

Uma Rede de Testes Interuniversitária com Técnicas de Virtualização Híbridas*

Diogo M. F. Mattos, Lucas Henrique Mauricio, Leonardo P. Cardoso, Igor D. Alvarenga, Lino Henrique G. Ferraz e Otto Carlos M. B. Duarte

¹Grupo de Teleinformática e Automação
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)
Rio de Janeiro – RJ – Brasil

Resumo. A validação de propostas para a Internet do Futuro tem como principal desafio a realização de testes de larga escala em condições realísticas. Experimentos de propostas de novas arquiteturas geralmente ficam restritos a simulações ou ambientes controlados como em redes locais. Este artigo apresenta uma rede de testes interuniversitária com suporte a diferentes técnicas de virtualização. A rede de testes tem como objetivo a execução de experimentos de grande escala e em condições reais de tráfego, pois é constituída de ilhas em universidades geograficamente distribuídas. Os elementos de rede propostos incluem recentes funcionalidades tecnológicas e de encaminhamento de pacotes em redes virtuais, como o suporte a NetFPGA e virtualização de dispositivos de entrada e saída com acesso direto ao hardware. A demonstração da rede de testes inclui a apresentação da topologia da rede e das soluções tecnológicas usadas para interconectar as ilhas existentes em universidades brasileiras.

Abstract. The main challenge of validating Future Internet proposals is the realization of large-scale tests in realistic conditions. Experiments of new architectures proposals are usually restricted to controlled environments, such as simulations or on local area networks. This paper presents interuniversity experimental facility which supports different virtualization techniques. The proposed experimental facility aims to execute large-scale experiments through real traffic conditions, since it consists of islands of geographically distributed universities. The proposed network elements feature recent enhancements into hardware and into packet forwarding in virtual networks, such as support for NetFPGA cards, and I/O virtualization with hardware direct access. The experimental facility demonstration includes presenting network topology and technological solutions that interconnect the existing islands of Brazilian universities.

1. Introdução

A virtualização de redes de computadores é fundamental para a experimentação de novas arquiteturas para a Internet e também é uma possível solução pluralista para uma Internet do Futuro [Moreira et al. 2009]. Diferentes técnicas de virtualização foram propostas, mas as ferramentas de virtualização de redes Xen e OpenFlow são as de maior sucesso. O Xen [Egi et al. 2008] é uma ferramenta de virtualização dos recursos de computadores pessoais que permite a criação de roteadores virtuais de baixo custo [Egi et al. 2008] que fazem parte de redes virtuais isoladas. O OpenFlow [McKeown et al. 2008] permite a virtualização de fluxos Ethernet de forma isolada. O objetivo inicial é a substituição dos comutadores convencionais por comutadores

*Este trabalho foi realizado com recursos da FINEP, CNPq, CTIC, FAPERJ, CAPES, e FUNTTEL.

OpenFlow para a criação de redes virtuais experimentais em *campi* universitários, para a realização de teste em larga escala com tráfego real e sem que a rede de produção sofra interferência da rede virtual de testes.

O VNEXT [Moraes et al. 2011] é uma ferramenta de gerenciamento para redes de teste baseadas em Xen que oferece uma interface simples e amigável. A ferramenta OMNI [Mattos et al. 2011b] permite o controle e o gerenciamento de redes OpenFlow através de uma interface web, o que permite ao administrador da rede controlá-la remotamente. Além de controlar as redes, faz-se necessário aumentar a escala delas através da interconexão de diversas máquinas espalhadas geograficamente para testar e validar novas propostas e soluções para a Internet do Futuro.

Este artigo propõe e descreve uma rede de testes e algumas facilidades para o gerenciamento e interligação de redes virtuais baseadas em Xen e OpenFlow. A rede de teste é constituída por elementos de rede de baixo custo compostos por computadores pessoais com as ferramentas OMNI e VNEXT para a virtualização de redes. Os elementos de redes são geograficamente distribuídos em ilhas dentro de *campi* universitários e interligados através da Internet. A rede de testes visa a criação, destruição e migração tanto de roteadores virtuais presentes na plataforma Xen assim como de fluxos na plataforma OpenFlow. A rede de testes usa a interface de programação de aplicação (API) OpenFlow para interconectar as ilhas usando redes virtuais privadas (VPNs) e Capsulator. São, também, descritos suportes a recentes tecnologias avançadas como o uso da NetFPGA e de *hardware* com acesso direto e virtualização de dispositivos de entrada e saída.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 expõe os trabalhos relacionados. A Seção 3 apresenta a arquitetura e descreve as tecnologias usadas para a interligação das ilhas universitárias. A Seção 4 descreve a demonstração da rede de testes. Por fim a Seção 5 conclui o artigo.

