

OMNI: Uma Ferramenta para Gerenciamento Autônomo de Redes OpenFlow*

Diogo M. F. Mattos, Natalia C. Fernandes, Leonardo P. Cardoso, Victor T. da Costa, Lucas H. Mauricio, Filipe P. B. M. Barretto, Alessandra Y. Portella, Igor M. Moraes², Miguel Elias M. Campista, Luís Henrique M. K. Costa e Otto Carlos M. B. Duarte

¹Grupo de Teleinformática e Automação, PEE/COPPE-DEL/POLI, Universidade Federal do Rio de Janeiro

²Laboratório MídiaCom, PGC-TCC/IC, Universidade Federal Fluminense

Resumo. *O gerenciamento é um desafio em redes de computadores devido ao grande número de variáveis monitoradas e à dificuldade de configurar os parâmetros da rede de forma autônoma. Neste artigo, é apresentada a ferramenta OpenFlow MaNagement Infrastructure (OMNI), que auxilia o administrador no controle e na gerência de redes OpenFlow, disponibilizando uma interface de gerenciamento remota. A ferramenta é baseada em uma arquitetura orientada a serviços e permite o monitoramento e a configuração dinâmica de fluxos. Todas as funcionalidades estão disponíveis através da interface web desenvolvida. Além disso, a OMNI oferece, por intermédio de sua interface, a facilidade de requisição e coleta de informações para o gerenciamento autônomo da rede através das aplicações desenvolvidas em uma plataforma multiagentes. As demonstrações incluem o uso da interface web para gerenciamento ao vivo de uma rede OpenFlow e a observação da ação autônoma dos agentes para solucionar problemas na rede.*

Abstract. *Management is a challenge in computer networking because of the numerous monitoring variables and the difficulty to autonomously configure network parameters. This paper presents the OpenFlow MaNagement Infrastructure (OMNI) tool, which helps the administrator to control and manage OpenFlow networks by providing a remote management interface. The tool has a service-oriented architecture and allows flow monitoring and dynamic flow configuration. All these functionalities are accessible via the developed web interface. OMNI also offers the facility of requiring and collecting data through its interface for autonomous network management, which is achieved by using applications developed based on a multi-agent platform. OMNI demos include the web interface utilization to perform live management of an OpenFlow network and the observation of agents' execution to solve network problems.*

1. Introdução

A plataforma OpenFlow permite a criação de redes de teste em paralelo com a rede de produção, utilizando equipamentos de rede comerciais [McKeown et al., 2008]. Devido a essa facilidade e por ser um padrão aberto, o OpenFlow dá suporte à inovação, permitindo o desenvolvimento de novos mecanismos de controle e o seu teste em ambientes reais [Fernandes et al., 2010]. Contudo, a utilização do OpenFlow requer a

*A ferramenta OMNI pode ser obtida em <http://www.gta.ufrj.br/omni>

existência de ferramentas que simplifiquem o gerenciamento das redes e facilitem o desenvolvimento de novos mecanismos de controle.

A arquitetura do OpenFlow define um modelo de rede no qual os elementos encaminhadores, chamados de comutadores OpenFlow, são simples e programáveis. Um nó especial, chamado de controlador, centraliza a execução de todas as tarefas de controle, sendo também utilizado para o desenvolvimento de novos mecanismos. Há algumas implementações de controladores disponíveis para a plataforma OpenFlow [Koponen et al., 2010, SNAC, 2011, Cai et al., 2010], dentre as quais se destaca a do controlador NOX [Gude et al., 2008], que foi utilizado como base para o desenvolvimento da ferramenta. Para dar suporte à virtualização de redes, a plataforma OpenFlow disponibiliza o FlowVisor [Sherwood et al., 2010], que permite instanciar um controlador para cada uma das redes virtuais.

