Análise de Desempenho de Mecanismos de Encaminhamento de Pacotes em Redes Virtuais*

Ulisses da Rocha Figueiredo, Antonio Gonzalez Pastana Lobato, Diogo Menezes Ferrazani Mattos, Lyno Henrique Gonçalvez Ferraz e Otto Carlos Muniz Bandeira Duarte

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

{ulisses,antonio,menezes,lyno,otto}@gta.ufrj.br

Resumo. *A técnica de virtualização de redes é essencial para criar ambientes de experimentação para a Internet do Futuro, assim como também é uma efetiva proposta pluralista para a Internet, na qual diversas redes diferentes executam em um mesmo substrato físico. Embora a virtualização de servidores seja um sucesso, a virtualização de redes ainda apresenta enormes desafios e, entre eles, o isolamento e o desempenho são os principais. Este artigo analisa as principais arquiteturas de virtualização de redes usadas em computadores pessoais, focando na avaliação de desempenho de mecanismos de comutação nas plataformas Xen e OpenFlow. São avaliados os desempenhos dos mecanismos de comunicação ponte e roteador nativos do Xen, o Open vSwitch como comutador no modo OpenFlow e o OpenFlow em NetFPGA. É apresentada e avaliada e a proposta de virtualização híbrida XenFlow, que combina o plano de dados OpenFlow com o plano de controle Xen. Os resultados mostram taxas de encaminhamento de pacotes superiores ao se usar os mecanismos OpenFlow, implementado pelo Open vSwitch, e o encaminhamento pelo hardware promovido por NetFPGA, agindo como comutador OpenFlow, quando comparados com os modos roteador e ponte do Xen. Os resultados comprovam a eficiência do sistema híbrido XenFlow que atinge taxas similares aos mecanismos de melhor desempenho, realizando a separação dos planos de controle e dado.*

Abstract. *The network virtualization technique is essential to create environments for experimentation of Future Internet proposals, and it is also an effective pluralist proposal for the Internet, in which several different networks run on the same physical substrate. Whereas server virtualization is a success, network virtualization still presents problems, and, among them, isolation and performance are key challenges. In this paper we analyze network-virtualization architectures based on personal computers, focusing on performance evaluation of the commuting mechanisms on OpenFlow and Xen platforms. We analyzed native Xen mechanisms for networking, bridge and router, Open vSwitch as an OpenFlow switch and NetFPGA running OpenFlow. The XenFlow hybrid virtualization technique is presented and evaluated, which combines OpenFlow data plane with Xen control plane. The results show that Open vSwitch, implementing OpenFlow, shows similar transfer rates than NetFPGA hardware switching, running OpenFlow and XenFlow. Moreover, we observe that the greater complexity involved in routing with Xen virtual machines limits it's forwarding packet rate. The results prove that XenFlow hybrid switching, achieved a packet forwarding rate close to the one achieved by Open vSwitch and NetFPGA, despite XenFlow's control and data plane separation.*

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

1. Introdução

O projeto original da Internet não atende às exigências das aplicações atuais, como segurança, gerenciamento, mobilidade e monitoramento. As novas propostas para a Internet do Futuro, além de serem modeladas, analisadas e simuladas, precisam também ser testadas em ambientes reais com escala similar à atual Internet. No entanto, os provedores de serviço de Internet receiam e evitam efetuar experimentos que alterem o núcleo da rede, pois isso pode impactar e causar falhas em serviços já estabelecidos. Portanto, a experimentação de novas aplicações, serviços e protocolos requer um ambiente que se aproxime das condições realistas da rede de produção convencional e, ao mesmo tempo, seja isolado o suficiente para protegê-la de um mau funcionamento dos testes.