2. Trabalhos Relacionados

A plataforma de virtualização Xen [Egi et al. 2008], uma plataforma de código aberto que permite a virtualização de sistemas operacionais, é utilizada para criar máquinas virtuais que se comportam como roteadores virtuais formando redes virtuais. Cada máquina virtual possui sua própria pilha de protocolos, assim como as suas tabelas de encaminhamento isoladas. McKeown *et al.* propõem o OpenFlow, uma plataforma de virtualização de fluxos [McKeown et al. 2008]. A ideia básica do OpenFlow é criar um ambiente de teste dentro dos *campi* universitários com características de tráfego real que pudesse isolar o tráfego da rede de produção convencional do tráfego de teste. No OpenFlow, a técnica de virtualização é a nível de fluxo que é definido como uma sequência de pacotes com características semelhantes, como endereços IP de origem ou de destino iguais, mesma porta TCP, entre outras.

Moreira *et al.* [Moreira et al. 2009] propõem o uso da virtualização de redes para a criação de uma rede pluralista, sobrecamada, com o objetivo de testar propostas para a Internet do Futuro. As ferramentas Xen e OpenFlow são adequadas a essa proposta, porém a gerência de redes criadas por elas não é facilitada. Desta maneira, Mattos *et al.* propõem o OMNI que é uma ferramenta de gerência de redes OpenFlow capaz de oferecer diversas funcionalidades de controle além de ser de fácil utilização [Mattos et al. 2011b]. Com o OMNI é possível realizar a criação e a deleção de fluxos, além da migração dos mesmos sem que haja perda de pacotes. Da mesma forma, com o objetivo de facilitar a gerência, Moraes *et al.* [Moraes et al. 2011] propõem o VNEXT que oferece ao administrador de

redes virtuais baseadas em Xen uma interface amigável de controle. Com o VNEXT é possível criar, destruir e migrar roteadores virtuais, além de criar redes virtuais.

O PlanetLab¹ é uma rede de testes de escala mundial. Diversos nós distribuídos pelo mundo são conectados através da Internet e novas aplicações podem ser testadas em larga escala com características próximas a um ambiente real. As aplicações executam em uma sobrecamada em cima da Internet e a técnica de virtualização é utilizada para que diversas aplicações executem e sejam testadas em paralelo, de forma segura e independente. Já o Projeto GENI (*Global Environment for Network Innovations*)² é um projeto financiado pela NSF (*National Science Foundation*), que propõe um laboratório de experimentos para a Internet do Futuro e, portanto, tem como objetivos criar oportunidades para entender, inovar e transformar redes globais e suas interações com a sociedade. O Projeto GENI é bem ambicioso, pois requer uma nova infraestrutura de larga escala para que propostas de novos protocolos que substituam o núcleo da atual Internet possam ser testadas. É um consenso dos pesquisadores da área de redes que é difícil desenvolver, testar e implantar inovações no núcleo da Internet e, ainda, pode gerar falhas em diversos serviços já bem estabelecidos [Moreira et al. 2009, McKeown et al. 2008]. O Projeto OFELIA (*Open-Flow in Europe Linking Infrastructure and Applications*) [Köpsel and Woesner 2011] é uma plataforma de testes europeia constituída de pequenas ilhas que utiliza uma rede em topologia estrela com suporte a OpenFlow, para permitir interconexão e, conseqüente, inovação e teste de novas soluções para a Internet.

