the exchange of traffic between its members. Currently, Internet traffic agreements have a static nature, take hours or days to be settled, limiting Autonomous Systems (ASes) to respond to changes in topology or loads. In addition, link prices do not reflect fluctuation of offer-demand, resulting in long-term contracts and overprovisioned resources. In this context, this work introduces DYNAMIX, a **DY**Namic **A**greement **M**arketplace on **I**nternet **eX**change Points.

Keywords: Internet eXchange Points, Marketplace, Internet Economics.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMS-IX	Amsterdam Internet Exchange
AS	Autonomous System
API	Application Programming Interface
BGP	Border Gateway Protocol
CDN	Content Delivery Network
CGI	Comitê Gestor da Internet
CXP	Control Exchange Point
DDoS	Distributed Denial-of-Service
DYNAMIX	Dynamic Agreement Marketplace on Internet Exchange Points
HTML	HyperText Markup Language
IP	Internet Protocol
iSDX	Industrial-Scale Software Defined Internet Exchange
ISP	Internet Service Provider
IXP	Internet eXchange Point
JSON	JavaScript Object Notation
MAC	Media Access Control
MINT	Market for Internet Transit
NAP	Network Access Point
QoS	Quality of Service
REST	Representational State Transfer
SDN	Software Defined Network
SDX	Software Defined Internet Exchange
SR	Servidor de Rotas
URN	Uniform Resource Name

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Comparação entre peering bilateral e multilateral.....	13
Figura 4.1	Arquitetura conceitual do DYNAMIX.	20
Figura 4.2	Diagrama de tempo do caso de uso 1	23
Figura 4.3	Diagrama de tempo do caso de uso 2	24
Figura 4.4	Arquitetura dos planos de aplicação, de controle e de dados	25
Figura 4.5	Esquema de compilação de políticas do SDX.....	27
Figura 5.1	Picos de tráfego diário do acordo A.	29
Figura 5.2	Função de distribuição acumulada da utilização do enlace no mês de agosto.....	30
Figura 5.3	Falha identificada no acordo B.	32
Figura 5.4	Falhas identificadas no acordo C.	32
Figura 5.5	Função de dispersão do tráfego diário durante o mês de agosto de 2016.....	33
Figura 5.6	Aumento inesperado do tráfego observado no acordo A.....	34
Figura 5.7	Diagrama de entidades do protótipo desenvolvido.....	36
Figura 5.8	Mensagens de atualização de políticas enviadas ao controlador.	37
Figura 5.9	Arquitetura do protótipo desenvolvido.	38
Figura 5.10	Tela administrativa do Mercado do IXP.....	39
Figura 5.11	Tela administrativa do sistema autônomo AS2.....	39
Figura 5.12	Tela administrativa do sistema autônomo AS3.....	40
Figura 5.13	Cenário utilizado nas emulações.	41
Figura 5.14	Ocupação dos enlaces de AS2 e AS3 no cenário de falha.....	41
Figura 5.15	Ocupação dos enlaces de AS2 e AS3 no cenário de aumento de tráfego....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Comparativo entre MINT, Route Bazaar, CXP e DYNAMIX.	18
Tabela 4.1 Mensagens do protocolo proposto.....	22
Tabela 5.1 Custos para acordos base e acordos temporários sob demanda.	31
Tabela 5.2 Mapeamento das mensagens do protocolo proposto.	35

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 CONCEITOS	12
2.1 Pontos de Troca de Tráfego	12
2.2 Acordos de Troca de Tráfego	14
2.3 Acordos entre Entidades da Internet	15
3 TRABALHOS RELACIONADOS	16
3.1 Pesquisas em IXPs	16
3.2 Caminhos Interdomínio Fim-a-Fim	17
3.3 Diferenciais	18
4 DYNAMIX	19
4.1 Requisitos	19
4.2 Arquitetura	20
4.3 Anúncios	21
4.4 Protocolo	22
4.5 Atualização de políticas	25
5 AVALIAÇÃO E TESTES DO PROTÓTIPO	28
5.1 Análise do tráfego do IX-RS	28
5.1.1 Subutilização de Recursos	29
5.1.2 Falhas	31
5.1.3 Variações de Carga.....	33
5.2 Prototipação	34
5.2.1 Plano de Aplicação	35
5.2.2 Plano de Controle.....	36
5.2.3 Plano de Dados	37
5.3 Testes do Protótipo	38
5.3.1 Testes do Plano de Aplicação	38
5.3.2 Testes do Plano de Controle.....	40
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
REFERÊNCIAS	44
APÊNDICE A — TRABALHO DE GRADUAÇÃO I	46

1 INTRODUÇÃO

Os Pontos de Troca de Tráfego (*IXPs*, ou *Internet eXchange Points*) tornaram-se pontos estratégicos na topologia da Internet. Os IXPs facilitam a interconexão entre sistemas autônomos (*ASes*, ou *Autonomous Systems*), encurtam caminhos e reduzem os custos de trânsito de seus membros. A quantidade de participantes dos Pontos de Troca de Tráfego tem crescido cerca de 10% e 20% anualmente e o aumento do volume de tráfego tem atingido taxas entre 50% e 100% no mesmo período (RICHTER et al., 2014). Entre os mais de 500 IXPs existentes no mundo, os maiores contam com até 1000 membros e possuem tráfego comparável ao de provedores de serviço de Internet (*ISPs*, ou *Internet Service Provider*) de nível 1.

Apesar dos avanços tecnológicos da Internet, o modo como sistemas autônomos relacionam-se comercialmente permanece o mesmo. Acordos de troca de tráfego possuem natureza estática, são estabelecidos em dias ou semanas, atrasando a adaptação de ASes a mudanças na topologia ou aumento inesperado de tráfego. Além disso, o preço de enlaces não varia conforme variações dinâmicas na oferta e demanda, resultando em contratos de longa duração e recursos super-provisionados (NORTON, 2014). Por isso, argumentamos que aumentar a dinamicidade no processo de estabelecimento de acordos de troca de tráfego permitiria avanços nas relações comerciais entre ASes.

Tendo em vista as características dos Pontos de Troca de Tráfego e as limitações no estabelecimento de acordos inter-domínio, este trabalho apresenta um mercado de acordos dinâmicos em IXPs, chamado DYNAMIX (**D**YNAmic **A**greement **M**arketplace on **I**nternet **eX**change **P**oints). Essa proposta possibilita que sistemas autônomos anunciem e estabeleçam acordos de curta duração, na média, mais adequados às suas necessidades imediatas. As informações contidas nos anúncios são categorizadas em quatro classes diferentes: econômicas, políticas, técnicas e temporais. Esses elementos possibilitam a representação dos acordos atuais, bem como oferecem a possibilidade do desenvolvimento de novos modelos de acordos.

Entre os principais benefícios esperados estão (i) dinamismo, propiciado por meio de acordos de curta duração, com preço refletindo o período do dia, oferta e demanda momentânea, e (ii) novos tipos de acordos, viabilizados pela rica conectividade dos IXPs, aliada a uma maior dinamicidade oferecida pelo mercado.

A motivação para nossa investigação já foi reconhecida em trabalhos relacionados, com artigos recentes sugerindo maneiras de oferecer mais dinamicidade à rede. Em

(CASTRO et al., 2015), os autores apresentam um sistema com o objetivo de estabelecer caminhos inter-domínio fim-a-fim. O trabalho assume a existência de entidades confiáveis que possam intermediar o processo. Em (KOTRONIS et al., 2016), os autores exploram a rica conectividade dos IXPs para formar múltiplos caminhos entre sistemas autônomos. Diferentemente dos trabalhos prévios, que focam na formação de caminhos com base nos acordos de troca de tráfego previamente estabelecidos, o objetivo do presente trabalho é oferecer ferramentas para diminuir o tempo de estabelecimento de acordos entre sistemas autônomos. Não obstante, dada a tendência de ‘planarização’ da Internet (DHAMDHERE; DOVROLIS, 2010), um sistema para acordos dinâmicos como o proposto neste trabalho de graduação poderia vir a ser uma etapa do estabelecimento de caminhos fim-a-fim, aumentando o potencial de implantação de tais soluções.

Os demais capítulos desse trabalho estão organizados como segue. No Capítulo 2 são apresentados três pontos: os tipos de acordos de troca de tráfego, como os mesmos são estabelecidos entre diferentes entidades existentes na Internet, e uma breve contextualização dos Pontos de Troca de Tráfego. Os trabalhos relacionados, que visam oferecer uma maior dinamicidade no roteamento inter-domínio, são discutidos no Capítulo 3. Os requisitos e a arquitetura do mercado de acordos DYNAMIX são apresentados no Capítulo 4. No Capítulo 5, descreve-se a metodologia de avaliação e testes, que se desdobra em dois pontos: (a) uma análise quantitativa de ganhos potenciais de nossa proposta de mercado dinâmico, com base em traços que coletamos em um IXP de produção; (b) demonstração da funcionalidade principal da proposta, através de uma implementação de um protótipo prova-de-conceito. Por fim, o Capítulo 6 conclui o trabalho e apresenta os trabalhos futuros.

2 CONCEITOS

Neste capítulo serão abordados os conceitos que servem como base à proposta deste trabalho, permitindo o mesmo ser auto-contido. Inicialmente, será feita uma contextualização dos Pontos de Troca de Tráfego, enfatizando o seu papel na atual arquitetura da Internet. Posteriormente, será feita uma análise dos tipos de relações comerciais de troca de tráfego existentes e como elas são estabelecidas entre as diferentes entidades da Internet.

2.1 Pontos de Troca de Tráfego

Pontos de Troca de Tráfego (IXPs ¹) são infraestruturas nas quais diferentes sistemas autônomos se conectam para realizar troca de tráfego. Considerados os sucessores dos Pontos de Acesso à Internet (*NAPs*, ou *Network Access Point*), os IXPs têm como principal objetivo facilitar a conexão de um sistema autônomo à Internet. Através de sua infraestrutura, provedores de serviço e provedores de conteúdo podem trocar tráfego diretamente sem a necessidade de terceiros, diminuindo consideravelmente o custo de transmissão de dados.

Os Pontos de Troca de Tráfego têm se tornado pontos estratégicos na topologia da Internet, havendo atualmente mais de 500 IXPs distribuídos em 120 países (EURO-IX, 2016). Alguns deles operam com tráfego similar ao de ISPs de nível 1, e o aumento do tráfego anual tem atingido taxas entre 50% e 100% (RICHTER et al., 2014). O AMS-IX é considerado um dos maiores IXPs da atualidade em número de participantes, com mais de 800 membros. Além da sua base original na Holanda, também possui outros cinco pontos de interconexão no mundo. De acordo com o seu relatório anual, 127 novos ASes passaram a ser membros do IXP holandês em 2015 (AMX-IX, 2016). Ainda segundo o mesmo relatório, seus integrantes trocaram, em média, 28 Petabytes de dados diariamente, atingindo a marca de 9 Exabytes (9060 Petabytes) no ano.

No Brasil, o Comitê Gestor da Internet (CGI.br) gerencia, desde 2004, o PTTMetro. O mesmo é responsável pela infra-estrutura para interconexão entre sistemas autônomos da Internet brasileira. Atualmente, o Brasil conta com 26 Pontos de Troca de Tráfego, geralmente estabelecidos nas principais cidades do país. O IXP de São Paulo é o maior

¹O CGI.br e o NIC.br têm sugerido que o termo PTT deixe de ser utilizado, por conflito de acrônimos, e se considere apenas as siglas IX ou IXP.

do mundo em número de participantes, com mais de mil membros (IX-SP, 2016), e se encontra entre os dez maiores do mundo em quantidade de tráfego trocado (BRITO et al., 2015).

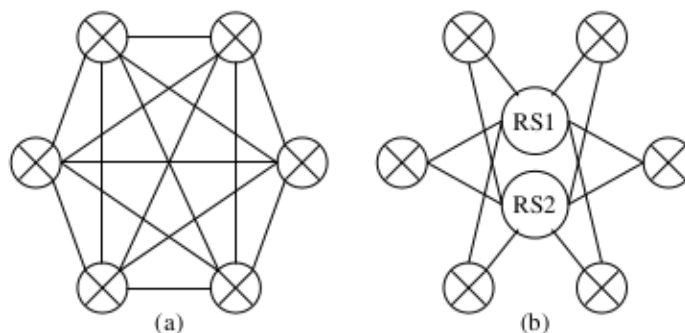
O anúncio de rotas entre os participantes dos IXPs é realizado através de sessões BGP que, originalmente, eram feitas por meio de peering bilateral. Com acordos bilaterais, é necessário que cada participante estabeleça uma sessão BGP individual com cada membro com o qual deseje trocar tráfego.

Com o aumento do número de participantes, IXPs passaram a oferecer Servidores de Rotas como um serviço adicional aos seus membros (IETF, 2016). A ideia básica de um Servidor de Rotas é oferecer acordos de peering multilaterais, a partir dos quais é possível obter informações de anúncios BGP de todos os participantes com uma única sessão. Em resumo, as funções de um Servidor de Rotas são: (i) obter informações de roteamento interdomínio dos roteadores de borda de cada membro conectado, (ii) processar e filtrar informações recebidas, e (iii) distribuir os dados resultantes do processamento aos roteadores de borda dos membros conectados a ele (CHATZIS et al., 2013). A maioria dos IXPs oferece réplicas de Servidores de Rotas a fim de diminuir a possibilidade de falhas (GIOTSAS et al., 2013).

Estudos recentes demonstram que o número de acordos multilaterais já ultrapassa o de bilaterais (RICHTER et al., 2014). No entanto, se for levada em conta a quantidade de tráfego trocado, os acordos bilaterais ainda levam vantagem, uma vez que grandes ISPs optam por esse tipo de acordo em suas relações duradouras.

A Figura 2.1 ilustra os modelos de acordos bilateral e multilateral. Enquanto que no bilateral cada sistema autônomo estabelece, no pior caso, $n - 1$ sessões BGP com cada um dos demais participantes do IXP, no peering multilateral é necessário estabelecer apenas uma sessão com cada réplica do Servidor de Rotas.

Figura 2.1: Comparação entre peering bilateral e multilateral



Fonte: (GIOTSAS et al., 2013)

2.2 Acordos de Troca de Tráfego

A Internet é composta por mais de 55 mil sistemas autônomos (CIDR, 2016) interconectados por meio do protocolo BGP e interessados em trocar tráfego. A troca de tráfego entre ASes é, sobretudo, baseada em dois tipos de relações comerciais: trânsito e *peering*. Na relação de trânsito, o AS cliente paga ao provedor para obter acesso à Internet. Na relação de *peering*, dois ASes trocam tráfego livremente entre si e dividem os custos de manutenção da infraestrutura. Além disso, ao estabelecer um acordo de *peering*, sistemas autônomos também oferecem alcançabilidade aos seus clientes para os quais oferecem trânsito. Quando a relação de *peering* é assimétrica, isto é, a diferença entre o volume de dados enviados pelas duas partes é superior a um determinado limite, sistemas autônomos costumam estabelecer acordos de *peering* pago (*paid peering*). Neste tipo de acordo existe uma compensação financeira da parte que teve um maior volume de dados enviados.

Entre as principais vantagens do *peering* em relação ao trânsito está a melhora da experiência do usuário final, uma vez que *peering* mantém o tráfego local e diminui a latência em virtude do menor número de saltos entre origem e destino. Uma outra vantagem é o fato de acordos de *peering* diminuírem os gastos com trânsito. Enquanto que os custos de *peering* são fixos (incluem basicamente a manutenção da sua infraestrutura e taxas de implantação), os acordos de trânsito levam em consideração o volume de tráfego trocado. Por isso, *peering* torna-se uma vantagem quando o volume de tráfego trocado é superior ao *Peering Break-Even Point* (NORTON, 2014), ponto no qual o custo unitário do *peering* é igual ao preço unitário do serviço de trânsito. Apesar de suas vantagens, acordos de troca de tráfego por meio de *peering*, geralmente, oferecem acesso a um subconjunto limitado de ASes, enquanto que em acordos de trânsito obtém-se o acesso global da Internet. Por essa razão, relações de *peering* não substituem acordos de trânsito.

Sistemas autônomos podem interconectar as suas redes por meio de dois tipos de *peering*: público e privado. O *peering* público é estabelecido por meio de Pontos de Troca de Tráfego e possibilita que um sistema autônomo interconecte-se à dezenas (ou centenas) de outros ASes através de infraestruturas compartilhadas. O *peering* privado utiliza uma infraestrutura dedicada na qual apenas dois ASes trocam tráfego entre si. Este pode (ou não) ser estabelecido através de IXPs. Entre as vantagens do *peering* público está a facilidade em estabelecer novas sessões de *peering* sem haver custo adicional de infraestrutura. Por outro lado, o *peering* privado oferece maior facilidade de monitoramento e apresenta

maior segurança a ataques de terceiros (NORTON, 2014). Uma técnica bastante utilizada é uma combinação entre as duas abordagens, na qual relações caracterizadas pelo pequeno volume de tráfego são feitas através do peering público e, quando o volume do tráfego trocado aumenta, são migradas para o privado.