Este artigo propõe uma ferramenta, chamada de *OpenFlow MaNagement Infrastructure* (OMNI), para o controle e o gerenciamento de redes OpenFlow que possibilita o desenvolvimento de aplicações autônomas. A OMNI disponibiliza um conjunto de ferramentas de controle e gerenciamento, uma interface web para o administrador atuar sobre essas ferramentas, além de um sistema multiagentes para controlar autonomamente a rede. Entre as ferramentas passivas, destacam-se a ferramenta que coleta as estatísticas dos fluxos e a que coleta dados para obtenção da topologia física. Como ferramentas ativas, responsáveis pelas ações na rede, são disponibilizadas uma interface para a criação, modificação e remoção de regras de encaminhamento para fluxos e também uma interface para migração de fluxos, que permite ao administrador da rede alterar o caminho físico de um fluxo. Ressalta-se que a facilidade de migração proposta garante uma migração de fluxo sem perdas de pacotes. Graças a essa funcionalidade, o administrador pode fazer manutenção preventiva dos seus comutadores ou utilizar técnicas de computação verde para reduzir o número de comutadores ativos. A OMNI também oferece a funcionalidade de gerenciamento autônomo, implementado através de agentes criados com a plataforma Ginkgo [Ginkgo Networks, 2008]. Assim, a ferramenta possui uma interface para que agentes programados pelo administrador possam atuar sobre a rede. Para demonstrar a facilidade de gerenciamento autônomo, foi desenvolvido um agente para detectar falhas em enlaces e garantir que as redes virtuais não utilizem os enlaces com alta taxa de perda de pacotes. Os testes com a migração mostram que essa funcionalidade apresenta baixo tempo de resposta e é realizada sem causar perdas de conexão ou de pacotes. Experimentos realizados também mostram que os agentes da ferramenta desenvolvida apresentam um baixo tempo de resposta para detecção de falhas relevantes e tomada de atitude para solucionar o problema. Tais resultados obtidos com a ferramenta serão demonstrados com o auxílio de uma aplicação de transferência de vídeo.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. Na Seção 2 são descritas as funções desenvolvidas no controlador NOX e, na Seção 3, é descrita a interface web. Na Seção 4, é descrito o comportamento do agente desenvolvido. Na Seção 5 são apresentadas as demonstrações e alguns resultados. Por fim, a Seção 6 conclui o artigo.

2. As Aplicações do NOX para Gerenciamento da Rede OpenFlow

O principal objetivo da ferramenta OMNI é permitir o controle e o gerenciamento de uma rede OpenFlow. As funções de controle e gerenciamento são desempenhadas por aplicações que executam sobre o NOX, que é um controlador que implementa o protocolo OpenFlow e, assim, age como uma interface entre as aplicações de controle e a rede.

A ferramenta proposta se baseia no conceito de serviços web, permitindo, assim,

o controle e o gerenciamento remotos. Logo, uma das aplicações NOX que compõe a ferramenta é um provedor de serviços web que se comunica com as demais aplicações e exporta as interfaces dessas aplicações como serviços web. Foi desenvolvido também um servidor que disponibiliza uma interface web que apresenta as funções de controle de forma amigável para o administrador da rede. Esse servidor se comunica com o NOX através da aplicação provedora dos serviços web para fazer requisições de serviços na rede. Outra aplicação que acessa os serviços web providos pelo NOX são os agentes responsáveis pelo controle autônomo da rede. Um exemplo de uso da ferramenta proposta é apresentado na Figura 1. Essa figura ilustra uma rede OpenFlow genérica hospedando duas redes virtuais, cada uma como seu respectivo controlador. Cada nó da rede hospeda um agente da OMNI, os quais interagem entre si. É apresentado também o conjunto de aplicações para o NOX propostas e desenvolvidas pelos autores, assim como as aplicações estendidas e as aplicações apenas modificadas e adaptadas.

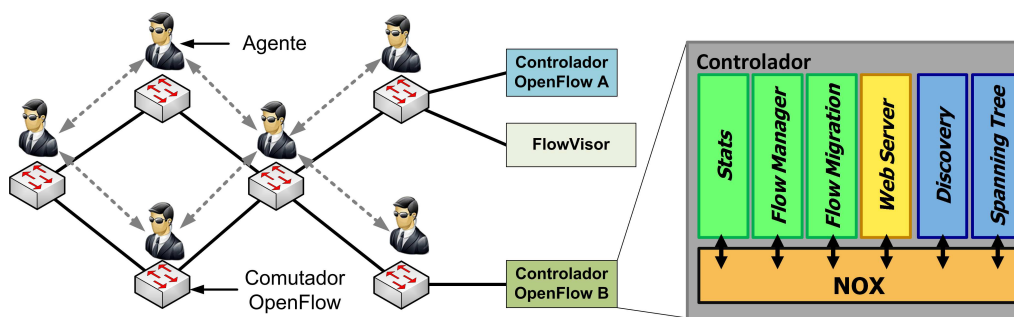


Figura 1. Esquema com a utilização da ferramenta OMNI em uma rede OpenFlow com duas redes virtuais.