Este artigo propõe e descreve uma rede de teste geograficamente distribuída em ilhas localizadas em *campi* universitários. As ilhas contêm plataformas de redes virtuais baseadas nas ferramentas OMNI e VNEXT, integradas em um único computador pessoal. A proposta integra em uma mesma rede de teste funcionalidades de redes virtuais baseadas em Xen, através da ferramenta VNEXT, e de redes de teste baseadas na tecnologia OpenFlow, através da ferramenta OMNI, provendo maior flexibilidade. A rede de testes proposta é a base de uma rede de teste de grande porte que permita a experimentação de novos protocolos em plataformas de virtualização Xen ou OpenFlow.

3. A Arquitetura Proposta

A rede de testes proposta baseia-se na virtualização de redes, seja usando o hipervisor Xen [Egi et al. 2008] para criar roteadores virtuais, seja usando a interface de programação de aplicação OpenFlow [McKeown et al. 2008] para virtualizar fluxos.

O objetivo principal da rede de testes proposta é a criação de um ambiente de experimentação de medidas e de avaliação de desempenho em larga escala, geograficamente distribuído em universidades brasileiras. Assim, a rede de testes provê funcionalidades para que pesquisadores de diferentes universidades realizem experimentos de uma forma simples e segura em companhia de tráfego da Internet. Deve ser ressaltado que uma rede de teste para experimentação em ambiente real de protocolos que se propõem a substituir o núcleo da Internet requer a substituição do perfil de protocolos TCP/IP. Assim, para prover esta facilidade é necessário que os atuais roteadores da Internet sejam substituídos por roteadores virtualizados que permitam executar os protocolos convencionais do perfil TCP/IP e, concomitantemente, executar o “novo” perfil de protocolos proposto. Uma rede de teste com essas facilidades é de outra ordem de grandeza de custo de equipamentos e operacional. Na rede de teste proposta, a interconexão das ilhas (ou dos nós)

¹<http://www.planet-lab.org/>

²<http://www.geni.net/>

participantes é realizada usando-se os protocolos da atual Internet.

Muitas universidades se servem de *firewalls* e NATs (*Network Address Translation*) que dificultam o acesso externo. Assim, optou-se, neste início de operação da rede de teste, por uma topologia lógica em estrela com servidor central acessado por diversos clientes, conforme mostra a Figura 1(a). O servidor e os clientes são conectados através de VPNs (*Virtual Private Network*). Esta abordagem tem como principal vantagem a simplificação da configuração da interconexão entre os diversos nós, porque os clientes podem estar atrás de *firewalls* e NATs enquanto a única restrição é que o servidor tenha um IP global, acessível pela Internet.

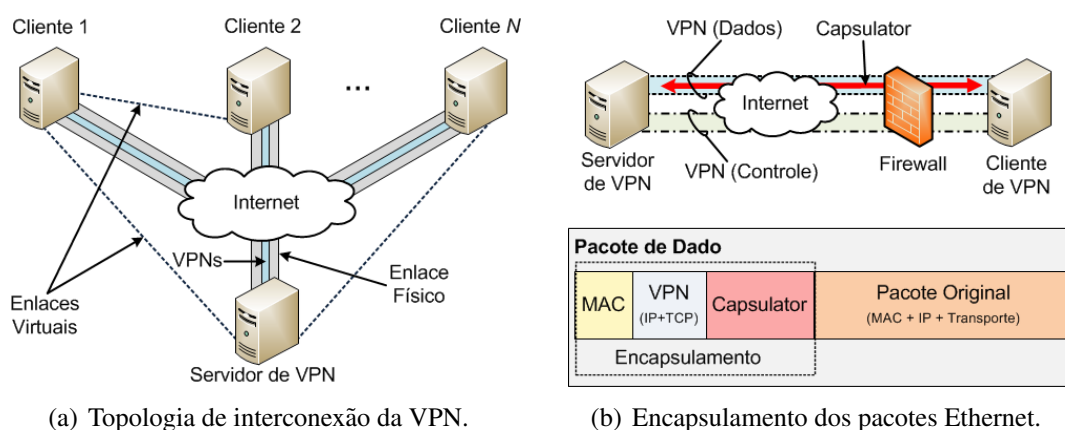


Figura 1. Interconexão dos nós da rede de testes através da Internet, passando por *firewalls*.

A arquitetura da rede de testes proposta é dividida em módulos, como mostrado na Figura 2. A rede de teste é composta pelos seguintes módulos: de conexão, de comutação e roteamento, de controle, OpenFlow e Xen. O administrador controla a rede através de uma interface Web unificada que centraliza as informações e as operações a serem realizadas por todos os nós da rede, podendo ser acessada por qualquer nó participante da rede de teste.

