

# Uma solução de roteamento como serviço baseada em redes definidas por software

Carlos N. A. Corrêa<sup>1</sup>, Sidney C. de Lucena<sup>1</sup>, Christian E. Rothenberg<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro (UNIRIO) – Rio de Janeiro – RJ.

<sup>2</sup>Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPqD) – Campinas – SP.

{carlos.correa,sidney}@uniriotec.br, esteve@cpqd.com.br

**Abstract.** *This work proposes that the operation of an Internet AS should be oriented by a high-level description of its business policy. To materialize this view, we introduce a routing as a service platform based on RouteFlow, which virtualizes IP routing operations in OpenFlow networks. Over this platform, a novel routing service was built where a single process executing BGP is used to define, in a centralized fashion, the external routing of an AS, and yet without the need to run an IGP for internal routing. The results obtained suggest that the platform serves for the execution of an AS' business policy, under the perspective of low administrative overhead.*

**Resumo.** *Este trabalho propõe que a operação de um AS seja orientada por uma descrição de alto nível de sua política de negócio. Para concretizar essa visão, uma plataforma de roteamento como serviço foi construída a partir da arquitetura RouteFlow, que virtualiza operações de roteamento IP em redes OpenFlow. Sobre essa plataforma, um serviço de roteamento foi construído onde um único processo rodando o protocolo BGP é usado para definir, de forma centralizada, o roteamento externo de um AS, sem ainda precisar de um protocolo IGP para o roteamento interno. Os resultados obtidos sugerem que a plataforma serve como instrumento para a realização da política de negócio de um AS, sob uma perspectiva de baixa sobrecarga administrativa.*

## 1. Introdução

A virtualização, sob uma perspectiva de negócios, cede aos provedores de serviços e conteúdo baseados na Internet a chance de concentrarem-se na operação de seu serviço, ao invés de na operação de seus componentes.

Em Sherwood et al. (2010) apresenta-se o conceito de virtualização de redes a partir das redes definidas por *software* (do inglês *software-defined networking*, ou simplesmente SDN). Para constituir uma rede do tipo é necessário dividir seus elementos em duas categorias. Há aqueles dedicados a encaminhar o tráfego entre os sistemas finais conectados, os quais designamos elementos do plano de dados. Complementarmente, há elementos que atuam no plano de controle (controladores), sendo responsáveis por decidir de que forma o plano de dados deverá realizar seu trabalho. Uma das principais soluções do estado-da-arte a implementar o conceito é o protocolo OpenFlow, apresentado em McKeown et al. (2008).

Em Keller e Rexford (2010), no entanto, observa-se que, apesar das inovações baseadas em plataformas virtuais oferecerem uma visão abstrata dos recursos disponíveis, estas ainda mantêm o *modus operandi* de redes tradicionais. Além disso as decisões de cada elemento roteador são tomadas a partir de suas visões particulares da rede, e não a partir de uma política global de encaminhamento.

O trabalho de dissertação aqui apresentado aborda ambos os problemas através da transição da arquitetura RouteFlow (Nascimento et al. 2010), que realiza roteamento IP sobre uma rede OpenFlow, para o que se chama de *plataforma de roteamento como serviço*. Neste caso o sentido de “serviço” refere-se a elementos que desempenham partes independentes de um processo de negócio, opacos entre si, mas que por suas naturezas complementares alcançam um resultado conjunto (“roteamento”). E para que um operador possa implementar serviços arbitrários e descrever de forma única o comportamento esperado de uma arquitetura virtual de roteamento IP, espera-se prover uma “plataforma”: um conjunto de interfaces e abstrações de alto nível compartilhadas pelos serviços.

Este projeto de pesquisa foi desenvolvido sob a orientação do Prof. Sidney Lucena (UNIRIO), com co-orientação do Dr. Christian Rothenberg (CPqD), como requisito para a obtenção do título de Mestre por Carlos Nilton Araújo Corrêa pelo Departamento de Informática Aplicada da Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro (UNIRIO). As atividades que o compreenderam ocorreram entre outubro de 2010 e fevereiro de 2012, e seus resultados se converteram em publicações realizadas ao longo de todo o período e além.

O texto das próximas seções encontra-se assim organizado: na Seção 2 são apresentados os objetivos e a metodologia usada na realização da pesquisa; na Seção 3 são resumidos os resultados finais obtidos pela pesquisa; na Seção 4 são apresentadas as publicações derivadas do trabalho; na Seção 5 discute-se as oportunidades de cooperação interinstitucionais e o impacto da pesquisa fora dos limites do departamento em que se realizou; na Seção 6 são apresentadas as conclusões a respeito da dissertação.