Para desenvolver a interface de gerenciamento, foram criadas aplicações para o NOX, além de terem sido estendidas algumas das aplicações já existentes, todas escritas em linguagem Python. As aplicações passivas, que executam o sensoriamento da rede, incluem o monitoramento dos fluxos e dos comutadores, através da aplicação *Stats*, e a descoberta de topologia, através da aplicação *Discovery*. As aplicações ativas, que atuam na rede, incluem a *Spanning Tree*, que calcula a árvore de cobertura da rede, a *Flow Manager*, que faz o gerenciamento de fluxos, e a *Flow Migration*, que realiza a migração de fluxos. Todas essas aplicações foram criadas ou modificadas para fornecerem uma saída em *eXtensible Markup Language* (XML) como resultado da ação requisitada. Optou-se pelo uso do XML para que os dados gerados por uma aplicação fossem interpretados de forma simples por outras aplicações, pelos agentes e pelo servidor da interface gráfica. Existe ainda a aplicação *Web Server* que disponibiliza um serviço para fazer chamadas a todas as aplicações de gerenciamento.

A aplicação *Flow Migration* é inovadora. Ela foi proposta e desenvolvida pelos autores e permite a migração de fluxos sem perdas, uma vez que, por padrão, essa funcionalidade não é implementada pelo NOX. A aplicação *Flow Manager* também foi proposta e desenvolvida pelos autores. Ela é uma simples interface para chamar as funções para criação e remoção de fluxos disponibilizadas pelo NOX. As aplicações *Stats* e *Web Server* se basearam em um código disponibilizado pelo NOX, mas receberam extensões de funcionalidades significativas. Por fim, as aplicações *Discovery*, disponibilizada pelo NOX, e *Spanning Tree*, obtida no sítio do OpenFlow, foram modificadas para funcionar com diferentes dispositivos físicos, como computadores e roteadores Linksys, e para fornecerem uma saída em XML. As aplicações *Flow Migration*, *Stats* e *Web Server* são descritas com detalhes a seguir.

2.1. A Aplicação *Flow Migration*

A aplicação *Flow Migration* realiza a migração de fluxos entre comutadores de uma rede OpenFlow. O objetivo da migração é fazer com que um fluxo que esteja passando por uma determinada sequência de comutadores seja reconfigurado para passar por outra sequência de comutadores. Como o controle da rede é centralizado e o controlador possui acesso às tabelas de fluxos de todos os comutadores, a migração consiste na reconfiguração das tabelas de fluxos dos comutadores. É importante ressaltar que pacotes não são perdidos durante a migração de fluxos, porque o algoritmo de reconfiguração de tabelas proposto estabelece uma determinada ordem para executar as reconfigurações dos comutadores que evita as perdas de pacotes.

Primeiramente, o algoritmo identifica o caminho atual do fluxo na rede. Em seguida, verifica se há conectividade direta entre todos os comutadores definidos como integrantes do novo caminho do fluxo. O novo caminho é estabelecido caso haja conectividade direta entre os comutadores informados. Caso contrário, o caminho entre os comutadores que não são diretamente ligados é calculado utilizando o algoritmo de Dijkstra, de modo a ser estabelecido um caminho completo com o menor número de saltos. Com base no caminho calculado, o fluxo é adicionado aos comutadores do novo caminho a partir do comutador de saída do fluxo até o de entrada. Nesse último comutador, o controlador, ao invés de adicionar um novo fluxo, modifica o fluxo já definido, de modo que a antiga porta de saída seja modificada para uma nova porta que redireciona o fluxo ao restante do caminho já configurado. Assim, esse procedimento evita a perda de pacotes.

2.2. A Aplicação *Stats*

A aplicação *Stats* é responsável pela obtenção de estatísticas dos comutadores OpenFlow e pela conversão dessas informações para XML, para que elas possam ser disponibilizadas através do serviço web. Essa aplicação envia pedidos para cada um dos comutadores OpenFlow, que respondem com um relatório contendo a sua descrição, suas estatísticas e as estatísticas de cada uma de suas tabelas de fluxos.