O módulo de conexão interliga os nós participantes da rede de testes através de túneis através da Internet. O nó servidor, central, executa um servidor de VPN, que cria duas VPNs isoladas, sendo uma para dados e outra para controle. A VPN além de permitir o acesso através de *firewalls* e NATs cria uma abstração na qual todos os nós agem como se pertencessem a uma única sub-rede IP. Para que todas as ilhas ou nós universitários façam parte de uma mesma rede OpenFlow é necessário que todos os nós estejam em um mesmo domínio na camada de enlace Ethernet. Assim, como proposto por Yap *et al.*, a ferramenta Capsulator foi usada para gerar a abstração de um enlace Ethernet entre dois nós, através do encapsulamento dos quadros Ethernet sobre uma rede IP [Yap et al. 2009], como mostrado na Figura 1(b). Os enlaces virtuais definidos na rede de testes proposta são configurados através da comunicação de dois nós pelo Capsulator. Assim, a VPN gera a conectividade direta entre os nós na camada IP, atravessando *firewalls* e NATs, e o Capsulator garante a criação de enlaces virtuais na camada Ethernet.

O módulo de comutação e roteamento é o módulo mais heterogêneo da rede de testes. A ideia básica desse módulo é realizar a comutação de pacotes entre máquina virtuais Xen instanciadas na plataforma. O funcionamento do módulo de comutação e roteamento baseia-se no Open vSwitch [Pfaff et al. 2009], que é comutador por *software*.

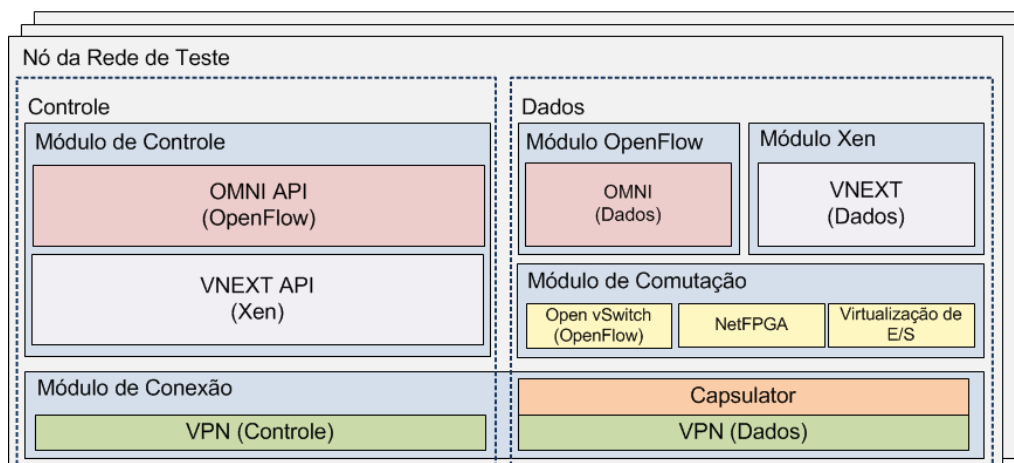


Figura 2. Arquitetura dos nós da rede de testes. Os nós se comunicam com um nó central através de duas VPNs, uma de dados e outra de controle.

As interfaces de rede virtuais das máquinas virtuais são conectadas a um comutador por software e, dependendo da rede virtual a que pertença cada interface, esta é marcada com um identificador de VLAN (*Virtual Local Area Network*). O identificador de VLAN é único para cada domínio Ethernet virtual, seja um enlace virtual ou uma rede Ethernet virtual. Ao adicionar a marcação da rede virtual na interface conectada ao comutador Open vSwitch, todos os quadros enviados por essa interface são marcados com o identificador correspondente e, então, enviado para os nós físicos de destino. Os quadros marcados com o identificador de VLAN, ao chegarem ao destino, são somente entregues às interfaces virtuais que tenham o identificador correspondente, ou seja, pertençam a mesma rede virtual.