## **2. Objetivos**

Um Sistema Autônomo da Internet (ou “AS”, do inglês “Autonomous System”) representa um domínio administrativo que hospeda sistemas finais, ou de algum outro modo fornece serviços de comunicação, em uma escala suficiente para que se justifique anunciar, em nível global, a disponibilidade de acesso às suas redes. Tal disponibilidade é “anunciada” por meio do protocolo BGP, mecanismo que permite a um AS informar a outros a que redes sua infraestrutura está conectada. Portanto, para que seja possível a troca de dados entre sistemas de todo o mundo, os diversos ASs que compõem a Internet compartilham entre si as redes com as quais têm contato. Assim, quando um de seus roteadores precisa enviar dados para uma rede distante que esteja disponível, pesquisa em sua base de informações qual dos ASs vizinhos conhece o menor caminho rumo ao destino e transmite o respectivo tráfego através dele (KUROSE; ROSS, 2009).

As arquiteturas virtuais de roteamento IP oferecem um cenário de execução centralizada deste sistema distribuído, em um plano de controle virtual na memória de um sistema controlador. Porém, não oferecem um mecanismo que possa se privilegiar deste cenário, se limitando a reconstituir, a partir de novos elementos, os mesmos paradigmas da operação tradicional de protocolos de roteamento.

Tal generalização esconde o fato de que nem sempre é tão simples tomar decisões de roteamento. Segundo Norton (2000), da mesma maneira que um cliente final contrata seu ISP para enviar e receber informações da Internet, é possível que seja firmado um acordo entre *peers* para que eles utilizem o serviço de transporte de dados um do outro. Indo além do interesse mútuo no acesso às respectivas redes (que é mais comum), acordos entre provedores podem envolver um pagamento em função dos volumes de dados trafegado. Nestes casos, os acordos geralmente se baseiam na diferença dos volumes de tráfego consumidos por cada um deles em um determinado período. Portanto, é desejável que a lógica de encaminhamento de pacotes entre redes reflita não só o conhecimento do “menor caminho” até o destino, mas também a política de negócio de um AS, que é constituída por seus objetivos ao firmar cada relação de troca de tráfego (ZHANG-SHEN; WANG; REXFORD, 2008).

Assim, o objetivo da dissertação aqui resumida foi: estabelecer uma plataforma de roteamento como serviço, capaz de extrair decisões de roteamento de um plano de controle virtual e submetê-las a lógicas de encaminhamento arbitrárias, que realizem completamente ou em parte a política de negócio de um sistema autônomo da Internet. Cada possível unidade lógica aplicada à plataforma foi então denominada um *serviço de roteamento*.

Esperava-se responder à hipótese de que uma arquitetura virtual de roteamento IP como a RouteFlow (NASCIMENTO et al., 2011a) poderia ser transformada em uma plataforma desse tipo. Esta transformação ocorreria pela incorporação de elementos de especificação dos serviços que traduzem a política de negócio do AS e da infraestrutura subjacente à sua operação. Assim, compunham os objetivos específicos do trabalho:

1. A definição de modelos informacionais que permitissem descrever o comportamento esperado para o roteamento de um AS, além de sua conectividade física.
2. Uma gramática de configuração que possibilitasse codificar em uma estrutura de alto nível as informações presentes nos modelos.
3. Determinar que ferramentas de construção de redes virtuais melhor se aplicariam ao estabelecimento do plano de controle virtual planejado.
4. Desenvolver um serviço de roteamento que pudesse ser executado sobre a infraestrutura da plataforma constituída.

### **3. Resultados Obtidos**

A especificação de instrumentos virtuais (objetivo 3) foi o primeiro resultado alcançado, obtido a partir de um trabalho em duas etapas. A primeira foi baseada na análise das características funcionais de uma seleção de ferramentas do estado da arte. Em seguida, um plano de experimentação foi detalhado e posto em prática para aferir métricas de desempenho que embasaram uma análise quantitativa do desempenho de cada ferramenta considerada adequada na primeira etapa.

Os instrumentos melhor avaliados foram incorporados à arquitetura RouteFlow. Isso envolveu a modificação do sistema (escrito em C++) para que passasse a operar com o virtualizador LXC e o *switch* virtual Open vSwitch. Nessa mesma etapa o mecanismo de coleta de rotas usado pelo RouteFlow, originalmente baseado em

consultas periódicas à tabela de roteamento do sistema operacional, foi substituído por uma integração com a API Linux RTNetlink.