2.3 Acordos entre Entidades da Internet

A arquitetura da Internet é composta por provedores de acesso de vários níveis. Em seu topo, estão os provedores de nível 1. Os mesmos mantêm relações de peering entre si, possibilitando o acesso a qualquer rede da Internet sem nenhum custo. Apesar disso, apresentam políticas de peering restritivas, isto é, não existe o interesse em estabelecer relações de peering com outros ISPs que não sejam do mesmo nível. As demais relações de ISPs nível 1 são feitas através de trânsito.

O tráfego regional é, geralmente, oferecido por ISPs de nível 2. Os mesmos possuem políticas de peering abertas ou seletivas. No primeiro caso, apresentam interesse em trocar tráfego com qualquer outra entidade, ao passo que no segundo, estabelecem requisitos, como por exemplo, um volume mensal mínimo de tráfego trocado. ISPs de nível 2 de uma mesma região, geralmente, interligam-se por meio de malhas de peering. Por isso, a fim de obter acesso à toda Internet, ISPs de nível 2 compram tráfego via trânsito de ISPs de nível 1 (ou de outros ISPs de nível 2). Além disso, ISPs de nível 2 também vendem acesso via trânsito para outras entidades, como provedores de conteúdo e de acesso.

As bordas da Internet são ocupadas pelos provedores de conteúdo e provedores de acesso. Os provedores de conteúdo obtêm acesso à Internet via trânsito ou via peering e, em alguns casos, também vendem seu conteúdo a outros provedores. Os provedores de acesso vendem conexão à Internet para usuários finais e obtêm acesso a ela por meio da compra de trânsito, peering ou peering pago (RICHTER et al., 2014).

Estudos demonstram que a topologia da Internet vem sendo alterada do seu modelo hierárquico clássico para um modelo plano (DHAMDHERE; DOVROLIS, 2010), muito por conta dos Pontos de Troca de Tráfego. Além de modificações no padrão do tráfego e na topologia da Internet, essa transição deve causar grande impacto, principalmente, no modo como sistemas autônomos se relacionam economicamente. O fato dos Pontos de Troca de Tráfego estarem contribuindo para a planarização da Internet, aliado ao significativo aumento do número de IXPs nos últimos anos, nos levam a acreditar que tenham um papel essencial no futuro da Internet.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Este capítulo está organizado da seguinte forma. Primeiramente, serão apresentadas pesquisas recentes que estudam o uso de SDN em Pontos de Troca de Tráfego. Em seguida, apresentaremos os trabalhos relacionados que também visam oferecer uma maior dinamicidade à rede. Por fim, serão discutidos os diferenciais desta proposta em relação aos trabalhos anteriores.

3.1 Pesquisas em IXPs

Dadas as possibilidades de inovação, Pontos de Troca de Tráfego têm impulsionado diversas investigações. Uma possibilidade já explorada consiste em implantar o paradigma de Redes Definidas por Software (*SDN*, ou *Software Defined Network*) em Pontos de Troca de Tráfego (GUPTA et al., 2014). *SDX* (*Software Defined eXchange*) tem como objetivo aumentar a flexibilidade do roteamento interdomínio da Internet ao solucionar limitações impostas pelo protocolo BGP, como roteamento baseado apenas no prefixo IP destino e mecanismos indiretos de expressão de políticas. Questões de escalabilidade em relação ao tamanho das tabelas de encaminhamento do SDX são abordadas em (GUPTA et al., 2016), via proposta de uma nova versão do modelo.

Ainda no contexto de SDN em IXPs, (KNOB et al., 2016) propõe um mecanismo de monitoramento e identificação de tráfegos elefantes, os quais são caracterizados por uma alta vazão de dados de longa duração. Tais fluxos podem causar substancial impacto à rede, pelo grande consumo de recursos, como buffers e filas de dispositivos de rede. O modelo proposto possibilita que operadores de IXPs identifiquem tais fluxos e tomem as medidas apropriadas, a fim de melhorar a alocação de recursos e reduzir os potenciais impactos à rede do IXP.

Apesar de ainda existirem diversas pesquisas sobre o uso de SDN em IXPs, a implementação desta tecnologia já pode ser encontrada em ambientes produtivos. Em (LAPEYRADE; BRUYÈRE; OWEZARSKI, 2016) é descrito o processo de migração realizado no TouIX, de um modelo de IXP tradicional a fim de torná-lo um modelo baseado em SDN. O TouIX (TOUIX, 2016), localizado na cidade de Toulouse da França, foi o primeiro IXP europeu a operar em escala comercial utilizando SDN. O trabalho teve como principal objetivo aumentar a confiabilidade e melhorar o gerenciamento do tráfego do IXP.

3.2 Caminhos Interdomínio Fim-a-Fim

MINT (*A Market for INternet Transit*) (VALANCIUS et al., 2008) consiste em um modelo de mercado para compra e venda de caminhos interdomínio fim-a-fim na Internet. A construção dos caminhos é feita com base nos acordos de troca de tráfego já estabelecidos previamente entre sistemas autônomos. O modelo é composto por três participantes: vendedores, mediadores e compradores. Os vendedores anunciam segmentos de caminhos e informações relativas ao preço ou banda oferecida ao elemento mediador. Os compradores, por sua vez, solicitam um caminho entre origem e destino ao mediador que satisfaça um conjunto de critérios, como banda mínima ou uma lista de endereços IPs que não devem pertencer ao caminho. Finalmente, o mediador procura entre os caminhos disponíveis o que melhor satisfaz a requisição feita e o retorna ao comprador. A maior limitação do trabalho é o fato da composição de caminhos não considerar questões políticas, uma vez que sistemas autônomos podem apresentar restrições ao encaminhar o tráfego através de determinados caminhos.

Inspirado no conceito de criptomoedas, Route Bazaar (CASTRO et al., 2015) permite que provedores e consumidores estabeleçam caminhos QoS fim-a-fim através do anúncio de fragmentos de caminhos, pathlets (GODFREY et al., 2009). O modelo é composto por *public-ledgers* descentralizados, que consistem em entidades confiáveis e incorruptíveis responsáveis por armazenar os anúncios de caminhos dos participantes. Os caminhos entre origem e destino são formados através da composição dos múltiplos pathlets. Além de informações da topologia, os anúncios de pathlets incorporam informações econômicas, técnicas e políticas.

Buscando explorar a rica conectividade dos IXPs, (KOTRONIS et al., 2016) apresenta CXP (*Control eXchange Points*) o qual busca proporcionar o estabelecimento de caminhos interdomínio fim-a-fim através da abstração de multigrafos, onde IXPs são nós e ISPs são arestas de um grafo. Assim como em Route Bazaar, (KOTRONIS et al., 2016) também faz uso de pathlets na composição de caminhos, que são computados por brokers e controladores instalados em Pontos de Troca de Tráfego. Diferente das duas propostas anteriores, esta não engloba questões econômicas nem políticas.

3.3 Diferenciais

Os trabalhos anteriores buscaram maneiras de proporcionar uma maior dinâmica ao roteamento interdomínio através do estabelecimento de caminhos fim-a-fim. O presente trabalho de graduação tem como objetivo dinamizar o modo como os acordos de troca de tráfego são estabelecidos na Internet, oferecendo um modelo com bom potencial de implantação. Através do mercado proposto, sistemas autônomos podem estabelecer novos acordos com base nas suas necessidades ou requisitos imediatos, contribuindo para uma maior eficiência na alocação de recursos, reduzindo gastos e aumentando lucros.

Outro diferencial deste trabalho é o fato do modelo proposto considerar todos os aspectos necessários para que acordos de troca de tráfego sejam estabelecidos, através da criação de anúncios que contenham atributos classificados em quatro classes de informações: econômicas, técnicas, políticas e temporais. Nos outros trabalhos, caminhos fim-a-fim são compostos considerando apenas subconjuntos dessas classes.

A Tabela 3.1 resume a comparação entre os trabalhos anteriores que visaram oferecer maior dinâmica à rede com a presente proposta. A tabela leva em conta aspectos de arquitetura, objetivos e os diferentes tipos de informações consideradas em cada trabalho.

Tabela 3.1: Comparativo entre MINT, Route Bazaar, CXP e DYNAMIX.

	Arquitetura	Objetivo	Eco	Téc	Pol	Temp
MINT (2008)	Mediador centralizado	Caminhos fim-a-fim baseados em acordos já existentes	Sim	Sim	Não	Não
Route Bazaar (2015)	Public-ledger	Caminhos fim-a-fim baseados em acordos já existentes	Sim	Sim	Sim	Não
CXP (2016)	IXP	Caminhos fim-a-fim baseados em acordos já existentes	Não	Sim	Não	Não
DYNAMIX (2016)	IXP	Acordos dinâmicos	Sim	Sim	Sim	Sim

4 DYNAMIX

Apesar dos avanços tecnológicos da Internet, o modo como sistemas autônomos relacionam-se comercialmente continua o mesmo. Acordos de troca de tráfego possuem natureza estática, sendo estabelecidos em dias ou semanas, assim atrasando a adaptação por ASes a congestionamento e mudanças na topologia. Os custos de acordos não variam conforme a oferta e a demanda, levando a contratos de longa duração com recursos superdimensionados (NORTON, 2014). Além disso, sistemas autônomos não possuem mecanismos para indicar suas preferências e seus requisitos para troca e compra de tráfego.

Nesse contexto, o capítulo introduz o mercado dinâmico de acordos DYNAMIX (**DY**Namic **A**greement **M**arketplace on **I**nternet **eX**change points). DYNAMIX faz uso da rica conectividade dos Pontos de Troca de Tráfego e tem como objetivo tornar o estabelecimento de acordos de troca de tráfego mais dinâmico, permitindo que sistemas autônomos informem suas preferências e estabeleçam acordos que se adéquem às suas necessidades imediatas.

Este capítulo está organizado como segue. Inicialmente serão apresentados os requisitos do serviço proposto. Em seguida, será apresentada a sua arquitetura, seguida por uma descrição do sistema de anúncios oferecido. Por fim, será apresentado o protocolo proposto e o processo de atualização de políticas dos participantes do IXP.

4.1 Requisitos

A fim de fornecer maior dinamicidade, o mercado de acordos dinâmicos DYNAMIX deve possibilitar que sistemas autônomos anunciem, busquem e estabeleçam acordos que satisfaçam as suas preferências, bem como oferecer ferramentas para a reconfiguração de suas políticas de roteamento interdomínio. Além disso, o serviço proposto deve possuir os seguintes requisitos:

- **Serviço optativo:** os membros do Ponto de Troca de Tráfego não devem ser obrigados a utilizarem o serviço e poderão continuar estabelecendo acordos da maneira tradicional.
- **Retrocompatibilidade:** o serviço deve ser retrocompatível com o modelo atual dos acordos, de modo que os participantes do mercado possam continuar estabelecendo

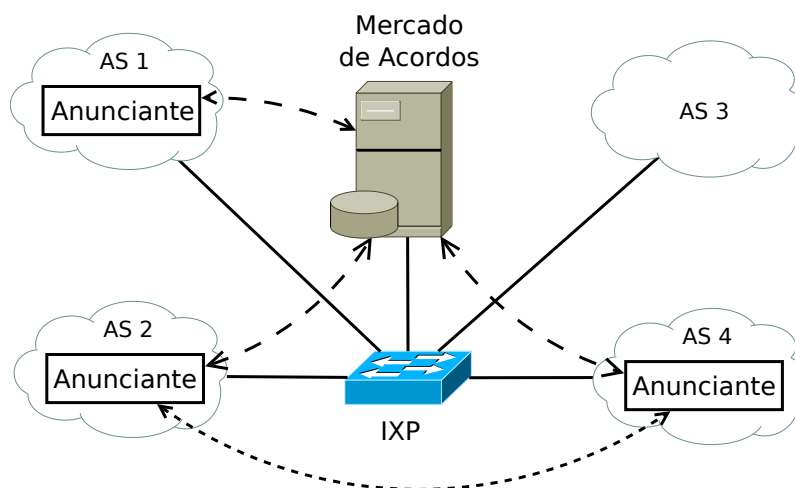
acordos de peering ou trânsito por meio do mercado ou sem a intervenção dele.

- **Escalabilidade:** o mercado de enlaces deve ser escalável e alinhado às dimensões atuais dos IXPs, uma vez que estes chegam a apresentar mais de mil membros e cem mil acordos bilaterais e multilaterais (AGER et al., 2012).

4.2 Arquitetura

A arquitetura de DYNAMIX é formada por dois componentes principais: o Mercado de Acordos e os Anunciantes. O Mercado localiza-se no IXPs e é responsável por armazenar e gerenciar os anúncios de troca de tráfego divulgados por seus membros, bem como responder às requisições dos ASes. Os Anunciantes, por sua vez, ficam instalados em cada sistema autônomo, e suas funções incluem: criação e atualização de anúncios no Mercado, requisição de anúncios existentes e estabelecimento dos acordos de troca de tráfego com os demais participantes do mercado. A Figura 4.1 ilustra o modelo conceitual básico do DYNAMIX.

Figura 4.1: Arquitetura conceitual do DYNAMIX.



Fonte: elaborada pelo autor

DYNAMIX opera na camada de aplicação. Como pode ser visto na Figura 4.1, não é necessário que todos os membros do IXPs sejam participantes do Mercado. Por isso, afirmamos que o modelo proposto é retrocompatível com o modelo atual de estabelecimento de acordos. Além de estabelecer acordos por meio do Mercado, participantes do IXPs podem continuar firmando novos acordos pelo método tradicional.

4.3 Anúncios

A divulgação dos acordos de troca de tráfego é feita por meio de anúncios, através dos quais sistemas autônomos possam expressar seus requisitos e preferências para o estabelecimento de novos acordos. Estes anúncios incluem atributos que podem ser categorizados em quatro classes: econômicos, técnicos, políticos e temporais. Os atributos econômicos definem o custo monetário dos acordos e são expressos por meio de uma função, como por exemplo, largura de banda por tempo. Os técnicos incluem informações relativas à largura de banda oferecida e à latência do enlace. As políticas são expressas por meio de uma lista dos ASes do caminho anunciado até o destino. Por fim, os atributos temporais contém informações relativas à duração do acordo e ao momento da expiração do anúncio.

Além dos atributos utilizados para expressar os requisitos do acordo, o anúncio também inclui outros três atributos auxiliares. O primeiro é o identificador único do anúncio, que é gerado pelo Mercado de Acordos quando um Anunciante realiza uma operação de criar anúncios. O segundo é usado para expressar o estado corrente do acordo e pode assumir os valores de ativo, expirado ou fechado. Por último, o anúncio contém o endereço do Anunciante autor do anúncio, a fim de permitir que sistemas autônomos interessados em estabelecer um acordo obtenham o seu endereço. A seguir, estão listados os atributos básicos existentes em um anúncio de troca de tráfego.

- **Advertisement ID**: consiste em um identificador único do anúncio e é gerado pelo Mercado de Acordos quando este recebe uma requisição de criar anúncios.
- **Announcer address**: endereço do Anunciante do anúncio, é usado pelo AS para propor o estabelecimento do acordo.
- **Status**: admite os valores de *Active* (ativo), *Expired* (o anúncio expirou e não foi estabelecido com ninguém) e *Closed* (o acordo não está mais disponível, pois já foi estabelecido ou foi cancelado pelo seu Anunciante).
- **Owner**: é um campo composto pelo número do sistema autônomo dono do anúncio e os seus respectivos prefixos IPs.
- **Destination**: é um campo composto pelos prefixos IPs anunciados como destino.
- **Path**: é a sequência de sistemas autônomos que compõem o caminho entre o anunciante e o prefixo de destino.
- **Costs**: consiste em uma função de custo por volume de tráfego trocado, a qual

admite valor nulo para acordos sem custo.

- **Begin**: momento em que o anúncio passa a estar visível aos demais sistemas autônomos membros do *IXPs*.
- **End**: instante no qual o anúncio deixa de estar visível aos sistemas autônomos membros do *IXPs*.
- **Agreement Begin**: instante em que o acordo passa a valer depois de estabelecido.
- **Agreement End**: momento no qual o acordo expira e perde a sua validade.
- **Link Availability**: informa a disponibilidade do enlace oferecido.
- **Bandwidth**: largura de banda do enlace oferecido.