A aplicação *Stats* é uma extensão da aplicação *Switchstats* disponibilizada pelo NOX. A aplicação *Switchstats* faz requisições aos comutadores para fornecer a descrição dos comutadores, o número de pacotes recebidos e perdidos por porta do comutador e também por tabela do comutador. Contudo, essa aplicação não disponibiliza informações sobre os fluxos, pois o NOX não implementava o envio das requisições de estatísticas de fluxos para os comutadores. Assim, a aplicação e o NOX foram estendidos para requisitarem as informações sobre cada um dos fluxos instanciados e também sobre os fluxos agregados, tais como: a descrição de cada fluxo, o número de pacotes encaminhados, o número de pacotes perdidos e o tempo de duração do fluxo. Em relação aos fluxos agregados, são requisitados o número de pacotes e de bytes encaminhados por todos os fluxos de um comutador. Esses dados adicionais são fundamentais para o gerenciamento e para dar suporte à migração de fluxos.

2.3. A Aplicação *Web Server*

A versão original do NOX fornece um arcabouço para o desenvolvimento de um servidor web que interage com as demais aplicações. A partir desse arcabouço, podem ser desenvolvidos recursos¹ que implementam sítios ou aplicações sobre o protocolo HTTP. A ferramenta OMNI implementa a aplicação *Web Server* como um recurso nesse arcabouço

¹Nomenclatura usada pelo arcabouço do NOX.

para prover serviços web de controle da rede. Essa aplicação recebe chamadas de funções sob a forma de URL, as trata e retorna o resultado em mensagens XML. A mensagem XML retornada por cada função pode ser tratada e interpretada por outras aplicações, como as aplicações de interface com o usuário ou de controle autônomo da rede.

A aplicação *Web Server* interage diretamente com as demais aplicações através de funções internas do próprio controlador NOX. Isso permite que a aplicação acesse dados disponibilizados por qualquer outra aplicação, como também faça chamadas a rotinas de outras aplicações a qualquer momento. Assim, uma chamada remota à aplicação *Web Server* por uma URL é convertida por tal aplicação em uma chamada de função de outra aplicação que esteja em execução sobre o NOX.

3. A Interface Web

A interface web foi desenvolvida para permitir o acesso amigável do administrador da rede ao monitoramento dos computadores e para permitir a execução de funções básicas de gerenciamento. A interface web de controle da rede OpenFlow foi criada como um cliente dos serviços web fornecidos pelas aplicações do NOX. A Figura 2(a) ilustra a página inicial da interface e a Figura 2(b) a comunicação entre o servidor de interface web, o controlador NOX e o administrador da rede.

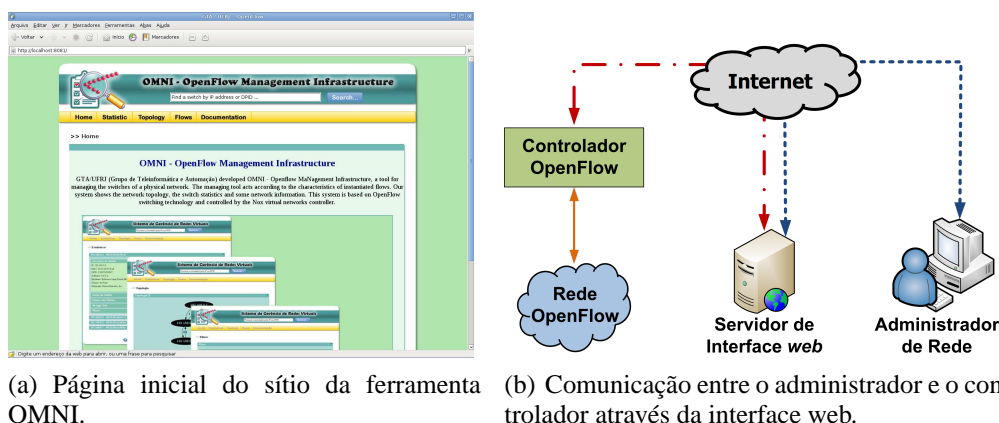


Figura 2. Interface gráfica com acesso remoto da ferramenta OMNI.