Em relação aos objetivos 1 e 2, uma gramática capaz de atender a ambos foi construída. Para tal, foi necessário elaborar modelos de informação concernentes aos elementos de uma rede SDN dedicada a roteamento. Após a conclusão de que tais modelos reproduziam o conhecimento a respeito destas redes, foi criado um conjunto formal de símbolos e regras gramaticais, tanto em um dialeto de Forma Normal Conjuntiva, quanto em código para o analisador léxico (GNU *flex*) e sintático (GNU *yacc*). Em seguida, uma arquitetura que permite armazenar informações de uma rede expressa dentro das regras estabelecidas em uma memória sistêmica foi apresentada, como um diagrama de classes.

Por fim, buscou-se construir, para alcance do objetivo 4, um serviço que implementasse uma lógica de encaminhamento particular e capaz de usar o roteamento BGP como uma entrada ao invés de tê-lo como um fim. Assim, sua operação atestaria a validade das intervenções realizadas e, por conseguinte, da hipótese de pesquisa. Este serviço foi implementado como um módulo opcional RouteFlow (escrito em C++).

#### **4. Publicações Resultantes da Pesquisa**

Nesta seção são apresentadas as publicações derivadas da pesquisa realizada. Nesta exposição cada capítulo do texto é rapidamente descrito, o que permite uma correlação entre o conteúdo e os veículos correspondentes.

O Capítulo 3 (“Proposta de roteamento como serviço”) aprofunda a análise do problema abordado, e nele é estabelecido um modelo operacional para a plataforma a ser construída. Também são elencadas as características desejáveis para a solução vislumbrada. A discussão acerca destas idéias foi objeto de publicações no *WPEIF '2011* (NASCIMENTO et al., 2011b) e da *VI International Conference of Future Internet (CFI '2011)* em Seul, Coréia do Sul (NASCIMENTO et al., 2011c).

O Capítulo 4 (“Avaliação de componentes virtuais”) inclui uma caracterização do uso de ferramentas de virtualização nas arquiteturas virtuais de roteamento IP; avaliações, qualitativas e quantitativas, da aderência destas mesmas ferramentas ao tipo de solução que se pretendia construir. A caracterização, experimentos realizados e resultados obtidos foram objeto de artigos apresentados na trilha principal da *SBRC '2011* (Qualis B2) (CORRÊA et al., 2011) e na *IEEE NOMS '2012* (Qualis A2), no Havaí, EUA (CORRÊA et al., 2012a).

O Capítulo 5 (“Construção da Plataforma de Roteamento como Serviço”) apresenta os modelos de informação para descrição da topologia e do comportamento de um AS, além de detalhar a construção da gramática de configuração que os implementa. O Capítulo 6 (“Uma aplicação de roteamento como serviço”), por sua vez, descreve a construção de um serviço de roteamento, aplica-o a um estudo de caso e apresenta uma análise dos resultados obtidos. Ambos os capítulos serviram de base para publicações nos *workshops SIGCOMM HotSDN '2012* (ROTHENBERG et al., 2012a), realizado em Helsinque, Finlândia, *WGRS '2012* (CORRÊA et al., 2012b) e *WPEIF '2012* (ROTHENBERG et al., 2012b).

Além da publicação de artigos, parte dos resultados do trabalho aqui descrito foram utilizados como parte de sessões “demo” (ou “salões de ferramentas”) em dois

eventos internacionais: a *SuperComputing '2011* (Qualis A1) (ROTHENBERG et al., 2011) e o *Open Networking Summit '2012*, promovido para disseminação da tecnologia OpenFlow para a indústria. Também foram produzidos dois textos em formato tutorial, publicados no site do RouteFlow (CORREA, 2012c e CORREA, 2012d), com o objetivo de facilitar a ampla experimentação, por parte da comunidade acadêmica, da solução construída.

Por fim, os autores dos artigos citados também foram convidados a submeter um capítulo para o livro *Network Innovation through OpenFlow and SDN: Principles and Design*, o qual se encontra em processo de revisão.

## **5. Interação com a Comunidade Acadêmica**

Ao longo da redação do trabalho de CORRÊA et al., 2011, estabeleceu-se contato com os primeiros autores do trabalho RouteFlow, à época intitulado QuagFlow. A perspectiva de avanço da arquitetura levou à assinatura de um termo de cooperação e confidencialidade entre o CPqD e a UNIRIO, após o que todos os seus programas-fontes, bem como toda a documentação de projeto existente, foram repassados ao autor desta proposta de pesquisa.

A interação com o CPqD permitiu o estabelecimento de um ciclo ágil de pesquisa, discussão e prototipação. Paralelamente, aquela instituição firmou junto à Indiana University (EUA) um acordo semelhante ao assinado com a UNIRIO. A Indiana University, por sua vez, tinha projetos de pesquisa complementares aos realizados como parte deste projeto de pesquisa. Isso favoreceu a construção dos protótipos apresentados em salões de ferramentas. Em resposta à disseminação da pesquisa e de seus resultados, o código modificado do RouteFlow foi acessado a partir de mais de 20 países diferentes, em um volume de tráfego de mais de 2 TB.