4.4 Protocolo

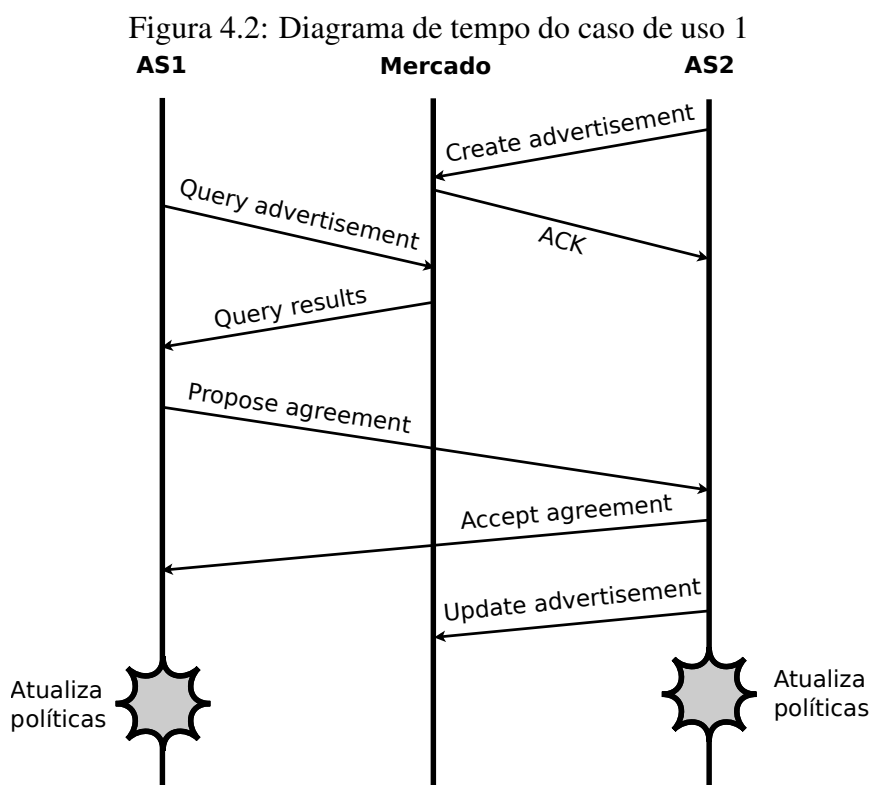
A proposta deste trabalho oferece um protocolo composto por cinco tipos de mensagens: *create*, *update*, *query*, *propose* e *revoke*. As mensagens *create* e *update* são criadas pelos Anunciantes e realizam, respectivamente, a criação de novos anúncios e a atualização dos já existentes no Mercado. Uma mensagem do tipo *query* possibilita que Anunciantes consultem anúncios armazenados no Mercado, cujos atributos satisfaçam um determinado critério (por exemplo, menor custo monetário, maior largura de banda ou uma distância predefinida). A mensagem do tipo *propose* é enviada pelo Anunciante interessado em iniciar o processo de estabelecimento do acordo. Quando uma das partes tem o interesse em acabar com a relação, ela envia uma mensagem do tipo *revoke*. A Tabela 4.1 mostra entre quais componentes da arquitetura DYNAMIX as mensagens são trocadas.

Tabela 4.1: Mensagens do protocolo proposto

Mensagem	Origem	Destino	Finalidade
<i>Create</i>	Anunciante	Mercado	Cria um novo anúncio no Mercado
<i>Update</i>	Anunciante	Mercado	Atualiza um anúncio armazenado no Mercado
<i>Query</i>	Anunciante	Mercado	Consulta os anúncios armazenados no Mercado
<i>Propose</i>	Anunciante	Anunciante	Propõe o estabelecimento de um acordo de troca de tráfego
<i>Revoke</i>	Anunciante	Anunciante	Propõe o fim do acordo de troca de tráfego

A seguir, o funcionamento do protocolo é apresentado, de forma geral, através de dois casos de uso. O primeiro deles mostra um caso simples de acordo que é estabelecido após um anúncio ou oferta feito por um AS, seguido de uma consulta feita por outro. O segundo caso de uso mostra dois ASes competindo pela mesma oferta de enlace.

A Figura 4.2 apresenta as interações do primeiro caso de uso, entre dois ASes e o Mercado. As mensagens são enviadas ao Mercado pelos Anunciantes dos sistemas autônomos AS1 e AS2 envolvidos no estabelecimento do acordo.



Fonte: elaborada pelo autor

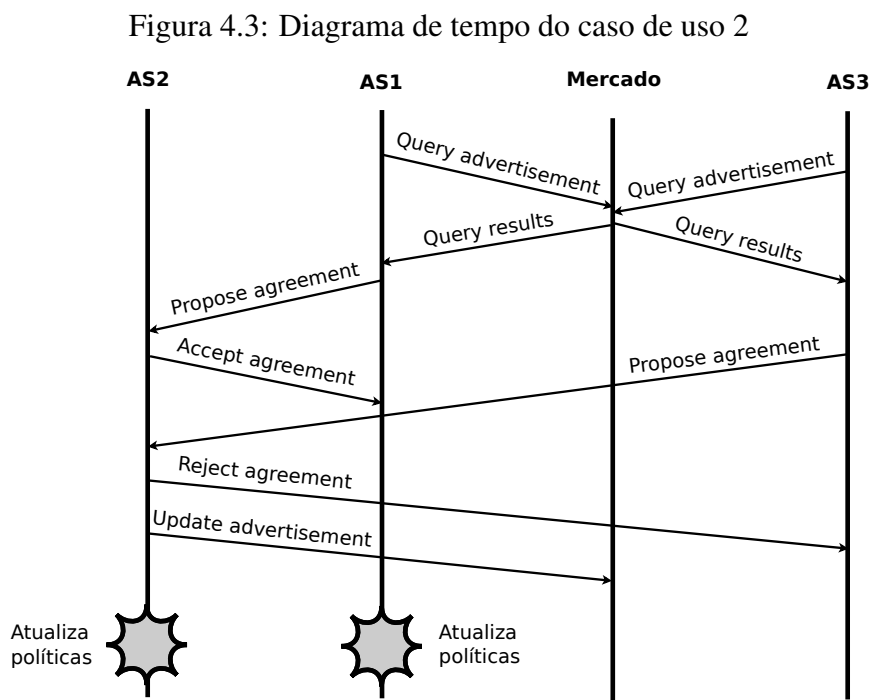
O processo inicia com o Anunciante do sistema autônomo AS2 criando um anúncio, que inclui informações sobre os seus requisitos de troca de tráfego, por meio de uma mensagem do tipo *create*. Depois de algum tempo, AS1 realiza uma consulta no Mercado de Acordos por ofertas que seguem determinadas características. Caso não haja nenhum anúncio correspondente com esse filtro, é retornada uma mensagem informando essa inexistência. Caso contrário, é retornada uma lista com todos anúncios que seguem os critérios estabelecidos. Neste exemplo, a lista retornada contém o anúncio criado previamente por AS2.

Dentre os anúncios retornados, AS2 escolhe o criado por AS1 e envia uma mensagem do tipo *propose* para o seu Anunciante. Aqui, dois casos podem acontecer. No primeiro, AS1 pode recusar a proposta por algum motivo, como por exemplo, se o acordo

expirou, já foi estabelecido com outro AS ou se AS2 não se enquadrar nas suas políticas de troca de tráfego. No segundo caso, conforme Figura 4.2, AS1 aceita a proposta e envia uma mensagem *update* ao Mercado para atualizar o estado do anúncio, dado que ele já foi estabelecido.

A mensagem de aceite enviada ao sistema autônomo AS1 inclui um *token* de verificação, a fim de garantir a autenticidade do acordo estabelecido entre as duas organizações. Ao final do processo, AS1 e AS2 atualizam as suas políticas de roteamento no IXP, incluindo o *token* gerado. As políticas não devem ser atualizadas caso o *token* de autenticação não seja o mesmo.

A Figura 4.3 ilustra um caso de uso mais complexo. Dois sistemas autônomos (AS1 e AS3) competem pelo recurso (AS2), mas apenas um deles consegue estabelecer o acordo. Neste exemplo, assume-se que o anúncio criado por AS2 já se encontra no Mercado.



Fonte: elaborada pelo autor

Cada acordo possui um tempo de duração, previamente estipulado no anúncio. Após esse período, o acordo expira, as políticas são removidas do IXP e os sistemas autônomos precisam procurar novos Anunciantes. Também é possível que um dos ASes tenha interesse em cancelar o acordo enquanto o mesmo ainda está ativo. Neste caso, o AS com esse interesse envia uma mensagem do tipo *revoke*. O pedido de cancelamento do acordo pode ser recusado ou aceito, contudo só é concretizado quando ambas as partes

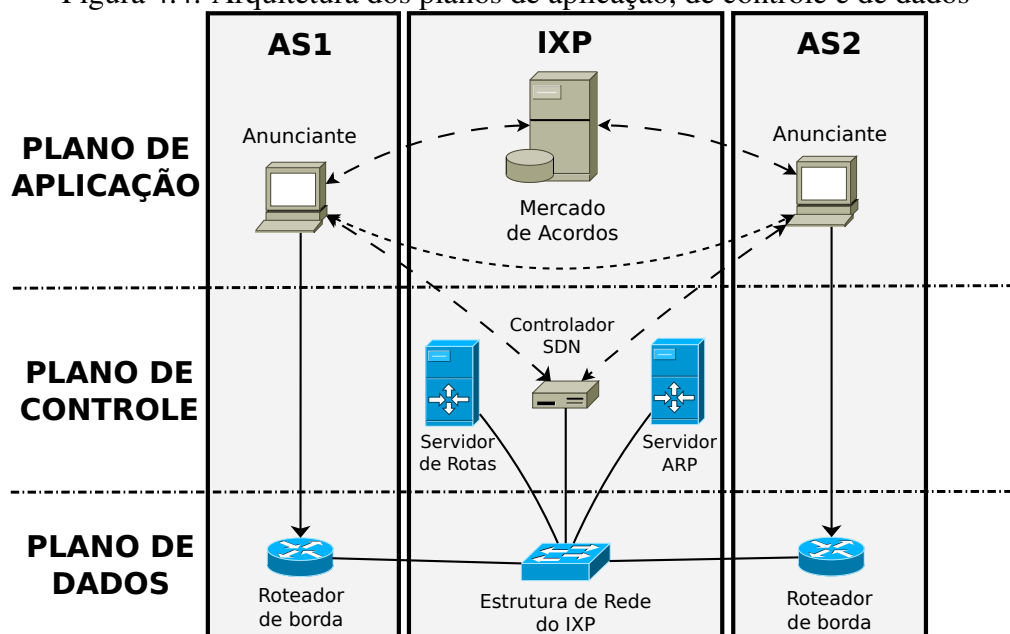
concordam em acabar com a relação. Novamente, ao fim do processo, um novo *token* é incluído na mensagem de aceite.

4.5 Atualização de políticas

Uma vez estabelecido o acordo entre os dois participantes do Ponto de Troca de Tráfego, estes devem atualizar as suas políticas de roteamento. A modificação de políticas interdomínio na maioria dos IXPs atuais consiste basicamente em atualizações de anúncios BGP. Recentemente, a incorporação de SDN em IXPs tem revolucionado o roteamento interdomínio, além de permitir um maior controle sobre as regras de processamento e encaminhamento de pacotes.

Nesse contexto, a fim de oferecer uma maior flexibilidade às atualizações de políticas dos sistemas autônomos, a arquitetura do DYNAMIX utiliza a abstração SDX (*Software Defined Internet eXchange*) (GUPTA et al., 2014). O SDX oferece uma especificação de políticas mais flexível, através da sobreposição de regras SDN sobre as rotas BGP padrão. A Figura 4.4 mostra a integração entre o plano de aplicação de DYNAMIX e os planos de controle e dados de SDX.

Figura 4.4: Arquitetura dos planos de aplicação, de controle e de dados



Fonte: elaborada pelo autor

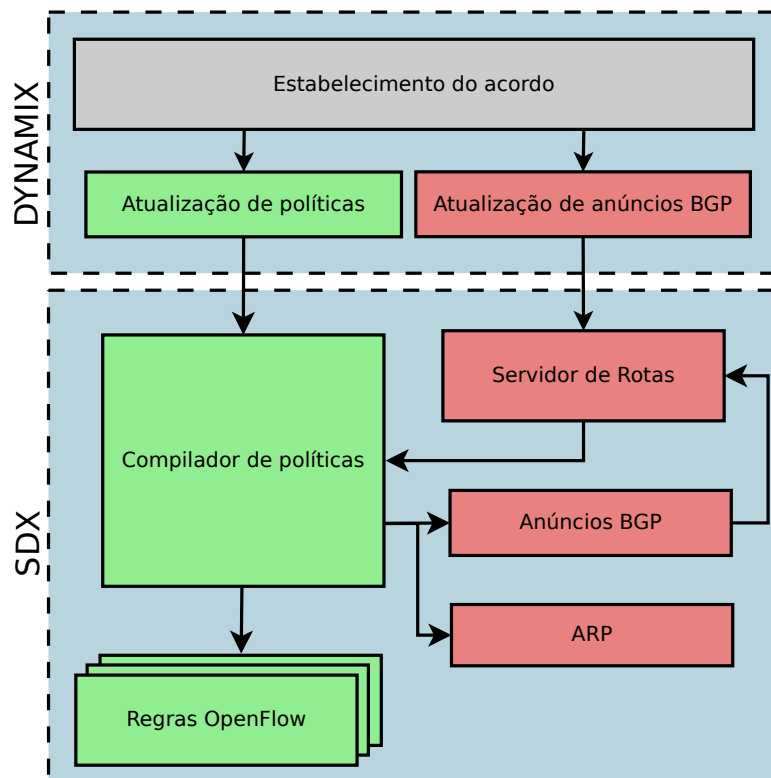
A infraestrutura do IXP é formada por componentes presentes nos planos de aplicação, de controle e de dados. No plano de aplicação, o Mercado de Acordos é responsável por armazenar anúncios dos participantes do IXP. O plano de controle contém um

Servidor de Rotas, um servidor ARP e um controlador SDN. O Servidor de Rotas tem a função de armazenar anúncios BGP e manter seções multilaterais com cada membro do IXP. O servidor ARP é responsável por resolver as requisições ARPs dos participantes, baseando-se nas políticas previamente configuradas. O controlador SDN combina as políticas de cada AS em um conjunto único e otimizado de regras equivalentes e atualiza as regras de encaminhamento do plano de dados. Por fim, na camada de dados, está a estrutura de rede do IXP, abstraída por meio de um único dispositivo de encaminhamento.

Tendo isso em vista, o modelo teórico de SDX incorpora um controlador SDN composto por dois *pipelines*, exemplificado pelo diagrama da Figura 4.5. As políticas SDN e os anúncios BGP são agrupados em regras de encaminhamento que pertencem a uma mesma classe de equivalência (FEC, ou *Forwarding Equivalence Class*). FEC é um conjunto de endereços IPs destino que compartilham um mesmo comportamento de encaminhamento de pacotes na estrutura do IXP. Em seguida, para cada FEC são gerados endereços IPs *next-hops* virtuais (VNH), que são incluídos nos anúncios BGP do Servidor de Rotas. Cada VNH está associado a um endereço MAC virtual (VMAC) e ambos são enviados ao servidor ARP do IXP.

A alcançabilidade a outros sistemas autônomos é possibilitada por meio dos anúncios BGP. Para isso, os roteadores de borda dos sistemas autônomos membros do IXP (i) extraem o endereço *next-hop* dos anúncios BGP adquiridos no Servidor de Rotas, (ii) consultam o servidor ARP para traduzir o endereço IP ao respectivo endereço MAC, e (iii) atualizam as suas tabelas de roteamento antes de encaminhar o pacote para a porta de saída. Na arquitetura de SDX, o MAC adquirido do servidor ARP é o VMAC associado ao *next-hop* virtual do endereço IP destino. Assim, a malha de rede do SDX pode encaminhar pacotes baseando-se apenas no VMAC, já que todos possuem o mesmo padrão de encaminhamento. Uma descrição completa e detalhada da compilação de políticas do SDX é fornecida em (GUPTA et al., 2014) e (GUPTA et al., 2016).

Figura 4.5: Esquema de compilação de políticas do SDX



Fonte: adaptada de (GUPTA et al., 2014)

5 AVALIAÇÃO E TESTES DO PROTÓTIPO

Este capítulo está organizado em duas partes, conforme a seguir. A primeira consiste em uma análise do tráfego de acordos bilaterais coletado no IX-RS (IX-RS, 2016), instalado na cidade de Porto Alegre. O IX-RS é o segundo maior IXP do Brasil em número de membros, com 153 participantes, e o terceiro em volume de tráfego. O conjunto dos dados examinados consiste em medições do tráfego de 5% dos acordos bilaterais que apresentam um maior volume de tráfego trocado no IXP. As medições foram realizadas em intervalos de 5 minutos e ocorreram entre os meses de outubro de 2015 e outubro de 2016. O principal objetivo da análise é verificar quais são os potenciais de um mercado de acordos dinâmicos em Pontos de Troca de Tráfego.