A virtualização é a técnica usada para prover um ambiente pluralista de redes virtuais para a experimentação de propostas para a Internet do Futuro [Feamster et al. 2007]. A virtualização separa a função desempenhada por um elemento de rede de sua realização física e, portanto, diversas redes virtuais executam simultaneamente sobre um mesmo hardware [Chowdhury and Boutaba 2010]. Assim, diversos protocolos e serviços inovadores podem ser testados no núcleo da rede, pois cada rede virtual se comporta como uma fatia de rede isolada das demais. Cada rede virtual é dedicada a um experimento e tem sua própria pilha de protocolos e arcabouço de controle. As diversas redes virtuais são isoladas e podem ter diferentes requisitos de qualidade de serviço (QoS) [Keller and Rexford 2010, McKeown et al. 2008].

Xen [Pisa et al. 2011] e OpenFlow [Mattos et al. 2011a] são as técnicas de virtualização fundamentais usadas para a construção do ambiente de experimentação proposto. Xen [Egi et al. 2007] é uma ferramenta de virtualização de computadores, em que as máquinas virtuais se comportam como roteadores. O OpenFlow [McKeown et al. 2008], por outro lado, provê elementos de rede programáveis, no qual o plano de controle da rede é executado em um nó independente e centralizado, interagindo com os elementos de encaminhamento através de uma interface de programação de aplicação (*Application Programming Interface* - API).

Arquiteturas de virtualização de redes vem sendo propostas e dois requisitos fundamentais são o isolamento e o desempenho no encaminhamento de pacotes. Em [Bianco et al. 2010], o desempenho do OpenFlow foi comparado exclusivamente com o Linux nativo. Em [Wang and Ng 2010] foi verificado o desempenho da virtualização do Xen na rede de um grande data center. Em [Mann et al. 2013], foi demonstrado que o Open vSwitch é uma boa ferramenta de monitoramento de fluxo. A proposta de [Unnikrishnan et al. 2010] mostra as vantagens de se usar NetFPGA em redes virtuais, focando em escalabilidade. Este artigo analisa e avalia o desempenho de diversos mecanismos de encaminhamento em redes virtuais. São focados mecanismos de encaminhamento de pacotes baseados nas ferramentas de virtualização de redes Xen e OpenFlow. Os experimentos propostos consideram as configurações de encaminhamento de pacotes para máquinas virtuais no Xen, nos modos roteador e ponte nativos, além de considerar o encaminhamento com o comutador por *software* Open vSwitch, tanto usando-o como um comutador Ethernet, quanto como um comutador OpenFlow. Também é analisado o impacto do uso de técnicas de aceleração de encaminhamento de dados por *hardware*, usando placas de redes programáveis NetFPGA [Naous et al. 2008] para o comutador OpenFlow [de Oliveira et al. 2012].

A análise de desempenho realizada também avalia o sistema híbrido de virtualização de rede XenFlow [Mattos et al. 2011b] que é uma proposta do Grupo de Teleinformática e Automação da Universidade Federal do Rio de Janeiro. O sistema XenFlow se baseia no paradigma de separação de planos de controle e dados [Pisa et al. 2010, Fernandes et al. 2010], sendo capaz de fornecer um bom desem-

penho à virtualização de redes por permitir que o roteamento seja implementado diretamente em um plano de encaminhamento OpenFlow. Os resultados obtidos comprovam o bom desempenho da proposta XenFlow, pois alcança taxas similares ao encaminhamento obtido pelo Open vSwtich controlado pela aplicação padrão de comutação do controlador POX para OpenFlow.

O restante do artigo está organizado da seguinte forma. A plataforma de testes usada nos experimentos é discutida na Seção 2. Os modelos de virtualização de redes analisados são apresentados na Seção 3. A Seção 4 discute os resultados dos experimentos. A Seção 5 conclui o artigo.