Ao passo em que a pesquisa se aproximava de sua conclusão, era importante contar com referências do mundo real a respeito das redes de produção de grandes ASes. Assim, além do amplo referencial teórico utilizado ao longo da pesquisa, o pesquisador Robert Raszuk (da NTT/MCL) contribuiu com sua experiência na execução de sistemas centralizados de roteamento em um dos maiores provedores do mundo.

## **6. Conclusão**

A plataforma sobre a qual o serviço foi implementado, constituída a partir da validação da hipótese de pesquisa e paralela às perspectivas apresentadas em Keller e Rexford (2010), pode ajudar a tornar a execução de protocolos de roteamento mais gerenciável. Neste sentido, este trabalho é bem-sucedido em oferecer um instrumento que se aplica ao tratamento dos problemas estudados. Ainda que outras abordagens permaneçam válidas (e novas ainda possam ser tentadas), um serviço apoiado sobre as bases constituídas pode implementar uma ou várias das características existentes em soluções relacionadas, as quais, individualmente, também não oferecem um conjunto absoluto de respostas para os problemas atacados.

Acredita-se que os resultados do trabalho também foram satisfatórios por sua natureza transversal. Ao incluir etapas como avaliação de desempenho, experimentação e especificação de uma gramática, múltiplas áreas do conhecimento foram abordadas, dentro do escopo de trabalho inicialmente definido, de maneira conclusiva.

## Referências

- BOLLA, R. et al. Drop: An open-source project towards distributed sw router architectures. In: GLOBECOM 2009. IEEE. 2009.
- CORREA, C. N. A. et al. Uma Avaliação Experimental de Soluções de Virtualização para o Plano de Controle de Roteamento de Redes Virtuais. In: XXIX SBRC. 2011.
- CORREA, C. N. A. et al. An experimental evaluation of lightweight virtualization for software-defined routing platform. In: IEEE/IFIP NOMS 2012. 2012a.
- CORREA, C. N. A. et al. Uma Plataforma de Roteamento como Serviço Baseada em Redes Definidas por Software. In: Anais do XVII WGRS. 2012b.
- CORREA, C. N. A. Your First RouteFlow Network. <http://goo.gl/EBHPF>. Acessado em 01 de outubro de 2012. 2012c.
- CORREA, C. N. A. Four Routers Running OSPF. <http://goo.gl/ysWG4>. Acessado em 01 de outubro de 2012. 2012d.
- KELLER, E.; REXFORD, J. The "platform as a service" model for networking. In: Proceedings of INM/WREN'10. 2010.
- KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. Computer Networking: A Top-Down Approach. 5th. ed. USA: Addison-Wesley Publishing Company, 2009.
- MCKEOWN, N. et al. Openflow: enabling innovation in campus networks. SIGCOMM Comput. Commun. Rev., ACM, New York, NY, USA, v. 38, p. 69–74, March 2008.
- NASCIMENTO, M. R. et al. Routeflow: Roteamento commodity sobre redes programáveis. In: Anais do XXIX SBRC. 2011a.
- NASCIMENTO, M. R. et al. Quagflow: partnering quagga with openflow. SIGCOMM Comput. Commun. Rev., ACM, New York, NY, USA, v. 40, August 2010.
- NASCIMENTO, M. R. et al. The RouteFlow Approach to IP Routing Services on Software-Defined Networks. In: Anais do II WPEIF. 2011b.
- NASCIMENTO, M. R. et al. Virtual routers as a service: the routeflow approach leveraging software-defined networks. In: Proceedings of the 6th CFI. New York, NY, USA: ACM, 2011c.
- NORTON, W. B. Internet service providers and peering. In: Proceedings of NANOG 19. Albuquerque, New Mexico: [s.n.], 2000.
- ROTHENBERG, C. E., et al. Revisiting routing control platforms with the eyes and muscles of software-defined networking. In HotSDN '12, 2012a.
- ROTHENBERG, C. E., et al. Revisiting IP Routing Control Platforms with OpenFlow-based Software-Defined Networks. In: Anais do III WPEIF. 2012b.
- ROTHENBERG, C. E., et al. Virtual IP Routing Services with RouteFlow. In: Annals of the 11th Supercomputing. 2011.
- SHERWOOD, R. et al. Carving research slices out of your production networks with openflow. SIGCOMM Comput. Commun. Rev., ACM. January 2010.
- ZHANG-SHEN, R.; WANG, Y.; REXFORD, J. Atomic Routing Theory: Making an AS Route Like a Single Node. [S.l.], July 2008.