A segunda parte descreve um protótipo que implementa as funcionalidades mínimas descritas no capítulo anterior, e um conjunto de experimentos controlados com o mesmo para verificar a funcionalidade. Mais precisamente, foram realizadas emulações de dois eventos identificados na análise do tráfego do IX-RS: o estabelecimento de um novo acordo em um caso de uma falha de um enlace e o estabelecimento de um acordo temporário durante um aumento inesperado de tráfego.

5.1 Análise do tráfego do IX-RS

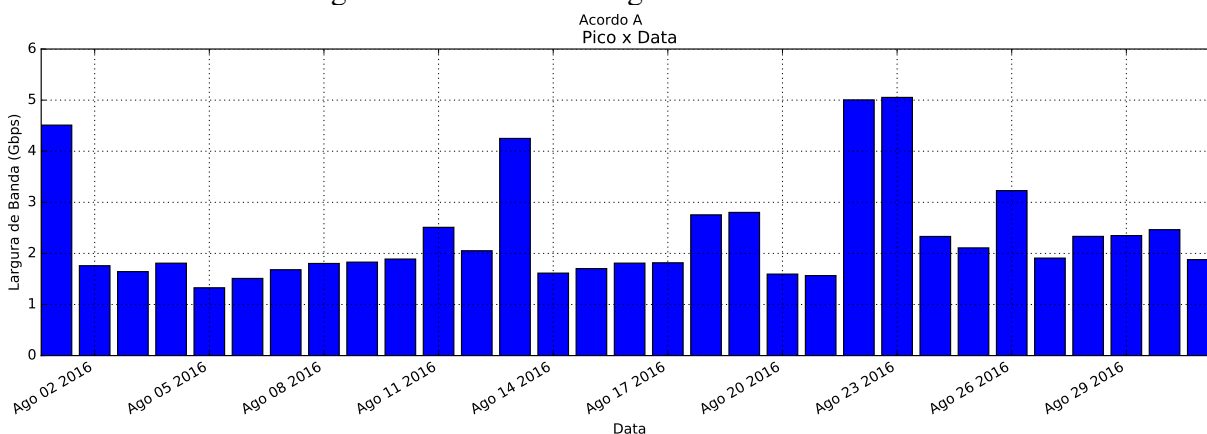
Através desta macroanálise do tráfego de acordos bilaterais estabelecidos através do IX-RS, busca-se identificar a existência de eventos e situações que possam demonstrar os potenciais que um mercado de acordos dinâmicos, como DYNAMIX, pode oferecer aos seus participantes. Entre os sete acordos bilaterais com maior tráfego trocado analisados, foram selecionados eventos encontrados em três deles. Os nomes originais dos acordos estudados nesta avaliação serão omitidos a fim de preservar a sua confidencialidade.

A seguir, analisamos três cenários nos quais pode-se obter um maior ganho a partir de uma maior dinamicidade dos acordos: (a) maior utilização dos recursos, com o objetivo de reduzir gastos, na Subseção 5.1.1; (b) casos de falha encontrados nos acordos analisados, na Subseção 5.1.2; (c) variações de carga inesperadas, na Subseção 5.1.3.

5.1.1 Subutilização de Recursos

O tráfego da Internet é composto por picos e vales. Acordos de troca de tráfego, no entanto, são estabelecidos considerando apenas os picos, levando à subutilização de recursos. A partir dessa análise, é possível verificar o super-provisionamento dos acordos. A Figura 5.1 ilustra os picos de tráfego diários de um dado acordo, identificado genericamente como A, durante o mês de agosto de 2016. A partir dos dados fornecidos pelo IX-RS, não é possível saber quais são as capacidades estipuladas no estabelecimento do acordo, por isso, assume-se que os picos de 5Gbps registrados nos dias 23 e 24 representam a sua capacidade máxima.

Figura 5.1: Picos de tráfego diário do acordo A.



Fonte: elaborada pelo autor

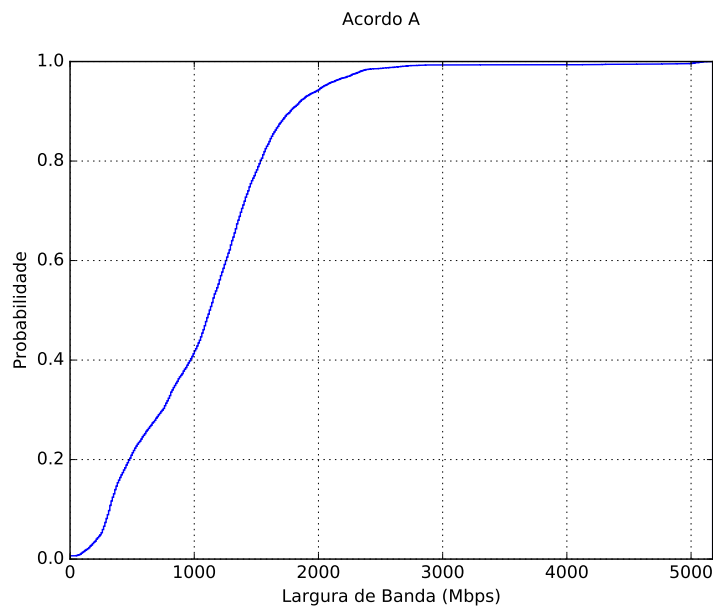
Com base nos dados examinados, durante o período de um mês observa-se apenas dois dias nos quais o volume de tráfego atinge a capacidade máxima do acordo e, em apenas quatro, o tráfego ultrapassa a marca dos 4Gbps. Através de uma análise complementar a apresentada na Figura 5.1 foi possível determinar que os dois picos de tráfego de 5Gbps tiveram uma duração de aproximadamente duas a cinco horas, enquanto que os picos de 4Gbps apresentaram duração de 20 a 30 minutos. Durante o restante do mês, os recursos alocados apresentam-se ociosos.

A análise anterior utilizou a premissa de que a capacidade máxima do acordo A é de 5Gbps. No entanto, ainda existe a possibilidade de que a capacidade máxima seja superior a este valor estimado. Neste caso, os índices de subutilização seriam ainda maiores.

A Figura 5.2 mostra a função de distribuição acumulada da utilização dos recursos no mês de agosto. Pode-se visualizar que em 94% do tempo uma capacidade de 2000Mbps seria suficiente para comportar o volume de dados trocado. Logo, em apenas

6% do tempo haveria a necessidade de ocupar uma banda superior. Se considerarmos uma capacidade de 3000Mbps, a probabilidade da banda ocupada ser superior a este valor cai para menos de 1%. Dessa forma, acredita-se que com a existência de um mercado de acordos dinâmicos, um sistema autônomo poderia manter um contrato base de menor capacidade e de menor custo, estabelecendo acordos sob demanda quando o volume de tráfego ultrapassa a sua largura de banda máxima.

Figura 5.2: Função de distribuição acumulada da utilização do enlace no mês de agosto.



Fonte: elaborada pelo autor

Do ponto de vista econômico, o super-provisionamento dos contratos também é visível. Deste modo, a fim de estimar o ganho do estabelecimento de contratos sob demanda foi feita uma análise do impacto na economia dos sistemas autônomos. A Tabela 5.1 mostra o custo monetário para diferentes capacidades de banda. Os valores escolhidos foram baseados nas larguras de banda dos enlaces do IX-RS disponibilizadas na base *PeeringDB* (PEERINGDB, 2016), visto que informações das capacidades dos acordos não são disponibilizadas publicamente.

O cálculo dos custos é realizado com base no tráfego de agosto do acordo A. Inicialmente, considera-se um acordo base com capacidade e preços fixos ao longo do mês. O custo fixo é calculado multiplicando a sua capacidade pelo valor mensal de US\$0,63 por Mbps (NORTON, 2014), valor estimado do ano 2015. O custo sob demanda é dado pelo somatório da diferença entre o pico e a banda base para todos intervalos que ultrapassam a capacidade do acordo base estabelecido, multiplicado pelo custo proporcional ao tempo da sobrecarga durante o mês. Para estimar este custo, considera-se o pior caso,

isto é, para todo intervalo de tráfego acima da banda base supõe-se um pico máximo de 5Gbps. Assim, pode-se utilizar a porcentagem do tempo mensal que o tráfego ultrapassou a capacidade base, dado pela função de distribuição acumulada.

Tabela 5.1: Custos para acordos base e acordos temporários sob demanda.

Banda base (Mbps)	Porcentagem do tempo acima da banda base	Custo (U\$)
100Mbps	98,71%	3110,17
200Mbps	96,51%	3044,46
300Mbps	91,44%	2896,53
400Mbps	83,56%	2675,30
500Mbps	78,78%	2548,63
1000Mbps	58,45%	2102,94
2000Mbps	5,77%	1369,05
3000Mbps	0,9%	1902,22
4000Mbps	0,65%	2524,09
5000Mbps	0,41%	3150,00

A Tabela 5.1 mostra os valores monetários para diferentes acordos de larguras de banda fixa considerando o tráfego do mês de agosto do acordo bilateral A. Pode-se notar que para um acordo base de 5000Mbps alocado por mês o cliente pagaria um valor de U\$3150,00. Com a existência de um mercado de acordos dinâmicos, poderia-se estabelecer um acordo com capacidade fixa de 2000Mbps e quando necessário estabelecer acordos sob demanda para o tráfego excedente, resultando em um valor total de U\$1369,05. Assim, observa-se uma economia de aproximadamente 43%. Este caso não leva em consideração a maior dinamicidade dos preços em virtude da maior competição promovida pelo mercado. Por isso, acredita-se que a economia possa ser ainda maior.

Do ponto de vista de subutilização de recursos, uma maior dinamicidade no estabelecimento dos acordos ofereceria ganhos consideráveis, tanto para o cliente como para o provedor do serviço. Por um lado, os compradores obteriam uma maior economia uma vez que não comprometeriam-se em acordos de longa duração com capacidades super-provisionadas e, por outro lado, os provedores de trânsito poderiam vender a banda excedente para mais clientes, lucrando mais com isso.

5.1.2 Falhas

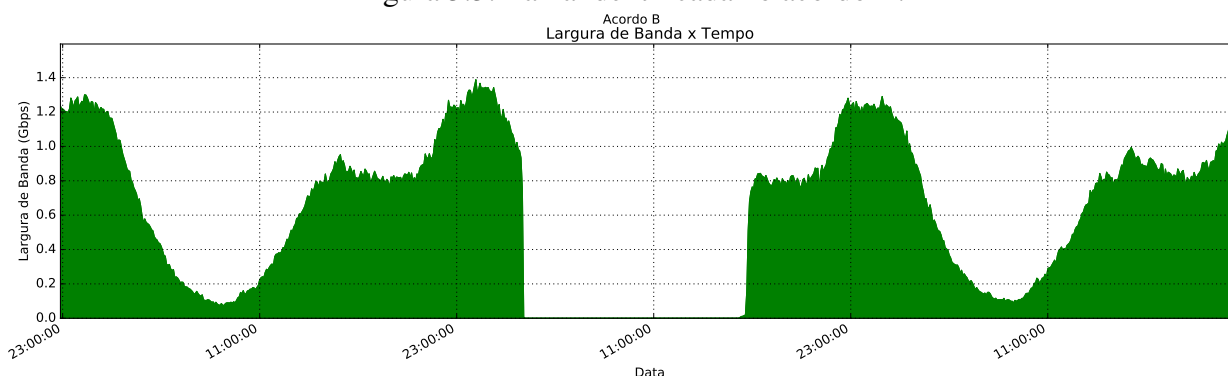
Outro cenário possível envolve a ocorrência de falhas, pois foram identificadas falhas na comunicação entre dois participantes de uma negociação, ao analisar eventos

aperiódicos no tráfego do IX-RS. As Figuras 5.3 e 5.4 ilustram dois exemplos de falhas identificadas em dois acordos bilaterais, identificados genericamente como B e C. No acordo bilateral B, o serviço ficou indisponível por mais de 12 horas. Já no acordo C, foram detectadas duas falhas consecutivas que levaram a uma indisponibilidade de 9 e 3 dias, respectivamente.

A partir dos dados analisados não é possível determinar a razão da falha, nem mesmo qual das duas partes envolvidas foi a afetada. Possivelmente, através de uma análise mais completa dos fluxos individuais dos acordos, por exemplo, seria possível identificar algum indício sobre a causa da interrupção do serviço.

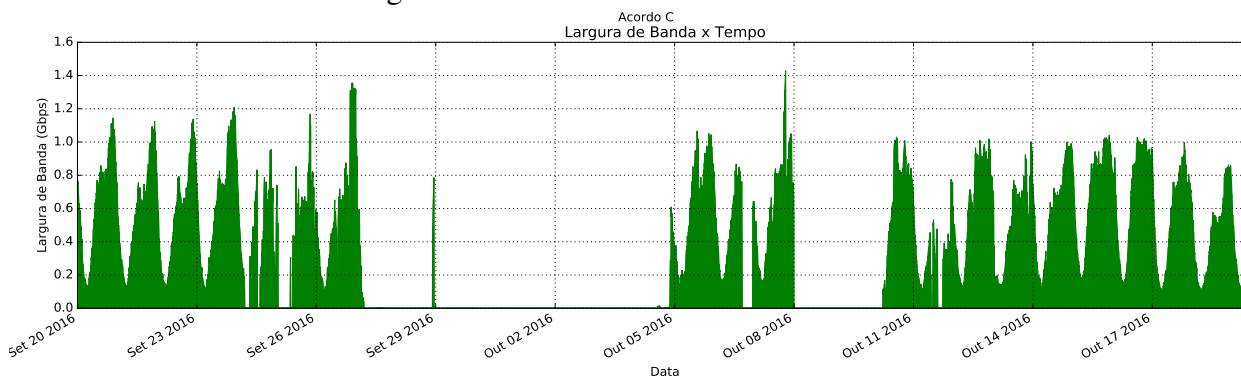
No contexto de falhas entre sistemas autônomos, o ganho esperado por uma maior dinamicidade oferecida pelo mercado de acordos está no fato do sistema autônomo cliente poder estabelecer um acordo temporário com outro provedor em um período curto de tempo. Atualmente, esse processo pode levar dias, impossibilitando que ASes adaptem-se a esse tipo de mudança.

Figura 5.3: Falha identificada no acordo B.



Fonte: elaborada pelo autor

Figura 5.4: Falhas identificadas no acordo C.

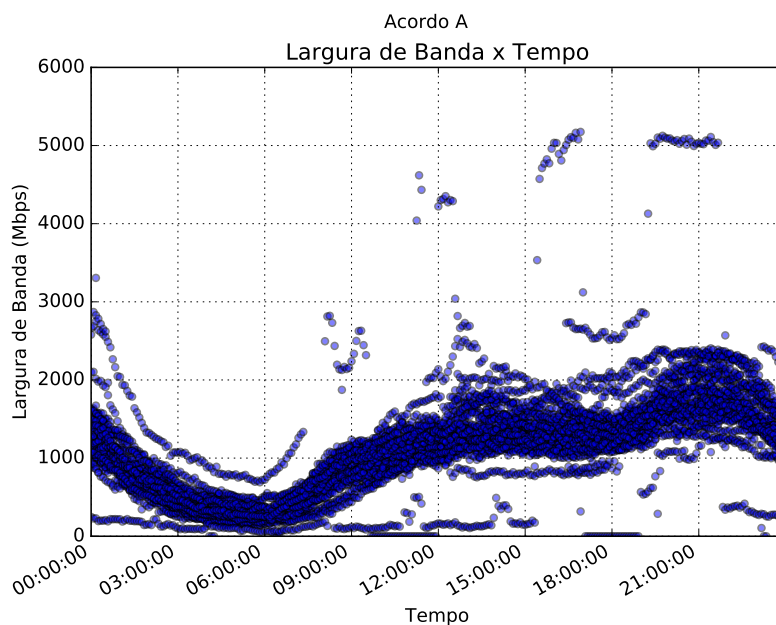


Fonte: elaborada pelo autor

5.1.3 Variações de Carga

No terceiro e último caso analisado, consideramos a variação inesperada da carga. Apesar de sistemas autônomos subutilizarem seus recursos, ainda assim estão expostos a variações de carga não planejadas. O aumento inesperado do volume de tráfego, por exemplo, pode afetar o fornecimento de diferentes serviços de Internet, resultando em grandes congestionamentos de dados e no aumento das perdas ou da latência. Por isso, é importante que sistemas autônomos possuam alternativas para situações como estas, de modo a diminuir o impacto na qualidade do serviço oferecido aos seus clientes.

Figura 5.5: Função de dispersão do tráfego diário durante o mês de agosto de 2016.