2. A Plataforma de Experimentação de Redes

A plataforma de testes usada para a experimentação das tecnologias de encaminhamento é o FITS (*Future Internet Testbed with Security*)[1] [Guimaraes et al. 2013]. O FITS segue uma arquitetura de *software* extensível capaz de implantar um ambiente de experimentação para propostas de Internet do Futuro. O principal objetivo do FITS é proporcionar uma infraestrutura aberta, compartilhada e de propósito geral para testes, permitindo avaliar o desempenho de propostas inovadoras. Outro objetivo da plataforma de testes é oferecer mecanismos à comunidade de pesquisadores em redes para que sejam desenvolvidas soluções para a próxima geração da Internet. Essa plataforma de testes oferece uma abordagem pluralista, na qual as redes virtuais são espalhadas em diversos nós físicos. O FITS também permite escolher entre uma abordagem convencional de encaminhamento de pacotes através das máquinas virtuais ou adotar uma abordagem de separação de planos, em que o encaminhamento de pacotes é realizado pela máquina física, de acordo com as informações de controle oriundas da máquina virtual. Assim, na abordagem de separação de planos, os pacotes de dados são encaminhados para seu destino final sem passar pela máquina virtual. A abordagem de separação de planos aumenta a capacidade de encaminhamento da rede virtual e também permite à máquina virtual liberar recursos para executar outros processos, ao invés de processar o encaminhamento de pacotes. A abordagem de separação de planos facilita a realização de testes de redes definidas por *software* também conhecidas por *Software Defined Network* (SDN).

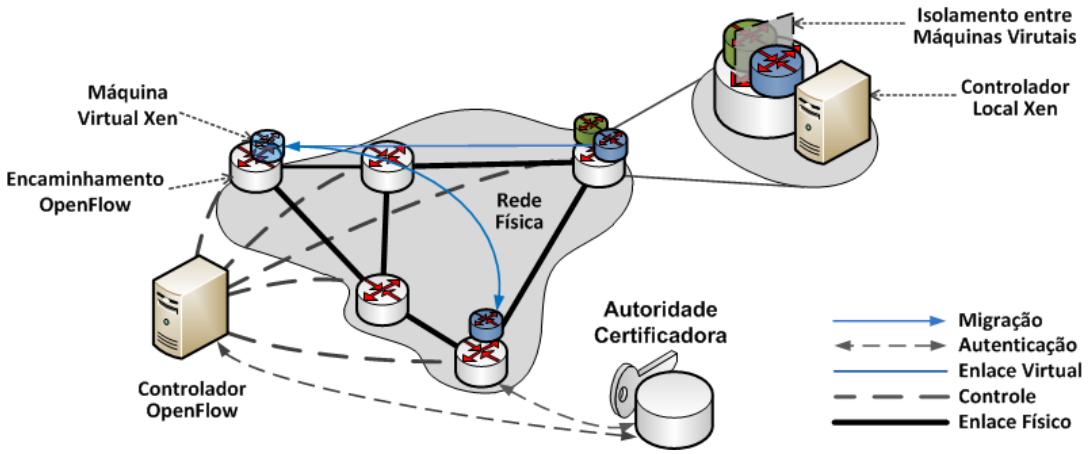


Figura 1. Arquitetura da plataforma de testes FITS com separação de planos: o plano de controle em máquinas virtuais Xen e o encaminhamento de pacotes relativo ao plano de dados realizado pelo OpenFlow.

[1] http://www.gta.ufrj.br/fits.

O encaminhamento padrão da plataforma de testes FITS é realizado pelo comutador por *software* Open vSwitch. O Open vSwitch realiza a comutação dos pacotes entre máquinas virtuais e a rede física. Contudo, o Open vSwitch é um comutador programável que permite também o controle e o gerenciamento dos fluxos em redes virtuais. Uma das possíveis interfaces de interação com o Open vSwitch é através da API OpenFlow. Portanto, a integração de máquinas virtuais Xen e a rede OpenFlow é possível através do uso do Open vSwitch.

Este artigo apresenta uma análise do desempenho de diversas formas de encaminhamento de pacotes em redes virtuais. A ideia básica do artigo é usar um conjunto de nós da plataforma de testes FITS para avaliar as diferentes técnicas de encaminhamento.