Outras possibilidades de implementação do módulo de comutação e roteamento são através das modernas técnicas de acesso direto ao *hardware* de rede pelas máquinas virtuais, como o PCI-SIG *Single Root I/O Virtualization* (SR-IOV) [Division 2011], e através do uso de placas de rede programáveis, como a NetFPGA (*Network Field Programmable Array*). Dessa forma, a rede de teste reúne ilhas com nós que possuem recursos de virtualização de operações de E/S (Entrada/Saída) assistida por *hardware*. Com a tecnologia SR-IOV, um único dispositivo PCI *Express* (PCIe) apresenta-se como múltiplos dispositivos virtuais. Cada dispositivo virtual é dedicado a uma máquina virtual que terá acesso direto à instância do dispositivo virtual no *hardware*. Logo, o sistema evita mudanças de contexto, controle e classificação de tráfego. Além disso, evitam-se cópias extras de memória em relação ao uso de comutadores por *software* para a multiplexação de acesso aos recursos de E/S.

Outro recurso disponível são as placas NetFPGA programadas com o OpenFlow para a comutação de pacotes por *hardware* na rede de teste, atingindo taxas de até 1 Gb/s. A rede de testes conta com uma ilha composta por máquinas em que estão instaladas placas NetFPGA programadas com o OpenFlow. Desta maneira, a rede de testes permite a realização de experimentos remotos que se valham das técnicas de comutação e roteamento virtuais assistidas por *hardware*, seja através de placas de rede que permitem o acesso direto ao *hardware* (SR-IOV) ou através do uso de placas NetFPGA.

O módulo de controle se divide em duas interfaces de controle distintas. A primeira é a interface de controle dos nós OpenFlow que é realizado pelo controlador NOX.

Sobre o controlador NOX executa o arcabouço OMNI (*OpenFlow MaNagement Infrast-structure*) de controle para redes OpenFlow [Mattos et al. 2011b]. A segunda interface de controle da rede de testes é o controle dos nós Xen, que é realizado pelo arcabouço VNEXT (*Virtual NEtwork management for Xen-based Testbeds*), que permite o gerenciamento das máquinas virtuais Xen de forma simplificada e centralizada.

O módulo OpenFlow baseia-se na ferramenta OMNI. A organização do módulo reúne um comutador por software Open vSwitch, que implementa a API OpenFlow e realiza a comutação entre máquinas virtuais Xen. O comutador por software reúne, também, as interfaces virtuais de comunicação entre os nós da plataforma, fazendo com que a rede que interliga todos os nós da rede de testes também seja uma rede OpenFlow. O controle do OpenFlow é realizado pelo NOX.

O módulo Xen é composto pelo hipervisor Xen [Egi et al. 2008] e pela ferramenta de gerenciamento VNEXT [Moraes et al. 2011]. O VNEXT exporta uma interface de programação de aplicação (API) que permite à rede de testes controlar e monitorar as máquinas virtuais Xen.

Tendo em vista os módulos da rede de testes, a implantação de uma rede de testes interuniversitária ocorre nas seguintes etapas. A primeira é a criação de uma VPN. Em seguida, há a criação dos enlaces virtuais com a ferramenta Capsulator e, por fim, a execução de experimentos através da instanciação de máquinas virtuais Xen e definição de experimentos sobre a rede OpenFlow implantada.

4. Demonstração

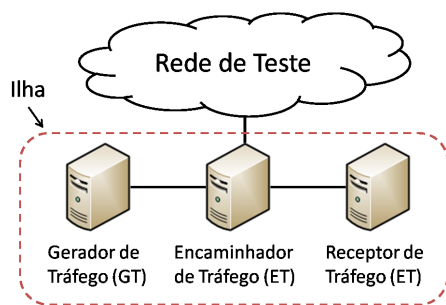
O funcionamento da rede de testes proposta é demonstrado através da interconexão do nó³ a ser criado nas instalações do salão de ferramenta do SBRC com o nó central, localizado no Grupo de Teleinformática e Automação (GTA), no Rio de Janeiro. O nó presente no GTA é responsável por centralizar as requisições de todos os nós, além de ser responsável pelo controle de toda a rede. A demonstração mostrará que é possível acessar todas as funcionalidades de controle presentes na interface web, garantindo a execução de testes remotos. A demonstração inclui, também, a transmissão de um vídeo pela rede de testes, na qual o fluxo de transmissão é migrado entre universidades, sem que haja a sua interrupção.