Fonte: elaborada pelo autor

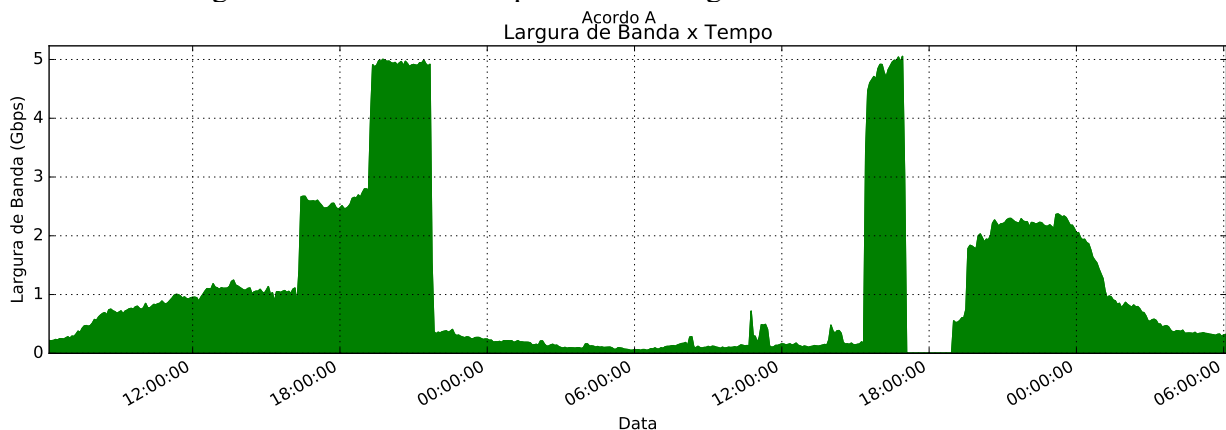
Nesta análise, foi possível identificar variações de carga fora do padrão do tráfego diário esperado. A Figura 5.5 mostra o gráfico de dispersão do tráfego diário do acordo A ao longo de um mês. Percebe-se que o mesmo segue um padrão bem definido ao longo dos dias. Em alguns momentos, no entanto, notam-se variações da ordem de Gbps fora da curva esperada. Entre os períodos das 16h e 17h e entre às 19h e 22h foram registrados picos de 5Gbps que supostamente correspondem à capacidade máxima do acordo.

O tempo de duração desses picos pode ser visualizado na Figura 5.6. O primeiro aumento ocorreu em duas fases: na primeira, observa-se uma variação de 1,6Gbps em apenas 8 minutos, enquanto que na segunda, a diferença foi de aproximadamente 2,1Gbps em 9 min. O segundo pico ocorreu em torno das 16h do dia seguinte e possui uma vari-

ação de 4,78Gbps em apenas 9 minutos. Nos dois picos analisados, a largura de banda manteve-se próxima dos 5Gbps durante cinco horas e duas horas e meia, respectivamente.

Espera-se que a maior dinamicidade oferecida por um mercado de acordos proposto neste trabalho possa servir como alternativa em momentos de variações de carga. Em um aumento inesperado de tráfego, por exemplo, o sistema autônomo afetado poderia estabelecer acordos temporários para aumentar a sua capacidade.

Figura 5.6: Aumento inesperado do tráfego observado no acordo A.



Fonte: elaborada pelo autor

Através desta macroanálise tentou-se estimar os potenciais de uma maior dinamicidade no estabelecimento de acordos de troca de tráfego. Apesar desta análise não oferecer evidências concretas das causas dos eventos identificados, ainda assim é possível verificar a existência destes. Uma análise mais granular dos fluxos individuais do acordo, por exemplo, poderia trazer conclusões ainda mais esclarecedoras. Como primeiros resultados, acredita-se que uma maior dinamicidade possa oferecer uma maior eficiência na alocação de recursos, contribuindo para a diminuição dos custos. Além disso, espera-se que essa sirva como ferramenta em eventos aperiódicos e não esperados, como falhas ou mudanças de topologia e variações inesperadas de tráfego.

5.2 Prototipação

O protótipo desenvolvido como prova de conceito do mercado de acordos dinâmicos DYNAMIX segue o modelo apresentado na Figura 4.4 e foi dividido em duas etapas. Na primeira foram desenvolvidos os componentes da camada de aplicação, o Mercado e os Anunciantes. Em seguida foi desenvolvido um protótipo simplificado de um IXP baseado em SDN, o qual foi integrado com o simulador de rede Mininet.

5.2.1 Plano de Aplicação

O Mercado e os Anunciantes da camada de aplicação foram desenvolvidos como serviços web do tipo RESTs (*REpresentational State Transfer*), um estilo de arquitetura para desenvolvimento de sistemas distribuídos baseado em comunicação cliente-servidor e sem estado. Os serviços foram desenvolvidos em Node.js ¹, um interpretador de código JavaScript que apresenta um modelo de resposta de requisições assíncrono baseado em eventos e não bloqueante, permitindo o desenvolvimento de aplicações de rede escaláveis. A comunicação entre as aplicações é feita por meio de requisições HTTP e as mensagens possuem o formato JSON. A Tabela 5.2 ilustra as URNs (*Uniform Resource Name*) de consumo dos serviços e por quais componentes estas são disponibilizadas.

Tabela 5.2: Mapeamento das mensagens do protocolo proposto.

Mensagem	Método HTTP	URN	Interface
Create	POST	/api/Advertisements	Mercado
Update	PUT	/api/Advertisements	Mercado
Query	GET	/api/Advertisements	Mercado
Propose	POST	/api/Agreement	Anunciante

As mensagens do protocolo proposto foram mapeadas para as entidades *Advertisement* e *Agreement*, que correspondem respectivamente, aos anúncios criados pelos participantes do IXP e a mensagem *propose*. O protótipo conta ainda com duas outras entidades auxiliares: *Costs* que expressa o custo do acordo e *AutonomousSystems* que é utilizada para armazenar informações dos sistemas autônomos. Essas duas últimas estão associadas à entidade *Advertisement*. O protótipo desenvolvido como prova de conceito não possui suporte à mensagem do tipo *revoke*. A Figura 5.7 ilustra o diagrama das entidades do protótipo desenvolvido.

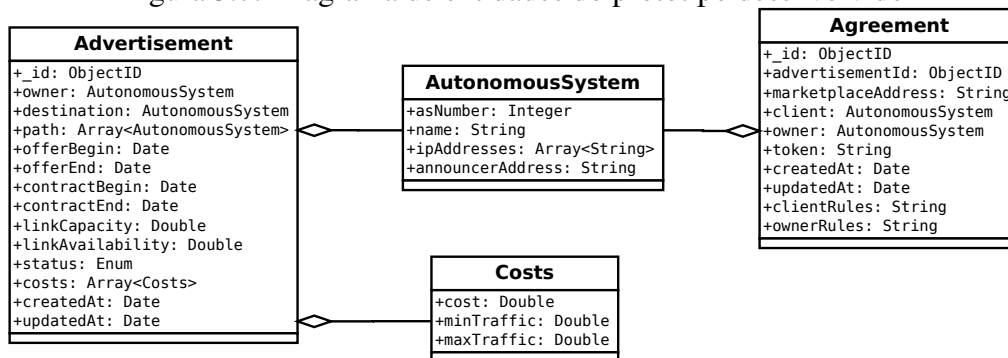
O Mercado e os Anunciantes mantêm seus anúncios e acordos estabelecidos localmente em instâncias MongoDB, uma base de dados NoSQL de código aberto orientada a documentos. A interação com o usuário é feita por meio de uma interface administrativa em HTML em ambos os componentes, na qual foram usados os frameworks Angular.js ² e Bootstrap ³.

¹<http://www.nodejs.org>

²<http://www.angularjs.org>

³<http://www.getbootstrap.com>

Figura 5.7: Diagrama de entidades do protótipo desenvolvido



Fonte: elaborada pelo autor

5.2.2 Plano de Controle

Apesar do modelo teórico SDX oferecer suporte a políticas dinâmicas, o protótipo desenvolvido por seus autores não permite a alteração de políticas uma vez que o ambiente de simulação já foi inicializado. Portanto, foi necessário implementar um modelo simplificado de um IXP baseado em SDN para fins de validação desta proposta.

O protótipo desenvolvido conta com dois controladores: DYNAMIX e SDX. O controlador DYNAMIX se comunica com a aplicação, garantindo a consistência das mensagens enviadas pelos Anunciantes e controlando o tempo de expiração dos acordos. A alteração de políticas em tempo de execução é feita por meio de uma API REST, a qual simula a interface Northbound e possibilita a comunicação do controlador com qualquer outra aplicação. O controlador DYNAMIX se comunica com o controlador SDX que por sua vez atualiza as políticas do plano de dados. Ambos foram desenvolvidos em Python e utilizam o controlador Ryu ⁴.

As mensagens de atualizações de políticas enviadas pela aplicação ao controlador DYNAMIX incluem quatro atributos. O atributo *match* é herdado do SDN e indica os valores que os campos do cabeçalho devem possuir para se enquadrar na regra. O campo *token* refere-se ao código hash gerado pelos Anunciantes durante o estabelecimento do acordo e *expirationTime* contém informações relativas ao tempo de expiração da regra. Por fim, o campo *action* informa para qual AS o pacote deve ser enviado. A Figura 5.8 mostra um exemplo de uma mensagem de atualização de políticas.

Além disso, o protótipo também inclui um Servidor de Rotas, permitindo que cada membro seja capaz de informar seus anúncios BGP, e um servidor ARP responsável por resolver as requisições ARP dos participantes do IXP. A implementação deste trabalho

⁴<https://osrg.github.io/ryu/>

Figura 5.8: Mensagens de atualização de políticas enviadas ao controlador.

```
[
{
  "token" : "da39a3ee5e6b4b0d3255bfef95601890afd80709",
  "expirationTime" : "2015-12-08T10:16:00.000Z",
  "match" :
  {
    "ipv4" : {
      "src" : "120.0.0.1",
      "dst" : "110.0.0.1"
    }
  },
  "action" :
  {
    "fwdTo" : "as1"
  }
}
]
```

possui suporte apenas a atualizações de políticas SDN em tempo de execução e não oferece suporte a atualizações de anúncios BGP, uma vez que estes são anunciados somente quando o cenário é inicializado.

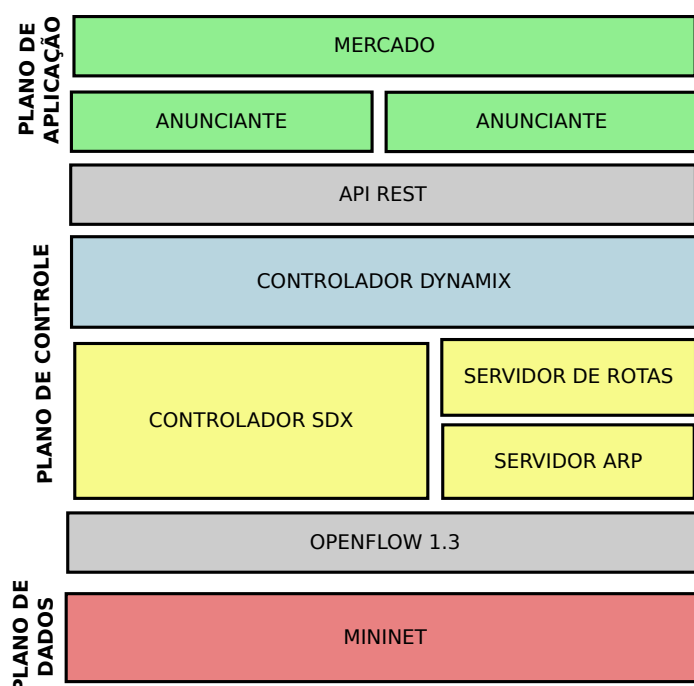
5.2.3 Plano de Dados

A estrutura de rede do IXP foi representada através de um único switch e os seus participantes foram modelados como hosts. Este switch opera como um Open vSwitch (LINUX FOUNDATION, 2016) e a comunicação com o controlador utiliza o protocolo OpenFlow 1.3 (ONF, 2012). Para isso, foi utilizado o emulador de rede Mininet ⁵, o qual oferece um ambiente de simulação de rede realístico e possibilita a instanciação de múltiplos hosts e switches em um ambiente único de desenvolvimento.

A alcançabilidade a outros sistemas autônomos que não são membros do IXP foi simulada por meio da adição de interfaces de redes virtuais. Para cada anúncio BGP foram adicionadas interfaces loopback com os endereços IPs dos sistemas autônomos alcançáveis através daquele participante. A Figura 5.9 ilustra a integração dos três planos e dos seus componentes.

⁵<http://www.mininet.org>

Figura 5.9: Arquitetura do protótipo desenvolvido.



Fonte: elaborada pelo autor

5.3 Testes do Protótipo

Nesta seção serão apresentados os testes realizados com o protótipo desenvolvido como prova de conceito desta proposta. Inicialmente serão feitos testes funcionais para verificar se o protótipo da camada de aplicação apresenta as funcionalidades descritas em seu modelo teórico. Posteriormente, a fim de testar a sua integração com o protótipo do plano de controle, serão reproduzidos os cenários de aumento do tráfego e falhas de topologia, discutidos na Seção 5.1.

5.3.1 Testes do Plano de Aplicação

Os testes realizados nesta seção tem como objetivo mostrar que o protótipo da camada de aplicação desenvolvido possui os Para a realização dos testes foi inicializada uma instância Node.js rodando a aplicação do Mercado de acordos do IXP e outras três instâncias de aplicações Anunciantes. Cada uma delas opera em uma porta distinta do mesmo computador e está conectada à sua própria instância da base de dados MongoDB. Para fins de demonstração foram escolhidas três mensagens do seu protocolo: (i) criar um anúncio no Mercado, (ii) consultar um anúncio com determinadas características e (iii)

propor um acordo para outro Anunciante.

O processo de criação de anúncios segue o seguinte modelo. Inicialmente cada Anunciante envia uma requisição POST com todos os campos necessários para a criação do anúncio para a interface *Advertisement* disponibilizada pelo Mercado. Para cada mensagem recebida, o Mercado gera uma chave única, armazena o conteúdo recebido em sua base de dados local e envia a chave gerada para o Anunciante, que também a armazena na sua base local. A Figura 5.10 ilustra o resultado da criação dos anúncios na tela administrativa do Mercado, na qual o campo *owner* identifica o Anunciante criador do anúncio e o código hash gerado é o seu identificador. A Figura 5.11 mostra a tela administrativa do Anunciante AS2, na qual pode-se verificar que existem dois anúncios com o mesmo identificador no Mercado de acordos.

Figura 5.10: Tela administrativa do Mercado do IXP.

#	Owner	Destination	Path distance	Type	Status
5844544c4e4316b052f2514a	AS1	AS6	3	Sale	New More details
5844546b4e4316b052f25150	AS2	AS7	4	Sale	New More details
5844547d4e4316b052f25157	AS3	AS8	2	Sale	New More details
584456164e4316b052f251ce	AS2	AS5	5	Sale	New More details

Fonte: elaborada pelo autor

Figura 5.11: Tela administrativa do sistema autônomo AS2.

#	Owner	Destination	Path distance	Type	Status
5844544c4e4316b052f2514a	AS1	AS6	3	Sale	New More details Propose agreement

#	Owner	Destination	Path distance	Type	Status
5844546b4e4316b052f25150	AS2	AS7	4	Sale	New More details
584456164e4316b052f251ce	AS2	AS5	5	Sale	New More details

Fonte: elaborada pelo autor

O segundo teste da aplicação consiste em consultar anúncios que satisfazem a um determinado requisito. O processo é bem simples, uma vez que a API REST desenvolvida possibilita que anúncios sejam filtrados por diferentes critérios. O Anunciante envia uma requisição GET para a interface *Advertisement* do Mercado incluindo os valores dos filtros necessários. O Mercado retorna a lista com todos anúncios que satisfazem esse critério. A Figura 5.11 mostra o resultado de uma busca por anúncios criados pelo AS1 e estão armazenados no Mercado.

O terceiro caso de teste da aplicação consiste na mensagem *propose*. Depois de consultar os anúncios da base de dados do Mercado, o Anunciante envia via método POST uma proposta para dono do anúncio, a qual inclui o seu identificador único. A mensagem recebida é incluída em uma lista de propostas que podem ser aceitadas ou rejeitas. Em caso de aceite, gera-se o token de autenticação que é retornado para o Anunciante que realizou a proposta. O token de autenticação é incluído na mensagem de atualização de políticas enviada ao controlador, juntamente com o tempo de expiração da regra. Na Figura 5.12, AS1 possui duas propostas solicitadas por AS2 e AS3.

Figura 5.12: Tela administrativa do sistema autônomo AS3.