3. Os Modelos de Virtualização de Rede

As duas principais tecnologias avaliadas são a virtualização de máquinas provida pelo Xen e a comutação de fluxos programável provida pelo OpenFlow. O desempenho da comutação de fluxos provida pelo OpenFlow é também avaliado com uma implementação do OpenFlow em *hardware*, através do uso de uma placa de rede programável NetFPGA [Naous et al. 2008]. A vantagem da utilização da plataforma de virtualização Xen é a criação de um ambiente de virtualização de redes com controle distribuído e com amplo suporte à inovação, pois as máquinas virtuais (roteadores virtuais) são isoladas umas das outras e o administrador da rede virtual pode desenvolver seus mecanismos de controle sem restrições. A vantagem da utilização do OpenFlow é que, por ser um comutador programável, a migração de fluxos é trivial e, consequentemente, a migração dos enlaces virtuais torna-se uma atividade também trivial, permitindo o remapeamento simples de topologias lógicas sobre a topologia física.

3.1. Virtualização de Redes através do Xen

O Xen é uma plataforma de virtualização de computadores pessoais bastante empregada na consolidação de servidores[2]. A arquitetura do Xen é baseada em uma camada de virtualização, localizada sobre o *hardware*, denominada Monitor de Máquina Virtual (VMM – *Virtual Machine Monitor*) ou hipervisor, como pode ser visto na Figura 2. Sobre o hipervisor são executados os ambientes virtuais, chamados de máquinas virtuais, ou domínios não privilegiados (Domínio U), que acessam, de forma independente, recursos como CPU, memória, acesso ao disco e à rede. Cada ambiente virtual está isolado dos demais, isto é, a execução de uma máquina virtual não afeta a de outra máquina virtual, as quais, inclusive, podem ter sistemas operacionais distintos. O Xen possui um ambiente virtual privilegiado, denominado Domínio 0, que detém a exclusividade do acesso aos dispositivos físicos e, portanto, provê o acesso às operações de Entrada/Saída (E/S) dos demais domínios, além de executar operações de gerência do hipervisor. Os demais domínios, referenciados como Domínio U ou domínios não privilegiados, não possuem acesso direto ao *hardware* para operações de E/S. Sendo assim, os domínios não privilegiados possuem dispositivos (*drivers*) virtuais, que se comunicam com o Domínio 0 para acessarem os dispositivos físicos.

A virtualização da interface de rede no Xen é feita demultiplexando os pacotes que chegam pela interface física para os domínios não privilegiados e, de forma similar, multiplexando os pacotes que saem desses domínios para as interfaces físicas de rede. Os Domínios Us possuem acesso a dispositivos virtuais de entrada e saída, que são controlados por dispositivos (*drivers*) virtuais que fazem requisições ao Domínio 0 para acessarem os dispositivos físicos. Ao contrário dos Domínios Us, o Domínio 0 tem acesso direto aos

[2]A consolidação de servidores consiste em instalar diferentes servidores em máquinas virtuais isoladas hospedadas por uma mesma máquina física.