O aplicativo que implementa a interface web executa tanto um cliente quanto um servidor HTTP. O fluxo de dados nesse aplicativo ocorre da seguinte forma. Ao entrar no sítio provido pela interface web o administrador tem acesso a um menu com todas as funções gerenciais. Ao acessar uma opção que dependa de dados da rede OpenFlow, como a opção de estatísticas dos comutadores, o aplicativo da interface web envia uma requisição HTTP ao servidor web do NOX, que trata a requisição e retorna uma mensagem XML. Essa mensagem é recebida pela aplicação de interface web que processa os dados para gerar a visualização. Conforme o administrador interage com a página e executa funções de controle sobre a rede, esses comandos são convertidos em requisições URLs e são enviados para o controlador. Então, o controlador encaminha as requisições para a aplicação pertinente e retorna à interface web a confirmação, ou erro, da execução da função, também sob a forma de uma mensagem XML.

4. O Sistema Multiagentes

Com base no serviço web disponibilizado através do NOX com a aplicação *Web Server*, é possível desenvolver mecanismos de controle autônomos usando uma plataforma de agentes, tal como a plataforma Ginkgo [Ginkgo Networks, 2008] utilizada na

OMNI. Para exemplificar essa funcionalidade, foi especificado um sistema multiagentes que permite a detecção de falhas no encaminhamento em um determinado nó e, após a detecção, o agente orquestra a migração dos fluxos de todas as redes virtuais que estão utilizando tal nó físico. O agente desenvolvido executa em algum nó da rede ou em um *middle box*, caso o equipamento comercial não dê suporte para o agente. O agente consulta o controlador para saber a taxa de pacotes que está sendo perdida pelo nó que ele monitora e armazena a informação em sua base de conhecimento. O agente então se comunica com os demais agentes presentes na rede, troca a informação armazenada e, caso conclua que algum dos enlaces está com a taxa de perdas acima de um limiar predefinido acima dos demais enlaces, ele envia uma ordem para o controlador através do serviço web para que todos os fluxos daquele nó sejam migrados. É importante observar que o agente é capaz de se comunicar com todos os controladores associados àquele comutador. Para tanto, ele consulta o FlowVisor, para saber os controladores associados ao comutador.

5. Avaliação da Ferramenta e Demonstradores

O funcionamento da OMNI é demonstrado através de uma rede OpenFlow criada com o uso de técnicas de virtualização. Em uma mesma máquina física são criados cinco comutadores OpenFlow que executam dentro de máquinas virtuais. O controlador é executado em um computador portátil, assim como a máquina geradora e receptora de pacotes². Um teste remoto também é realizado, mostrando que é possível gerenciar a rede que se encontra no Grupo de Teleinformática e Automação (GTA), no Rio de Janeiro, à distância e com a mesma eficiência. Na demonstração, todas as funções disponíveis na interface web, tais como a visualização da topologia e da *spanning tree*, a obtenção de estatísticas por comutador e por fluxo e a instanciação, remoção e migração de fluxos, são demonstradas. Além disso, também é demonstrada a ação dos agentes na rede.

A OMNI foi avaliada para verificar o tempo de resposta e a correção das suas funções. A seguir, são descritos alguns resultados da execução dos testes de migração e atuação do agente na rede do GTA. Resultados semelhantes são apresentados durante a demonstração, com o auxílio de uma aplicação de vídeo para mostrar variações de vazão na rede. Para realizar os testes, foi montada uma rede OpenFlow com computadores pessoais. Essa rede possui quatro comutadores OpenFlow, um FlowVisor e um controlador NOX, como mostrado na Figura 3. Os comutadores OpenFlow e o FlowVisor são executados máquinas com processador Intel Core 2 Duo com 2 GB de memória. O controlador é executado em uma máquina com processador Intel I7 com 4 GB de memória. Nessa mesma máquina, também são instanciados um agente Ginkgo para cada um dos comutadores OpenFlow.