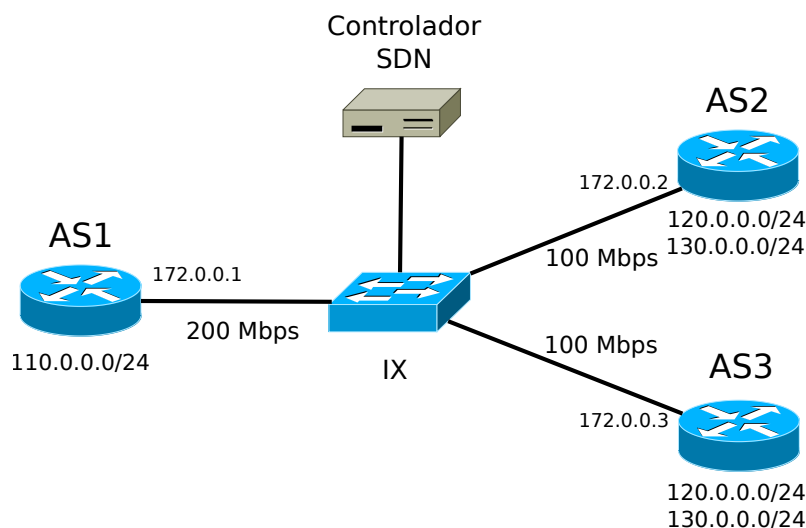
#	Proposed by	Announced in	Advertisement	Status
	AS2	IXP	5844544c4e4316b052f2514a	New <input type="button" value="Accept"/> <input type="button" value="Reject"/>
	AS3	IXP	5844544c4e4316b052f2514a	New <input type="button" value="Accept"/> <input type="button" value="Reject"/>

Fonte: elaborada pelo autor

5.3.2 Testes do Plano de Controle

Nesta seção serão realizadas emulações de dois cenários encontrados na Seção 5.1: um caso de falha e um aumento inesperado de tráfego. As duas emulações tem como objetivo validar a funcionalidade e a integração entre o protótipo da camada de aplicação e o protótipo do IXP baseado em SDN desenvolvido neste trabalho. A Figura 5.13 mostra a topologia utilizada nos dois casos emulados. Os sistemas autônomos AS2 e AS3 oferecem um caminho para os prefixos IPs 120.0.0.0/24 e 130.0.0.0/24 e AS1 possui caminho até 110.0.0.0/24. O enlace de AS1 possui capacidade de 200Mbps e AS2 e AS3 oferecem uma largura de banda de 100Mbps.

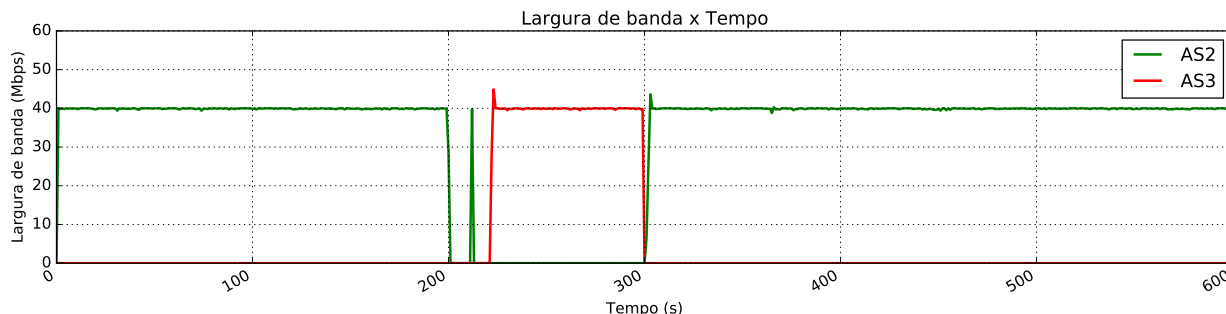
Figura 5.13: Cenário utilizado nas emulações.



Fonte: elaborada pelo autor

A primeira emulação demonstra um caso de falha de enlace encontrado na análise do tráfego dos acordos do IX-RS. A Figura 5.14 mostra a ocupação dos enlaces de AS2 e AS3 em função do tempo. Inicialmente AS1 mantém um acordo de troca de tráfego com AS2. O tráfego é enviado por quatro clientes UDP com uma taxa de transferência de 10Mbps cada para o IP 120.0.0.1. Aos 200 segundos ocorre uma falha no enlace de AS2 levando à perda de comunicação entre os dois ASes. Aos 230 segundos, AS1 estabelece um acordo provisório por meio do Mercado de acordos com AS3 e atualiza as suas políticas. Aos 300 segundos de emulação, a comunicação entre AS1 e AS2 é restabelecida e AS1 atualiza as suas políticas de roteamento conforme o acordo estabelecido previamente com AS2.

Figura 5.14: Ocupação dos enlaces de AS2 e AS3 no cenário de falha.



Fonte: elaborada pelo autor

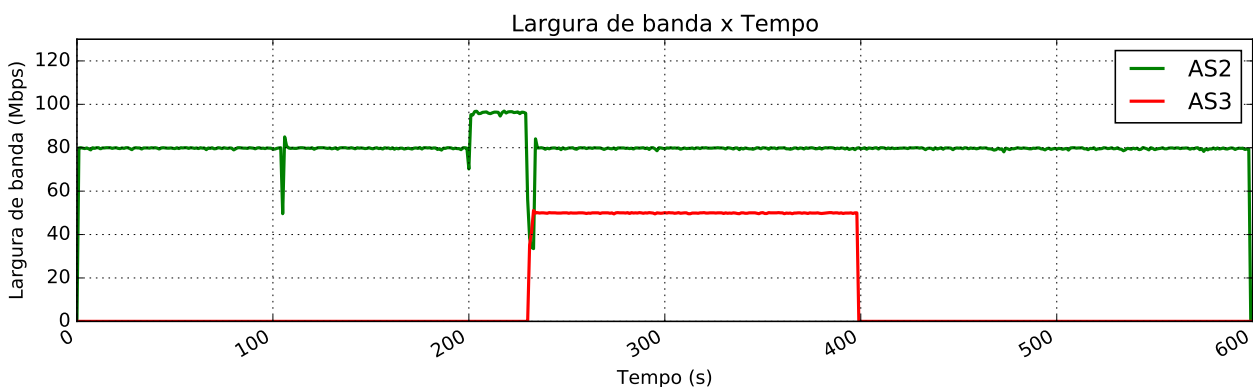
Na segunda emulação realizada é demonstrado um cenário de aumento inesperado do volume de tráfego trocado entre dois sistemas autônomos. A fim de simular o aumento de tráfego, foram gerados três fluxos UDP de 40Mbps cada. Dois deles tem como destino

os prefixos 120.0.0.0/24 e o outro tem como destino 130.0.0.0/24.

Inicialmente AS1 mantém um acordo de troca tráfego com AS2 e apenas dois clientes UDP estão ativos, transmitindo juntos 80Mbps de dados. Aos 200 segundos, o terceiro cliente UDP é iniciado e a taxa de envio passa a ser de 120Mbps, superior à capacidade do enlace. Neste momento, a taxa de perdas dos fluxos UDP é de cerca de 30%. Aos 230 segundos, AS2 estabelece um acordo temporário com AS3, que previamente criou um anúncio no Mercado do IXP. A partir daí, AS1 faz um balanceamento de carga enviando o tráfego com destino para os IPs 120.0.0.1 por meio de AS2 e o tráfego para 130.0.0.1 é enviado por AS3. Aos 400 segundos o terceiro é encerrado, representando o fim do pico de tráfego. A Figura 5.15 mostra o tráfego medido nos enlaces de AS2 e AS3.

No processo atual de acordos, em cenários de falha de enlaces ou de aumento inesperado de tráfego, AS1 não poderia estabelecer um acordo temporário com AS3, uma vez que acordos são estabelecidos em dias ou semanas. No entanto, com a existência de um mercado de acordos em IXPs o processo se tornaria mais ágil, de modo que AS1 pudesse estabelecer um acordo temporário com AS3 quando necessário.

Figura 5.15: Ocupação dos enlaces de AS2 e AS3 no cenário de aumento de tráfego.



Fonte: elaborada pelo autor

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi apresentado DYNAMIX, um mercado de acordos dinâmicos em Pontos de Troca de Tráfego. DYNAMIX tem como objetivo dinamizar o relacionamento entre os sistemas autônomos da Internet, permitindo que estes anunciem e estabeleçam acordos em períodos de tempo inferiores ao processo atual. Através de uma arquitetura simplificada e um protótipo funcional, o trabalho serviu como uma prova de conceito da ideia.

A análise do tráfego dos acordos bilaterais do IX-RS realizada neste trabalho serviu para avaliar os possíveis ganhos que um mercado de acordos dinâmicos pode oferecer aos seus participantes. Entre alguns benefícios esperados estão uma maior eficiência na alocação de recursos, redução de custos e uma maior possibilidade de resposta a eventos inesperados. Em um cenário de aumento de tráfego inesperado, explorado neste trabalho, o sistema autônomo poderia estabelecer um acordo temporário a fim de aumentar a sua capacidade.

A maior contribuição de DYNAMIX consiste em um maior dinamismo no estabelecimento de acordos. Deste modo, sistemas autônomos poderiam estabelecer acordos de curta duração sob demanda, a fim de suprir suas necessidades imediatas. O maior dinamismo oferecido por DYNAMIX, aliado a rica conectividade dos IXPs, também possibilitaria a variação dos preços conforme a oferta e demanda ou então de acordo com o período do dia.

Além de expressar os acordos existentes, com peering e trânsito, espera-se que o maior dinamismo oferecido por DYNAMIX viabilize a criação de novos tipos de acordos. Neste cenário, uma possibilidade interessante seriam acordos com custos e requisitos específicos para diferentes tipos de aplicações (*application-specific peering*). Outra oportunidade a ser explorada consiste em acordos específicos por regiões com consumo de tráfego diferente ao longo do dia.

Como trabalhos futuros, será feita inicialmente uma análise mais completa dos fluxos de tráfego dos acordos do IX-RS a fim de identificar potenciais ainda não explorados. Além disso, serão estudadas questões relacionadas à privacidade das informações disponibilizadas pelos participantes do mercado, dado que sistemas autônomos podem não ter interesse em divulgá-las publicamente. Por fim, será realizado um aperfeiçoamento da arquitetura proposta, de modo que DYNAMIX possa contribuir indiretamente também para o estabelecimento de caminhos fim-a-fim.

REFERÊNCIAS

- AGER, B. et al. Anatomy of a large european ixp. In: **Proceedings of the ACM SIGCOMM 2012 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication**. New York, NY, USA: ACM, 2012. (SIGCOMM '12), p. 163–174. ISBN 978-1-4503-1419-0. Available from Internet: <<http://doi.acm.org/10.1145/2342356.2342393>>.
- AMX-IX. **AMX-IX Annual Report 2015**. 2016. <https://ams-ix.net/annual_report/AMS-IX_Annual-Report_2015.pdf>.
- BRITO, S. H. B. et al. Anatomy of public internet exchange points ecosystem in brazil. In: **Proceedings of the 2015 XXXIII Brazilian Symposium on Computer Networks and Distributed Systems**. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2015. (SBRC '15), p. 110–119. ISBN 978-1-4673-7767-6. Available from Internet: <<http://dx.doi.org/10.1109/SBRC.2015.23>>.
- CASTRO, I. et al. Route bazaar: Automatic interdomain contract negotiation. In: **15th Workshop on Hot Topics in Operating Systems (HotOS XV)**. Kartause Ittingen, Switzerland: USENIX Association, 2015. Available from Internet: <<https://www.usenix.org/conference/hotos15/workshop-program/presentation/castro>>.
- CHATZIS, N. et al. There is more to ixps than meets the eye. **SIGCOMM Comput. Commun. Rev.**, ACM, New York, NY, USA, v. 43, n. 5, p. 19–28, nov. 2013. ISSN 0146-4833. Available from Internet: <<http://doi.acm.org/10.1145/2541468.2541473>>.
- CIDR. **CIDR Report**. 2016. <<http://www.cidr-report.org/as2.0>>.
- DHAMDHARE, A.; DOVROLIS, C. The internet is flat: Modeling the transition from a transit hierarchy to a peering mesh. In: **Proceedings of the 6th International Conference**. New York, NY, USA: ACM, 2010. (Co-NEXT '10), p. 21:1–21:12. ISBN 978-1-4503-0448-1. Available from Internet: <<http://doi.acm.org/10.1145/1921168.1921196>>.
- EURO-IX. **EURO-IX website**. 2016. <<https://www.euro-ix.net/ixps/list-ixps>>.
- GIOTSAS, V. et al. Inferring multilateral peering. In: **Proceedings of the Ninth ACM Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies**. New York, NY, USA: ACM, 2013. (CoNEXT '13), p. 247–258. ISBN 978-1-4503-2101-3. Available from Internet: <<http://doi.acm.org/10.1145/2535372.2535390>>.
- GODFREY, P. B. et al. Pathlet routing. **SIGCOMM Comput. Commun. Rev.**, ACM, New York, NY, USA, v. 39, n. 4, p. 111–122, aug. 2009. ISSN 0146-4833. Available from Internet: <<http://doi.acm.org/10.1145/1594977.1592583>>.
- GUPTA, A. et al. An industrial-scale software defined internet exchange point. In: **13th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 16)**. [S.l.: s.n.], 2016. (NSDI '16).
- GUPTA, A. et al. Sdx: A software defined internet exchange. **SIGCOMM Comput. Commun. Rev.**, ACM, New York, NY, USA, v. 44, n. 4, p. 551–562, aug. 2014. ISSN 0146-4833. Available from Internet: <<http://doi.acm.org/10.1145/2740070.2626300>>.

IETF. **Internet Exchange BGP Route Server**. 2016. <<https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-idr-ix-bgp-route-server-11>>.

IX-RS. **IX-RS**. 2016. <<http://www.ix.br/particip/rs>>.

IX-SP. **IX-SP**. 2016. <<http://ix.br/particip/sp>>.

KNOB, L. A. D. et al. Sdefix - identifying elephant flows in sdn-based ixp networks. In: **NOMS 2016 - 2016 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 19–26.

KOTRONIS, V. et al. Stitching inter-domain paths over ixps. In: **Proceedings of the Symposium on SDN Research**. New York, NY, USA: ACM, 2016. (SOSR '16), p. 17:1–17:12. ISBN 978-1-4503-4211-7. Available from Internet: <<http://doi.acm.org/10.1145/2890955.2890960>>.

LAPEYRADE, R.; BRUYÈRE, M.; OWEZARSKI, P. Openflow-based migration and management of the touix ixp. In: **NOMS 2016 - 2016 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1131–1136.

LINUX FOUNDATION. **Open vSwitch Project**. 2016. <<http://www.openvswitch.org/>>.

NORTON, B. W. **The Internet peering playbook: connecting to the core of the Internet**. [S.l.]: DrPeering Press, 2014.

ONF. **OpenFlow Switch Specification**. 2012. <<https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/onf-specifications/openflow/openflow-spec-v1.3.0.pdf>>.

PEERINGDB. **Peering DB**. 2016. <<https://www.peeringdb.com/ix/173>>.

RICHTER, P. et al. Peering at peerings: On the role of ixp route servers. In: **Proceedings of the 2014 Conference on Internet Measurement Conference**. New York, NY, USA: ACM, 2014. (IMC '14), p. 31–44. ISBN 978-1-4503-3213-2. Available from Internet: <<http://doi.acm.org/10.1145/2663716.2663757>>.

TOUIX. **TouIX website**. 2016. <<http://www.touix.net/en/content/touix>>.

VALANCIUS, V. et al. Mint: A market for internet transit. In: **Proceedings of the 2008 ACM CoNEXT Conference**. New York, NY, USA: ACM, 2008. (CoNEXT '08), p. 70:1–70:6. ISBN 978-1-60558-210-8. Available from Internet: <<http://doi.acm.org/10.1145/1544012.1544082>>.