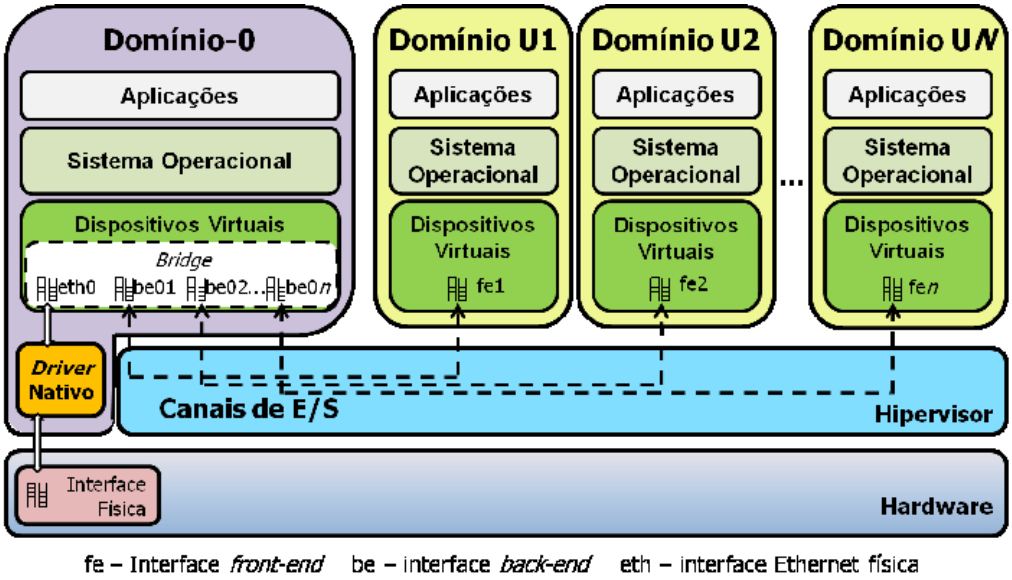
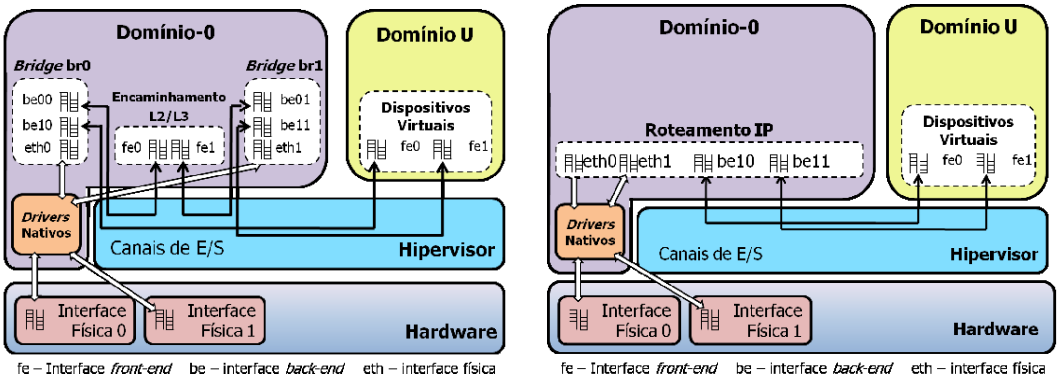


Figura 2. Arquitetura de virtualização do Xen, a exclusividade de acesso ao *d*river físico pelo Domínio 0 e a concentração dos canais de entrada e saída dos Domínios U.

dispositivos de entrada e saída, através dos controladores de dispositivos (*drivers*) nativos. Dessa forma, ao receber uma requisição de um Domínio U, o Domínio 0 executa a requisição diretamente sobre o controlador de dispositivo (*driver*) nativo. A comunicação entre os dispositivos virtuais dos domínios não privilegiados e o Domínio 0 é realizada através de uma dupla de interfaces: *back-end* e *front-end* [Fernandes et al. 2010]. Cada domínio não privilegiado tem interfaces virtuais, chamadas *front-end*, que são utilizadas para todas as comunicações de rede. Essas interfaces virtuais são tratadas pelos sistemas operacionais dos Domínios Us como se fossem interfaces físicas reais. Para cada interface *front-end* criada nos domínios não privilegiados, é criada uma interface *back-end* no Domínio 0. As interfaces *back-end* atuam como representantes das interfaces dos domínios não privilegiados no Domínio 0. As interfaces *back-end* e *front-end* se comunicam através de um canal de E/S (*I/O Channel*). A troca de pacotes entre as interfaces dos Domínios Us e o Domínio 0 é realizada de forma eficiente e, portanto, sem cópia de memória. Um mecanismo empregado pelo canal de E/S remapeia a página física que contém o pacote no domínio de destino.