Um possível experimento a ser realizado na rede de testes consiste em comparar o desempenho do encaminhamento de pacotes executado por uma máquina virtual Xen com o executado por uma máquina na qual a virtualização de E/S seja assistida por *hardware*. O cenário do experimento é uma ilha de três computadores⁴ associada à rede de testes. Os computadores da ilha desempenham as funções de gerador de tráfego (GT), de receptor de tráfego (RT) e de encaminhador de tráfego (ET), conforme mostrado na Figura 3(a).

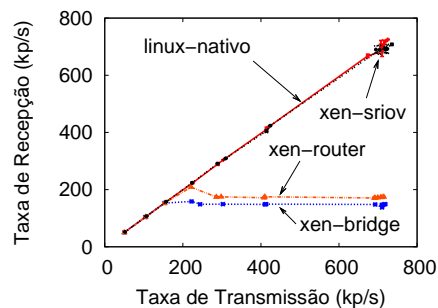
O experimento compara o encaminhamento do Linux nativo, com o Xen operando em modo *bridge*, em modo *router* e com virtualização de E/S assistida por *hardware*. No modo *bridge*, os pacotes são comutados entre as interfaces físicas e virtuais. No modo *router*, criam-se tabelas de roteamento para rotear os pacotes entre interfaces físicas e

³A demonstração no SBRC requer um computador com acesso à Internet para ser configurado com os *softwares* da rede de teste.

⁴O gerador e o receptor são servidores Intel equipados com dois processadores Xeon Quad-Core 2,93 GHz e 48 GB de memória RAM. O encaminhador de tráfego é um computador pessoal equipado processador Intel i7 Quad-Core 3,06 GHz e uma placa de rede E1G44ET, com suporte à virtualização de E/S. A versão do kernel utilizada nas máquinas físicas é a 2.6.32-5 e, nos roteadores virtuais, a 2.6.32-5-xen.



(a) Topologia do experimento.



(b) Encaminhamento de pacotes de 64 B.

Figura 3. Experimento de encaminhamento de pacotes em uma rede com roteadores virtuais Xen, com virtualização de E/S assistida por *hardware*.

virtuais. Finalmente, com a virtualização de dispositivos de E/S assistida por *hardware*, cada roteador virtual tem acesso direto a dispositivos de rede virtuais, que são criados por dispositivos de rede físicos de acordo com o padrão SR-IOV. A Figura 3(b) mostra que, no encaminhamento nativo do Linux, é possível atingir taxas de até 750 kp/s. As configurações do Xen nos modos *bridge* e *router* possuem desempenho limitado e não atingem taxas superiores a 150 kp/s e 200 kp/s, respectivamente, pois o roteador físico deve encaminhar todos os pacotes para os virtuais, já que o processamento dos pacotes é realizado nos roteadores virtuais. Já com virtualização de E/S com o SR-IOV, o próprio *hardware* classifica os pacotes destinados aos roteadores virtuais e estes acessam diretamente o dispositivo físico dedicado a eles, atingindo um desempenho semelhante ao Linux nativo.

5. Conclusão

A rede de testes proposta interconecta universidades geograficamente distribuídas, permitindo a criação de redes virtuais com tecnologia de virtualização OpenFlow ou Xen. Na rede de testes é possível instanciar, migrar e remover fluxos em redes OpenFlow, e redes virtuais formadas por roteadores virtuais Xen. A administração da rede é realizada por uma interface Web que permite o acesso às configurações tanto de nós OpenFlow, como de nós Xen. A interconexão das diversas instituições participantes é realizada pela Internet através de duas VPNs, uma para controle e outra para dados. São apresentados resultados de uma rede virtual experimental que utiliza técnicas de virtualização de dispositivos de entrada e saída (E/S) assistida por *hardware*. Os resultados mostram que, com o uso da virtualização de dispositivos de E/S, a taxa de encaminhamento das máquinas virtuais é próxima a do sistema nativo, sem virtualização. Algumas propostas de separação de planos com oferta de qualidade de serviço (VIPER) [Fernandes and Duarte 2011] e também de comutação flexível de fluxos (XenFlow) [Mattos et al. 2011a] na plataforma Xen são previstas como trabalhos futuros. As instruções de instalação e configuração dos nós da rede de teste proposta, assim como as informações das instituições participantes e a documentação da rede de testes, estão disponíveis no sítio <http://www.gta.ufrj.br/virtualtestbed>.