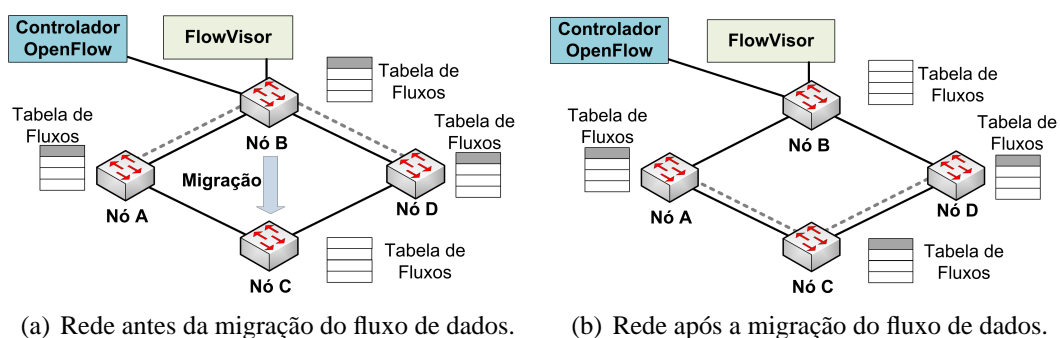
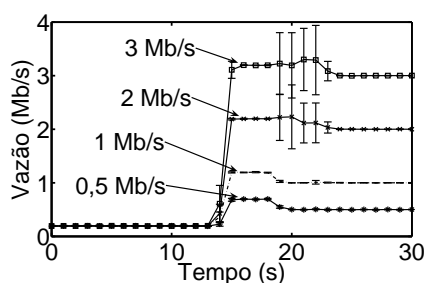


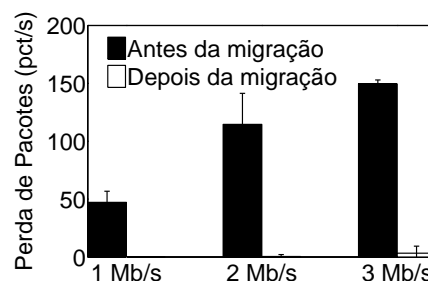
Figura 3. Migração do fluxo que passa por A-B-D para o caminho A-C-D.

²A demonstração apenas com equipamentos físicos requer um mínimo de quatro máquinas físicas.

O primeiro teste mostra a migração de um fluxo que passa pelo caminho formado pelos comutadores A, B e D para o caminho formado pelos comutadores A, C e D. A taxa do fluxo foi variada entre 0,5 e 3 Mb/s. Nesse cenário, o enlace A-B está limitado pelo FlowVisor em uma taxa de 200 kb/s, enquanto que o enlace A-C está limitado a 100 Mb/s. Assim, pelo caminho original, existem perdas de pacotes para taxas superiores a 200 kb/s. Após a migração para o enlace com maior banda, não existem mais perdas de pacotes. Isso é visualizado na demonstração através da transmissão de um vídeo entre a fonte, ligada ao comutador A, e o destino, ligado ao comutador D. A Figura 4(a) mostra o resultado desse teste, que foi bem sucedido e não apresentou perdas de pacotes devido à migração. A migração foi executada em um tempo médio de $419 \mu s$ com um desvio padrão de $210 \mu s$, o que mostra o baixo tempo de resposta dessa funcionalidade na OMNI. Como se pode observar, após a migração para o enlace com maior capacidade, a taxa de transmissão se estabilizou no valor da taxa nominal de envio.



(a) Vazão do fluxo de dados após a migração manual do fluxo selecionado.



(b) Perdas de pacotes antes e depois do disparo da ação do agente.

Figura 4. Resultados dos testes de migração de fluxo utilizando a chamada manual e a chamada pelo agente.

O segundo teste mostra a migração pelo sistema multiagentes. Nesse caso, é variada a taxa de transmissão do fluxo e mede-se a perda de pacotes até que o agente dispare autonomamente a migração do fluxo. O cenário utilizado é o mesmo do teste com a chamada manual da migração. Os resultados desse teste estão na Figura 4(b), que mostra que o agente consegue detectar o enlace sobrecarregado corretamente e migra o fluxo de forma a evitar ou reduzir a taxa de perdas de pacotes para valores próximos de zero. Como o agente observa a taxa de perdas de pacotes no enlace e assume um limiar de perda de 20 pacotes/s maior que nos enlaces observados pelos outros agentes, então não houve variação do tempo para o agente iniciar a migração independente da taxa de envio. O agente desenvolvido faz observações na rede com intervalos de 10 s, e assim, teve um tempo médio para disparar a migração de 29,4 s. Esse tempo pode ser reduzido ao configurar medições mais frequentes pelo agente na rede. Na demonstração ao vivo, são utilizados vídeos com taxas diferentes, de tal forma que o tempo para disparar as migrações irá depender da qualidade do vídeo e da variação ao longo do tempo da taxa do vídeo.