APÊNDICE A — TRABALHO DE GRADUAÇÃO I

Um Serviço de Mercado de Enlaces em Pontos de Troca de Tráfego

Alexandre G. Wermann¹, Pedro de Botelho Marcos¹, Marinho P. Barcellos¹

¹Instituto de Informática – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)
Av. Bento Gonçalves, 9500 - Porto Alegre, RS - Brasil

{agwermann, pbmarcos, marinho}@inf.ufrgs.br

Abstract. *Internet routing relies mostly on agreements in which autonomous systems cannot dynamically indicate their preferences and requirements to exchange and purchase traffic. Keeping this in mind, this work proposes a Link Market Service offered by Internet eXchange Points (IXPs). The idea consists of providing additional information to BGP announcements that can be incorporated into the interdomain routing decision process, enabling more dynamic agreements and improving the economy of the Internet.*

Resumo. *O roteamento da Internet é baseado sobretudo em relações comerciais e contratuais através das quais sistemas autônomos não são capazes de indicar de forma dinâmica as suas preferências e seus requisitos para troca e compra de tráfego. Tendo isso em vista, este trabalho propõe um serviço de Mercado de Enlaces a ser oferecido pelos Pontos de Troca de Tráfego (PTTs). A ideia consiste em fornecer informações adicionais aos anúncios BGP que possam ser incorporadas no processo de decisão de roteamento interdomínio, possibilitando acordos mais dinâmicos e melhorando a economia da Internet.*

1. Introdução

A Internet é composta por aproximadamente cinquenta mil sistemas autônomos (ASes, do inglês *Autonomous Systems*) independentes e interessados em trocar tráfego. Hoje, o roteamento interdomínio é sobretudo baseado em múltiplos acordos comerciais estabelecidos entre sistemas autônomos. No modelo atual da Internet, ASes podem realizar troca de tráfego por meio de dois tipos de acordos: cliente-provedor e *peering*. No primeiro tipo de acordo, o cliente paga ao provedor para ter acesso à Internet. No segundo, geralmente não existe custo caso o tráfego trocado nos dois sentidos seja simétrico. Os dois tipos de relações podem ser tanto estabelecidos através de um enlace privado entre os sistemas autônomos envolvidos quanto por meio de Pontos de Troca de Tráfego.

Atualmente, acordos de troca de tráfego costumam ser burocráticos e não muito flexíveis, visto que exigem uma negociação prévia entre representantes das organizações envolvidas [Castro et al. 2015] e, depois disso, não costumam ser alterados com grande frequência. Nesse contexto, foi proposto um novo modelo de roteamento denominado *Contract Switching* [Yuksel et al. 2008]. A ideia consiste em prover um roteamento interdomínio dinâmico baseado em informações adicionais às do protocolo BGP (*Border Gateway Protocol*). O modelo possibilita que múltiplos *ISPs* (do inglês, *Internet Service Provider*) concordem em realizar troca de tráfego por meio de "contratos dinâmicos", através dos quais ASes podem definir de maneira explícita as suas preferências e os seus

requisitos na troca de tráfego. Deste modo, sistemas autônomos podem modificar seus acordos em curtos espaços de tempo, buscando alternativas que se adaptem a sua economia e a sua demanda de tráfego momentânea.

O conceito possibilita oportunidades inovadoras no contexto do roteamento interdomínio: estabelecimento de contratos entre múltiplos *ASes* para garantir um caminho de roteamento fim-a-fim entre dois sistemas autônomos, dinamicidade de preços de troca de dados no decorrer do dia e determinação de rotas com base na qualidade do serviço oferecido. Dentro dessas possibilidades, [Castro et al. 2015] propõe um sistema de acordos dinâmico e descentralizado, pelo qual *ASes* podem estabelecer um caminho fim-a-fim de troca de tráfego. No entanto, um modelo de roteamento interdomínio dinâmico deste tipo proporciona muitas vezes o estabelecimento de relações entre *ASes* concorrentes que podem não confiar um no outro. Por isso, torna-se necessário a existência de entidades neutras e confiáveis para monitorar as negociações e impossibilitar a interferência de terceiros no processo.

Nesse cenário, os Pontos de Troca de Tráfego da Internet despontam como fortes candidatos. Primeiro, por serem instituições neutras e confiáveis. Segundo, por serem ponto de conexão de uma grande quantidade de sistemas autônomos. E terceiro, devido a crescente popularidade que têm obtido recentemente. Estudos demonstram que a quantidade de membros em cada PTT cresce cerca de 10% a 20% anualmente e o aumento do volume de tráfego tem atingido taxas entre 50% e 100% no mesmo período [Richter et al. 2014]. Atualmente existem mais de 500 PTTs no mundo, alguns deles com até 800 membros e com tráfego comparável ao de *ISPs* de nível 1. Diante disso, PTTs têm apresentado grandes oportunidades em tornarem-se pontos de inovação do contexto da Internet.

Assim, o objetivo desse trabalho consiste em projetar e prototipar um serviço de Mercado de Enlaces a ser oferecido por Pontos de Troca de Tráfego. O serviço possibilitaria a automação dos atuais acordos de *peering* e de tráfego, de modo que os sistemas autônomos membros de PTTs realizassem as suas decisões de roteamento interdomínio baseando-se não apenas nas informações oferecidas pelo protocolo BGP. Deste modo, é possível que sistemas autônomos escolham entre uma rota economicamente mais viável ou uma rota que ofereça um serviço de melhor qualidade. O serviço proposto levará em conta três tipos de informações (i) políticas empregadas pelos sistemas autônomos membros do PTT, (ii) custo monetário e (iii) requisitos de serviço necessários por cada *AS*.

O restante desse trabalho está organizado como segue. Na Seção 2 é apresentada uma contextualização dos Pontos de Troca de Tráfego da Internet, seguida por uma análise dos acordos entre sistemas autônomos e uma descrição do critério de decisão utilizado no roteamento interdomínio. Na Seção 3 são apresentados os principais trabalhos relacionados da área. Posteriormente, na Seção 4 é descrita em maiores detalhes a proposta do Trabalho de Graduação 2. A Seção 5 aborda os principais desafios e as oportunidades em relação ao uso do serviço no processo de decisão de roteamento interdomínio, bem como a metodologia e o cronograma adotados no desenvolvimento do Trabalho de Graduação. Por fim, a Seção 6 conclui o trabalho.

requisitos na troca de tráfego. Deste modo, sistemas autônomos podem modificar seus acordos em curtos espaços de tempo, buscando alternativas que se adaptem a sua economia e a sua demanda de tráfego momentânea.

O conceito possibilita oportunidades inovadoras no contexto do roteamento interdomínio: estabelecimento de contratos entre múltiplos *ASes* para garantir um caminho de roteamento fim-a-fim entre dois sistemas autônomos, dinamicidade de preços de troca de dados no decorrer do dia e determinação de rotas com base na qualidade do serviço oferecido. Dentro dessas possibilidades, [Castro et al. 2015] propõe um sistema de acordos dinâmico e descentralizado, pelo qual *ASes* podem estabelecer um caminho fim-a-fim de troca de tráfego. No entanto, um modelo de roteamento interdomínio dinâmico deste tipo proporciona muitas vezes o estabelecimento de relações entre *ASes* concorrentes que podem não confiar um no outro. Por isso, torna-se necessário a existência de entidades neutras e confiáveis para monitorar as negociações e impossibilitar a interferência de terceiros no processo.

Nesse cenário, os Pontos de Troca de Tráfego da Internet despontam como fortes candidatos. Primeiro, por serem instituições neutras e confiáveis. Segundo, por serem ponto de conexão de uma grande quantidade de sistemas autônomos. E terceiro, devido a crescente popularidade que têm obtido recentemente. Estudos demonstram que a quantidade de membros em cada PTT cresce cerca de 10% a 20% anualmente e o aumento do volume de tráfego tem atingido taxas entre 50% e 100% no mesmo período [Richter et al. 2014]. Atualmente existem mais de 500 PTTs no mundo, alguns deles com até 800 membros e com tráfego comparável ao de *ISPs* de nível 1. Diante disso, PTTs têm apresentado grandes oportunidades em tornarem-se pontos de inovação do contexto da Internet.

Assim, o objetivo desse trabalho consiste em projetar e prototipar um serviço de Mercado de Enlaces a ser oferecido por Pontos de Troca de Tráfego. O serviço possibilitaria a automação dos atuais acordos de *peering* e de tráfego, de modo que os sistemas autônomos membros de PTTs realizassem as suas decisões de roteamento interdomínio baseando-se não apenas nas informações oferecidas pelo protocolo BGP. Deste modo, é possível que sistemas autônomos escolham entre uma rota economicamente mais viável ou uma rota que ofereça um serviço de melhor qualidade. O serviço proposto levará em conta três tipos de informações (i) políticas empregadas pelos sistemas autônomos membros do PTT, (ii) custo monetário e (iii) requisitos de serviço necessários por cada *AS*.

O restante desse trabalho está organizado como segue. Na Seção 2 é apresentada uma contextualização dos Pontos de Troca de Tráfego da Internet, seguida por uma análise dos acordos entre sistemas autônomos e uma descrição do critério de decisão utilizado no roteamento interdomínio. Na Seção 3 são apresentados os principais trabalhos relacionados da área. Posteriormente, na Seção 4 é descrita em maiores detalhes a proposta do Trabalho de Graduação 2. A Seção 5 aborda os principais desafios e as oportunidades em relação ao uso do serviço no processo de decisão de roteamento interdomínio, bem como a metodologia e o cronograma adotados no desenvolvimento do Trabalho de Graduação. Por fim, a Seção 6 conclui o trabalho.

2. Pontos de Troca de Tráfego e o roteamento interdomínio

Nesta seção serão abordados alguns tópicos que englobam esse trabalho. Inicialmente será feita uma contextualização dos Pontos de Troca de Tráfego, a sua importância no contexto da Internet e os tipos de acordo mantidos entre sistemas autônomos. Posteriormente, será feita uma breve apresentação do critério de decisão utilizado pelo roteamento interdomínio.

2.1. Pontos de Troca de Tráfego

Pontos de Troca de Tráfego são infraestruturas nas quais diferentes sistemas autônomos se conectam para realizar troca de tráfego. Considerados os sucessores dos Pontos de Acesso à Internet (*NAPs*, do inglês *Network Access Point*), os PTTs têm como principal objetivo facilitar a conexão de um sistema autônomo à Internet. Através de sua infraestrutura, provedores de serviço (*ISPs*) e redes de fornecimento de conteúdo (*CDNs*, do inglês *Content Delivery Networks*) podem trocar tráfego diretamente sem a necessidade de terceiros, diminuindo consideravelmente o custo de transmissão de dados.

O uso de PTTs tem crescido consideravelmente nos últimos anos. Atualmente a Internet conta com mais de 500 Pontos de Troca de Tráfego distribuídos por 120 países [EURO-IX 2016]. Alguns deles operam com tráfego similar ao de ISPs de nível 1 e o aumento do tráfego anual já ultrapassa os 50% [Kotronis et al. 2015]. O AMS-IX (*Amsterdam Internet Exchange*) é considerado o maior PTT da atualidade em número de participantes, com 795 membros. O PTT possui base original na Holanda, também mantendo cinco outros pontos de interconexão no mundo. De acordo com o seu relatório anual, 127 novos *ASes* passaram a ser membros do PTT holandês em 2015 [AMX-IX 2016]. Ainda segundo o mesmo relatório, seus integrantes trocaram em média 28 Petabytes de dados diariamente, atingindo a marca de 9 Exabytes (9060 Petabytes) no ano.

Fica evidente que PTTs oferecem infraestruturas que facilitam a conexão de ISPs. No entanto isso não elimina a complexidade de gerenciamento de sessões BGP e da escolha de rotas. Originalmente, era necessário que cada um dos membros de um PTT estabelecesse uma sessão BGP com todos os membros com os quais ele quisesse trocar tráfego. Tomando como base o *AMS-IX*, para que um dos membros pudesse trocar tráfego com os demais, ele deveria gerenciar 794 sessões BGP. Por isso, PTTs passaram a oferecer servidores de rotas como um serviço adicional aos seus membros [IETF 2016]. O *AMS-IX*, da Holanda, o *DE-CIX* da Alemanha e o *IX-BR* do Brasil são alguns exemplos de PTTs que oferecem esse serviço aos seus membros.

A ideia básica de um servidor de rotas consiste em simplificar o roteamento interdomínio, diminuindo o número de sessões BGP mantidas por cada AS e minimizando o sobrecarga do sistema. Servidores de rotas são responsáveis por gerenciar sessões BGP e não participam de nenhum processo de encaminhamento de dados. As funções de um servidor de rotas consistem basicamente em: (i) obter informações de roteamento interdomínio dos roteadores de borda de cada membro conectado, (ii) realizar algum tipo de processamento e filtragem nas informações recebidas e (iii) distribuir as dados resultantes do processamento aos roteadores de borda dos membros conectados a ele [Chatzis et al. 2013]. Apesar disso, ainda estão sendo estudadas soluções de como os servidores de rotas podem contribuir efetivamente para uma melhora no roteamento interdomínio.

Uma possibilidade já explorada consiste em implantar o paradigma de Redes Definidas por Software (*SDN*, do inglês *Software Defined Network*) em Pontos de Troca de Tráfego [Gupta et al. 2014]. O modelo proposto SDX (*Software Defined eXchange*) visa oferecer essa flexibilidade através do uso de servidores de rotas baseados em SDN. Além disso, diversas outras pesquisas estão sendo realizadas na área, algumas delas em cooperação com os dois maiores Pontos de Troca de Tráfego do mundo [AMX-IX 2016], [DE-CIX 2014]. Um exemplo é o projeto ENDEAVOUR, financiado pelo DE-CIX, o qual visa investigar como Pontos de Troca de Tráfego podem ser construídos utilizando SDN.

2.2. Acordos entre sistemas autônomos

O roteamento interdomínio da Internet é composto basicamente por dois tipos de relações: cliente-provedor e *peering*. Na relação cliente-provedor, o cliente paga ao provedor para ter acesso à Internet ou parte dela, enquanto que o provedor oferece a sua infraestrutura para o trânsito dos dados do seu cliente. A relação de *peering* pode ser dividida em dois tipos: sem custo e com custo. Quando a transferência de dados entre os *ASes* é simétrica, geralmente não existe custo. No entanto, em uma relação de *peering* com transferência de dados assimétrica, o *AS* que envia mais tráfego deve ressarcir o outro.

Os dois tipos de relações podem ser estabelecidos através de enlaces dedicados instalados entre os dois sistemas autônomos parceiros ou através de Pontos de Troca de Tráfego, opção que na maioria das vezes apresenta-se como uma solução mais barata economicamente. Para que dois sistemas autônomos possam estabelecer uma das duas relações citadas, é necessário que ambos troquem informações de roteamento interdomínio através do protocolo BGP. Por isso, os PTTs oferecem conectividade BGP entre os seus membros através de dois tipos de acordos: bilateral e multilateral.

No acordo bilateral quaisquer dois membros que pretendem realizar troca de tráfego devem manter uma sessão BGP entre eles, ou seja, um sistema autônomo deve manter uma conexão BGP com cada membro que queira trocar tráfego. Esse modelo é utilizado quando não existe a intenção de propagar anúncios BGP para todos os membros do PTT ou então quando pretende-se estabelecer conexões duradouras entre dois *ASes*. No entanto, em muitos casos ele representa uma sobrecarga aos membros, devido ao grande número de seções que devem ser gerenciadas.

O tipo de acordo multilateral geralmente é realizado por meio de servidores de rotas localizados dentro dos próprios PTTs. Em um acordo multilateral o sistema autônomo precisa manter apenas uma sessão BGP com o servidor de rotas, sendo capaz de trocar tráfego com vários membros. Acordos multilaterais tem como principal objetivo reduzir o sobrecarga e a complexidade da gerência empregada por cada membro do PTT para manter uma sessão BGP. Na prática, um PTT oferece os dois tipos de acordo, ficando a cargo do sistema autônomo escolher qual tipo de acordo adotar.

Estudos relatam que o número de acordos multilaterais já ultrapassa o de bilaterais em PTTs [Richter et al. 2014]. No entanto, os acordos bilaterais ainda levam vantagem se for levado em conta a quantidade de tráfego trocado. De acordo com a pesquisa, isso se deve ao fato dos grandes ISPs escolherem esse tipo de acordo.

2.3. Critério de decisão do roteamento interdomínio

Uma característica importante do roteamento interdomínio é o fato dele ser baseado nas preferências locais de cada sistema autônomo, isto é, o processo de decisão de encaminhamento de pacotes entre *ASes* consiste em definir qual é o *NEXT-HOP* apropriado para um determinado conjunto de dados. Na prática o *NEXT-HOP* corresponde ao endereço IP do roteador de borda do AS vizinho utilizado para alcançar um determinado AS destino. Depois disso, não há como garantir qual será o caminho percorrido até o destino, visto que cada AS subsequente poderá adotar a política de encaminhamento que julgar melhor para si. Atualmente, esse processo de decisão é estabelecido com base nas informações oferecidas pelo protocolo BGP: alcançabilidade de prefixos IP, na distância entre a origem e o destino (número de *ASes*) e nas políticas empregadas por cada sistema autônomo.

Tendo em vista o modelo atual da Internet e o crescimento notável do seu tráfego, acredita-se que a incorporação de novas informações no critério de decisão do roteamento interdomínio pode oferecer grandes benefícios aos ISPs. Informações relativas ao preço, à latência e ao tipo de tráfego possibilitam uma análise mais criteriosa e consequentemente levam a decisões mais inteligentes, como por exemplo considerar o melhor custo-benefício. Por exemplo, um provedor de conteúdo pode distribuir os seu conteúdo de vídeo por um serviço que ofereça uma menor latência e seja mais caro financeiramente e aos demais tipos de conteúdo optar por um serviço mais barato com uma latência superior.