6. Agradecimentos

Agradecemos a equipe do Grupo de Teleinformática e Automação que tornou possível esta rede de testes: Hugo Carvalho, Pedro Pisa, Daniel Neto e Victor Pereira. Um

agradecimento especial para os professores e pesquisadores das universidades conectadas na rede de teste: Prof. Igor Moraes da UFF; Prof. Edmundo Madeira, e pesquisadores Carlos Senna e Milton Soares da Unicamp; Profs. Luciano Gaspary e Marinho Barcellos e pesquisador Lucas Muller da UFRGS; Prof. André dos Santos e pesquisadores Davi França, Frederico Freitas, Luiz Barbosa e Edgar Tarton da UECE; Prof. Joni Fraga e pesquisador Vinicius Moll da UFSC; Prof. Magnos Martinello e pesquisadores Sergio Charpinel da UFES; Dra. Luci Pirmez e pesquisador Renato Souza do NCE/UFRJ.

Referências

- [Division 2011] Division, I. L. A. (2011). PCI-SIG SR-IOV primer, an introduction to SR-IOV technology. Technical report, Intel.
- [Egi et al. 2008] Egi, N., Greenhalgh, A., Handley, M., Hoerd, M., Huici, F., and Mathy, L. (2008). Towards high performance virtual routers on commodity hardware. In *Proceedings of the 2008 ACM CoNEXT Conference*, pages 1–12. ACM.
- [Fernandes and Duarte 2011] Fernandes, N. and Duarte, O. (2011). Xnetmon: A network monitor for securing virtual networks. In *Communications (ICC), 2011 IEEE International Conference on*, pages 1–5. IEEE.
- [Köpsel and Woesner 2011] Köpsel, A. and Woesner, H. (2011). OFELIA—pan-european test facility for openflow experimentation. *Towards a Service-Based Internet*, pages 311–312.
- [Mattos et al. 2011a] Mattos, D., Fernandes, N. C., and Duarte, O. C. M. B. (2011a). XenFlow: Um sistema de processamento de fluxos robusto e eficiente para migração em redes virtuais. In *XXIX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos - SBRC'2011*.
- [Mattos et al. 2011b] Mattos, D. M. F., Fernandes, N. C., da Costa, V. T., Cardoso, L. P., Campista, M. E. M., Costa, L. H. M. K., and Duarte, O. C. M. B. (2011b). OMNI: OpenFlow MaNagement infrastructure. In *2011 International Conference on the Network of the Future (NoF'11)*, pages 52–56, Paris, France.
- [McKeown et al. 2008] McKeown, N., Anderson, T., Balakrishnan, H., Parulkar, G., Peterson, L., Rexford, J., Shenker, S., and Turner, J. (2008). OpenFlow: enabling innovation in campus networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 38(2):69–74.
- [Moraes et al. 2011] Moraes, I., Pisa, P., Carvalho, H., Alves, R., Ferraz, L., Ferreira, T., Couto, R., da Silva Neto, D., da Costa, V., Lage, R., et al. (2011). VNEXT: Uma ferramenta de controle e gerenciamento para redes virtuais baseadas em xen.
- [Moreira et al. 2009] Moreira, M., Fernandes, N., Costa, L., and Duarte, O. (2009). Internet do futuro: Um novo horizonte. *Minicursos do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores-SBRC 2009*, pages 1–59.
- [Pfaff et al. 2009] Pfaff, B., Pettit, J., Koponen, T., Amidon, K., Casado, M., and Shenker, S. (2009). Extending networking into the virtualization layer. *Proc. HotNets*.
- [Yap et al. 2009] Yap, K., Kobayashi, M., Underhill, D., Seetharaman, S., Kazemian, P., and McKeown, N. (2009). The stanford openroads deployment. In *Proceedings of the 4th ACM international workshop on Experimental evaluation and characterization*, pages 59–66. ACM.