6. Conclusão

A ferramenta OMNI disponibiliza para os administradores de redes uma interface amigável para controle e gerenciamento de redes OpenFlow, sejam elas de produção ou de teste. A OMNI conta com um conjunto de aplicações no controlador NOX, uma interface de usuário via web, para acessar as funções disponibilizadas, além de uma plataforma multiagentes para realizar ações de gerenciamento de forma autônoma. Por ter sido desenvolvida de forma modular, a OMNI pode ser expandida para executar novas funções com um baixo nível de complexidade. A decisão de usar um modelo modular também

permite o isolamento entre componentes críticos. Outra consideração importante é que o uso de uma arquitetura orientada a serviços provê uma interface de obtenção de dados que pode ser usada por diversos clientes, como outros agentes, interfaces web amigáveis ou, até mesmo, aplicações para dispositivos móveis de controle da rede. Dessa forma, como um dos trabalhos futuros pretende-se desenvolver um cliente para dispositivos móveis, como celulares, que permite acompanhar em tempo real as informações de uma rede OpenFlow e executar o seu controle remoto.

A ferramenta pode ser obtida em <http://www.gta.ufrj.br/omni>. Nesse sítio é possível obter também o manual do usuário, que detalha os procedimentos de instalação e uso da ferramenta, a documentação, que permite compreender o projeto de *software* e obter mais detalhes sobre o código da ferramenta, além de outras informações úteis.

7. Agradecimentos

Agradecemos a Callebe Trindade Gomes e a Marcelo Duffles Donato Moreira pelas contribuições no desenvolvimento da ferramenta. Este trabalho foi apoiado por recursos da FINEP, FAPERJ, CAPES, CNPq, FUJB e FUNTTEL.

Referências

- Cai, Z., Cox, A. L. e Ng, T. S. E. (2010). Maestro: A system for scalable openflow control. Relatório técnico, Rice University Technical Report.
- Fernandes, N. C., Moreira, M. D. D., Moraes, I. M., Ferraz, L. H. G., Couto, R. S., Carvalho, H. E. T., Campista, M. E. M., Costa, L. H. M. K. e Duarte, O. C. M. B. (2010). Virtual networks: Isolation, performance, and trends. *Annals of Telecommunication*, páginas 1–17.
- Ginkgo Networks (2008). Ginkgo distributed network piloting system. Relatório técnico, Ginkgo Networks.
- Gude, N., Koponen, T., Pettit, J., Pfaff, B., Casado, M., McKeown, N. e Shenker, S. (2008). NOX: Towards an operating system for networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 38(3):105–110.
- Koponen, T., Casado, M., Gude, N., Stribling, J., Poutievski, L., Zhu, M., Ramanathan, R., Iwata, Y., Inoue, H., Hama, T. e Shenker, S. (2010). Onix: A distributed control platform for large-scale production networks. Em *Operating Systems Design and Implementation (OSDI)*.
- McKeown, N., Anderson, T., Balakrishnan, H., Parulkar, G., Peterson, L., Rexford, J., S. e Turner, J. (2008). OpenFlow: Enabling innovation in campus networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 38(2):69–74.
- Sherwood, R., Chan, M., Covington, A., Gibb, G., Flajslik, M., Handigol, N., Huang, T.-Y., Kazemian, P., Kobayashi, M., Naous, J., Seetharaman, S., Underhill, D., Yabe, T., Yap, K.-K., Yiakoumis, Y., Zeng, H., Appenzeller, G., Johari, R., McKeown, N. e Parulkar, G. (2010). Carving research slices out of your production networks with OpenFlow. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 40(1):129–130.
- SNAC (Acessado em abril de 2011). *Simple Network Access Control (SNAC)*. <http://www.openflow.org/wp/snac/>.