3. Trabalhos Relacionados

Nesta seção, será feita uma breve análise dos trabalhos relacionados a este Trabalho de Graduação, os quais englobam: serviços oferecidos por pontos de troca de tráfego, o uso de SDN em PTTs, e por fim trabalhos que propõe novos modelos de roteamento interdomínio baseados em contratos.

Serviços em PTTs. Em [Perez et al. 2016] é proposto o serviço *ALTO-as-a-Service (AaaS)*, o qual disponibiliza publicamente informações de roteamento obtidas a partir de anúncios BGP, mapeando-as para o protocolo ALTO. O mapeamento resume-se em gerar mapas de redes (*Network Maps*) e mapas de custo (*Cost Maps*), definidos pelo padrão [IETF 2014]. Desenvolvido em forma de interfaces REST, o serviço possibilita que sistemas autônomos tenham uma visão geral da topologia interdomínio de rede e da distância entre cada nó. Apesar de promissor, a proposta considera apenas a distância *AS-PATH* na geração dos mapas de custo e de rede. Informações dinâmicas relacionadas às políticas dos sistemas autônomos, custos de transmissão, e níveis de latência, por exemplo, não são levadas em conta. Pontos de Troca de Tráfego costumam oferecer diversos outros serviços aos seus membros [AMX-IX 2016], [DE-CIX 2014].

SDN em PTTs. Em [Gupta et al. 2014] é introduzido o uso de SDN em Pontos de Troca de Tráfego. O objetivo consiste em aumentar a flexibilidade do roteamento interdomínio da Internet ao solucionar algumas limitações impostas pelo protocolo BGP, como: roteamento baseado apenas no prefixo IP destino e mecanismos indiretos de expressão de políticas. O modelo descrito como SDX, *Software Defined Internet Exchange*, modela o problema dando a ilusão que cada participante do PTT possui um switch virtual conectado a sua estrutura. O modelo também possibilita a definição de diferentes políticas por cada *AS*, combinando-as de modo a produzir uma política global coerente. Questões de escalabilidade em relação ao tamanho das tabelas de encaminhamento do SDX são

abordadas em [Gupta et al. 2016b], no qual é proposta uma nova versão do modelo: o iSDX (*Industrial-Scale Software Defined Internet Exchange*).

Aplicações baseadas em SDN. Diversas aplicações tem sido desenvolvidas tendo como base PTTs baseados em SDN. Em [Knob et al. 2016] é proposto um mecanismo de monitoramento e identificação de tráfegos elefantes, os quais são caracterizados por um alta vazão de dados de longa duração. Tais fluxos podem causar grandes impactos a rede através do grande consumo de recursos, como buffers e filas de dispositivos de rede. Já em [Gupta et al. 2016a], é introduzido *FLANC*, um mecanismo de autenticação incorporado ao SDX. A proposta assegura que cada participante do PTT instale apenas regras de fluxo que ele possua autorização. Acredita-se que a tecnologia SDN pode servir como um facilitador no desenvolvimento de novas aplicações em PTTs.

Contract Interdomain Routing. [Yuksel et al. 2008] apresenta o paradigma *Contract Switching* que consiste em estabelecer contratos entre múltiplos ISPs de modo a colaborar na formação de caminhos fim-a-fim no roteamento interdomínio. O modelo possibilita que *ASes* indiquem suas preferências e os requisitos necessários para o estabelecimento de relações de troca de tráfego, como por exemplo: preço por *Mbyte* trocado e níveis de qualidade de serviço oferecidos. Além disso, é possível que provedores de internet investiguem os riscos envolvidos em possíveis acordos interdomínios. Em [Castro et al. 2015], é apresentado o sistema de roteamento interdomínio baseado em contratos *Route Bazaar*. O trabalho considera a existência de entidades confiáveis (*ledgers*) com a finalidade de intermediar as negociações entre os sistemas autônomos envolvidos.

O conceito de incorporar novas funcionalidades ao atual roteamento interdomínio com o intuito de torná-lo mais flexível e economicamente eficiente é realmente promissor. No entanto, as ideias até então propostas não parecem se adequar ao cenário atual da Internet sem que a mesma fosse remodelada. Por isso, nesse trabalho buscou-se oferecer um serviço que (i) pudesse ser aplicável à atual Internet, e (ii) fosse oferecido por uma entidade neutra e confiável, de modo que não houvesse intervenção de nenhum dos *AS* interessados em trocar tráfego. Com base nisso, acredita-se que os Pontos de Troca de Tráfego podem contribuir significativamente na implantação dessa ideia.

4. Objetivos do Trabalho

A proposta desse Trabalho de Graduação consiste em projetar e prototipar um serviço de Mercado de Enlaces que auxilie no processo de decisão do estabelecimento de relações entre sistemas autônomos, através da análise de informações adicionais às do protocolo BGP. A aplicação proposta pode ser oferecida como um serviço adicional aos membros de um PTT, de maneira semelhante aos servidores de rotas ou até mesmo ser incorporada a eles. A ideia é que o serviço apenas disponibilize as informações e não atue de forma ativa no estabelecimento de relações, deixando isso a cargo dos sistemas autônomos que consomem os seus dados. Também existe a possibilidade de disponibilizar essas informações e estatísticas aos seus membros através de um mecanismo similar ao *Looking Glass*, largamente oferecido em Pontos de Troca de Tráfego.

O serviço será disponibilizado por meio de uma *API Rest*, através da qual os membros de Pontos de Troca de Tráfego possam anunciar suas preferências e seus requisitos para trocar tráfego, bem como consultar anúncios de outros membros. A *API* possibilitará que membros filtrem informações relacionadas ao preço da troca de tráfego, requisitos de

serviço oferecidos por cada AS e alcançabilidade de prefixos IP. O protótipo será implementado utilizando o ambiente de execução *Node.js*, o qual é baseado na *engine V8* desenvolvida pela Google e tem como principal objetivo facilitar o desenvolvimento de programas de redes escaláveis.

Para um melhor entendimento das novas oportunidades que o serviço pode oferecer ao roteamento interdomínio, considere o esquema proposto na Figura 1. O sistema autônomo AS1, que está conectado a um Ponto de Troca de Tráfego, deseja encaminhar tráfego ao sistema autônomo AS3, que não está conectado. Então, AS1 encaminha uma requisição ao servidor de rotas do PTT pedindo quais são os caminhos disponíveis até AS3 e recebe como resposta duas possibilidades. O primeiro caminho é através de AS2, que está a um hop de AS3, com custo de transmissão de \$15 por Mbyte. A segunda possibilidade é através de AS5 que está a dois hops de AS3 e anunciou um custo de \$25. AS1 sabe que AS5 oferece uma menor latência comparado a AS3. Com base nessas informações, AS1 poderia fazer escolhas mais inteligentes ao enviar tráfego por AS2 ou por AS5.

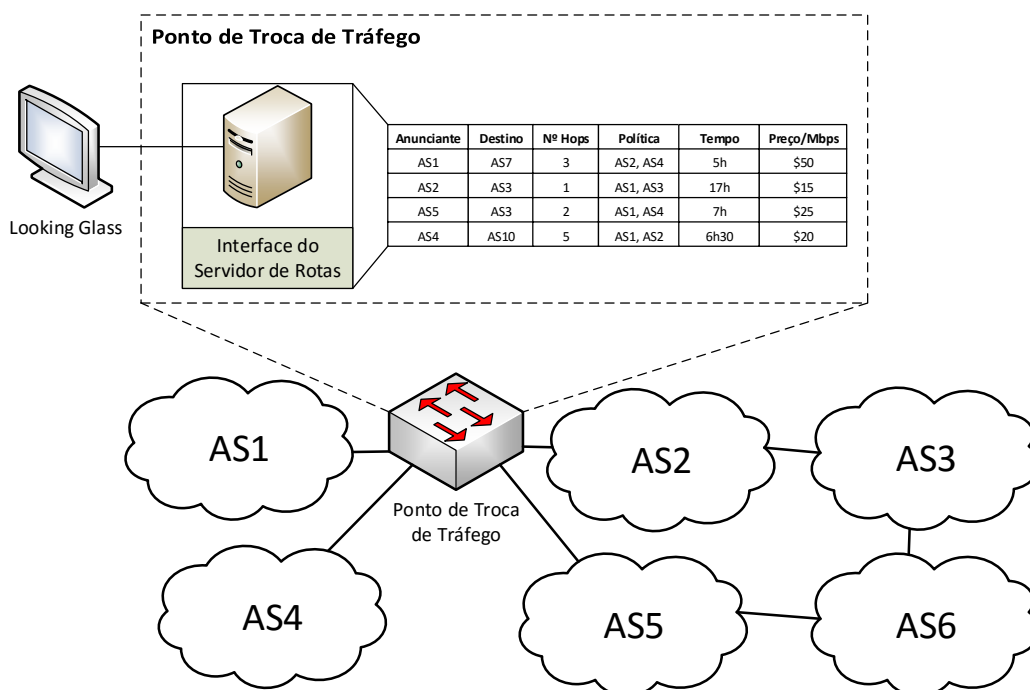


Figura 1. Modelo do serviço de Mercado de Enlaces

5. Desafios, Oportunidades e Organização do Trabalho

A crescente importância que os Pontos de Troca de Tráfego têm obtido recentemente torna-os possíveis pontos de partida para a otimização do tráfego interdomínio [Richter et al. 2014]. Além disso, a neutralidade dos PTTs aliada à proposta de um roteamento interdomínio flexível, baseado em um Mercado de Enlaces, permite o desenvolvimento de diversas oportunidades de pesquisa. Entre as diferentes possibilidades pode-se destacar:

- **Preços dinâmicos de acordo com a capacidade:** o serviço proposto possibilita que sistemas autônomos anunciem diferentes preços de acordo com a hora do dia e a demanda de tráfego momentânea. Além disso, é possível que um sistema autônomo possa anunciar valores distintos para diferentes clientes.
- **Estabelecimento de preços e requisitos:** estudos demonstram que até 2019, 80% do tráfego da Internet será vídeo [Cisco Systems 2016]. Já é possível inclusive notar o aumento das tensões entre provedores de conteúdo e provedores de acesso. Um serviço nos moldes de um Mercado de Enlaces pode servir como meio de apaziguamento, através do qual possam ser estabelecidos acordos benéficos aos dois lados.
- **Diferenciação de tipo de tráfego:** um serviço nos moldes de Mercado de Enlaces, associado à tecnologia SDN, poderia diferenciar os tipos de tráfego e estabelecer diferentes custos e requisitos para cada um deles. Em outras palavras, um ISP poderia pagar valores distintos e definir diferentes caminhos para cada tipo de tráfego.

5.1. Metodologia

A seguinte metodologia está sendo aplicada durante realização desse Trabalho de Graduação.

Estudo: o objetivo dessa etapa consiste em obter uma melhor compreensão sobre os Pontos de Troca de Tráfego e como eles podem contribuir para melhorar o funcionamento da Internet. Além disso, pretende-se obter um melhor entendimento do roteamento interdomínio, principalmente em termos de acordos entre sistemas autônomos.

Análise de alternativas: com base na etapa anterior, tentar identificar os principais desafios e definir que tipo de alternativas poderiam ser adotadas por um PTT visando uma melhora no tráfego da Internet. Nessa etapa, é delimitado o escopo do trabalho.

Projeto: etapa destinada para o projeto do serviço a ser desenvolvido bem como para a escolha de tecnologias utilizadas na implementação.

Implementação: essa etapa consiste em implementar o serviço proposto utilizando as tecnologias definidas durante a fase do projeto.

Validação e avaliação: por fim, na última etapa pretende-se realizar uma validação da ferramenta desenvolvida bem como avaliá-la através de experimentos ou simulações (*Mininet*, *SDX*), visando demonstrar as possibilidades e os benefícios do seu uso. Também pode-se verificar a viabilidade da alternativa com base nos resultados da simulação.

As etapas 1 e 2 foram realizadas nessa primeira parte do Trabalho de Graduação e, no momento, a etapa 3 está em andamento.

5.2. Cronograma de Atividades

As tarefas a serem realizadas na segunda parte do Trabalho de Graduação estão enumeradas a seguir. A Tabela 1 apresenta o cronograma de atividades.

1. Projeto do serviço a ser desenvolvido
2. Implementação do serviço definido através de uma *API REST*
3. Validação e avaliação da ferramenta
4. Redação da monografia do Trabalho de Graduação 2
5. Apresentação do Trabalho de Graduação 2

Tabela 1. Cronograma de Atividades do Trabalho de Graduação 2

Tarefa	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	X	X					
2		X	X				
3			X	X			
4				X	X	X	
5							X

6. Considerações finais

O fato de PTTs concentrarem parte substancial do tráfego e serem considerados infraestruturas neutras e confiáveis, faz com eles se tornem pontos estratégicos para a implementação de novas ideias para melhorar o funcionamento da Internet. Por isso, neste trabalho propõe-se a criação de um Mercado de Enlaces em Pontos de Troca de Tráfego, fazendo uso de informações complementares às já fornecidas pelos anúncios BGP. Os próximos passos desse trabalho consistem em realizar o projeto, desenvolver o serviço, validar as suas possibilidades e possivelmente avaliar a viabilidade da sua adoção por Pontos de Troca de Tráfego.

Referências

- AMX-IX (2016). Amx-ix annual report 2015. https://ams-ix.net/annual_report/AMS-IX_Annual-Report_2015.pdf.
- Castro, I., Panda, A., Raghavan, B., Shenker, S., and Gorinsky, S. (2015). Route bazaar: Automatic interdomain contract negotiation. In *Proceedings of the 15th USENIX Conference on Hot Topics in Operating Systems, HOTOS'15*, pages 9–9, Berkeley, CA, USA. USENIX Association.
- Chatzis, N., Smaragdakis, G., Feldmann, A., and Willinger, W. (2013). There is more to ixps than meets the eye. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 43(5):19–28.
- Cisco Systems, I. (2016). Cisco visual networking index: Forecast and methodology, 20142019. http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/ip-ngn-ip-next-generation-network/white_paper_c11-481360.pdf.

- DE-CIX (2014). De-cix annual report 2014. https://www.de-cix.net/files/user_upload/downloads/DE-CIX_Annual_Report_2014.pdf.
- EURO-IX (2016). Euro-ix website. <https://www.euro-ix.net/ixps/list-ixps/>.
- Gupta, A., Feamster, N., and Vanbever, L. (2016a). Authorizing network control at software defined internet exchange points. In *Symposium on SDN Research (SOSR)*.
- Gupta, A., MacDavid, R., Birkner, R., Canini, M., Feamster, N., Rexford, J., and Vanbever, L. (2016b). An industrial-scale software defined internet exchange point. In *13th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 16)*, NSDI '16.
- Gupta, A., Vanbever, L., Shahbaz, M., Donovan, S. P., Schlinker, B., Feamster, N., Rexford, J., Shenker, S., Clark, R., and Katz-Bassett, E. (2014). Sdx: A software defined internet exchange. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 44(4):551–562.
- IETF (2014). Application-layer traffic optimization (alto) protocol. <https://tools.ietf.org/html/rfc7285>.
- IETF (2016). Internet exchange bgp route server. <https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-idr-ix-bgp-route-server-10>.
- Knob, L. A., Esteves, R., Granville, L., and Tarouco, L. (2016). Sdefix - identifying elephant flows in sdn-based ixp networks. In *IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium (NOMS)*, NOMS '16.
- Kotronis, V., Klöti, R., Rost, M., Georgopoulos, P., Ager, B., Schmid, S., and Dimitropoulos, X. (2015). Investigating the potential of the inter-ixp multigraph for the provisioning of guaranteed end-to-end services. In *Proceedings of the 2015 ACM SIGMETRICS International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems*, SIGMETRICS '15, pages 429–430, New York, NY, USA. ACM.
- Perez, D., Brito, S., Fontes, R., and Rothemberg, C. (2016). Delivering application-layer traffic optimization services based on public routing data at internet exchange points. In *XXXXIV Brazilian Symposium on Computer Networks and Distributed Systems (SBRC)*.
- Richter, P., Smaragdakis, G., Feldmann, A., Chatzis, N., Boettger, J., and Willinger, W. (2014). Peering at peerings: On the role of ixp route servers. In *Proceedings of the 2014 Conference on Internet Measurement Conference*, IMC '14, pages 31–44, New York, NY, USA. ACM.
- Yuksel, M., Gupta, A., and Kalyanaraman, S. (2008). Contract-switching paradigm for internet value flows and risk management. In *INFOCOM Workshops 2008, IEEE*, pages 1–6.