Por padrão, no Xen, a conexão entre as interfaces *back-end* e as interfaces físicas de rede pode ser realizada de dois modos: comutado e roteado. No modo comutado (*Bridge Mode*), mostrado na Figura 3(a), são instanciadas pontes (*bridges*) no Domínio 0 e as interfaces *back-end* e as interfaces reais são associadas a elas. Uma ponte (*bridge*) é um comutador por *software*. Assim, o encaminhamento do pacote para interface *back-end* correta é realizado através do encaminhamento do pacote pela interface que responde ao endereço MAC (*Medium Access Control*) de destino do pacote. Vale ressaltar que são necessárias tantas pontes (*bridges*) quanto o número de interfaces físicas. No modo roteado (*Router*), mostrado na Figura 3(b), o Domínio 0 passa a se comportar como um roteador. Dessa forma, para cada pacote que chega, o Domínio 0 verifica o endereço IP de destino e encaminha o pacote de acordo com as rotas definidas em suas tabelas de roteamento. Assim, o encaminhamento do pacote para a interface *back-end*, ou física, correta, depende somente da definição correta da rota no Domínio 0 [Fernandes et al. 2010].



(a) Modo comutado (*Bridge*). (b) Modo roteado (*Router*).

Figura 3. A virtualização da E/S no Xen e o caminho dos pacotes.

A virtualização da rede é alcançada no Xen através da instanciação de diversas máquinas virtuais, que correspondem a elementos virtuais de rede sobre um mesmo *hardware* físico, pois o Xen permite a execução de múltiplas máquinas virtuais simultaneamente sobre a mesma máquina física. Um exemplo de virtualização de redes usando Xen é o caso em que os elementos de rede virtuais instanciados são roteadores virtuais. Nesse caso, como a camada de virtualização do Xen está abaixo dos sistemas operacionais, cada roteador virtual pode ter o seu próprio sistema operacional e cada um detém os seus próprios planos de dados e controle isolados dos demais roteadores. Nessa arquitetura de rede virtual, um roteador virtual pode ser instanciado, configurado, monitorado e desativado sob demanda. O roteador virtual pode ser migrado, ainda em funcionamento, usando o mecanismo de migração ao vivo do Xen [Clark et al. 2005].

3.2. A Comutação de fluxos OpenFlow

A ideia básica do OpenFlow é dividir a rede em dois planos, o de controle, responsável pela execução dos algoritmos de controle da rede, e o plano de dados, responsável pelo encaminhamento e pela aplicação de políticas a cada pacote. Para tanto, o OpenFlow explora o fato de que a maioria dos fabricantes de comutadores *Ethernet* e de roteadores implementa uma tabela de fluxos que permite a execução de aplicações de *firewall*, *Network Translation Table* (NAT), qualidade de serviço (QoS – *Quality of Service*), e também a coleta de estatísticas diretamente nos equipamentos [McKeown et al. 2008]. No entanto, cada fabricante tem uma tabela de fluxos diferente. Assim, a proposta do OpenFlow é definir um conjunto de funcionalidades comuns que deve executar em comutadores e roteadores, definindo uma interface padrão de controle do plano de dados. Dessa forma, os comutadores e roteadores da rede ficam responsáveis somente pelo plano de dados. O plano de controle é executado em outro nó, logicamente centralizado, que detém uma visão global da rede. O plano de controle centralizado executa os algoritmos de controle e decide as ações a serem tomadas pelo plano de dados. As informações são trocadas entre o plano de dados e o plano de controle segundo o protocolo OpenFlow.

O OpenFlow implementa a virtualização do plano de dados. A arquitetura do OpenFlow é baseada na separação física das funções de encaminhamento e de controle da rede. O OpenFlow associa o encaminhamento eficiente, já que a função de encaminhamento é mantida em *hardware* especializado, com uma interface de controle simples e que permite o desenvolvimento de novas aplicações. Essa arquitetura possibilita que as funções da rede sejam definidas por aplicações expressas em *software*, enquanto o en-

caminhamento é realizado por *hardware* especializado. A função de encaminhamento, executada no plano de dados, é processada por elementos especializados da rede que apresentam uma tabela de fluxos compartilhada. É através dessa tabela de fluxos compartilhada que o plano de dados é virtualizado. Já a função de controle, exercida pelo plano de controle, é centralizada em outro elemento da rede, chamado controlador. O controlador executa funções de controle para a rede virtual.

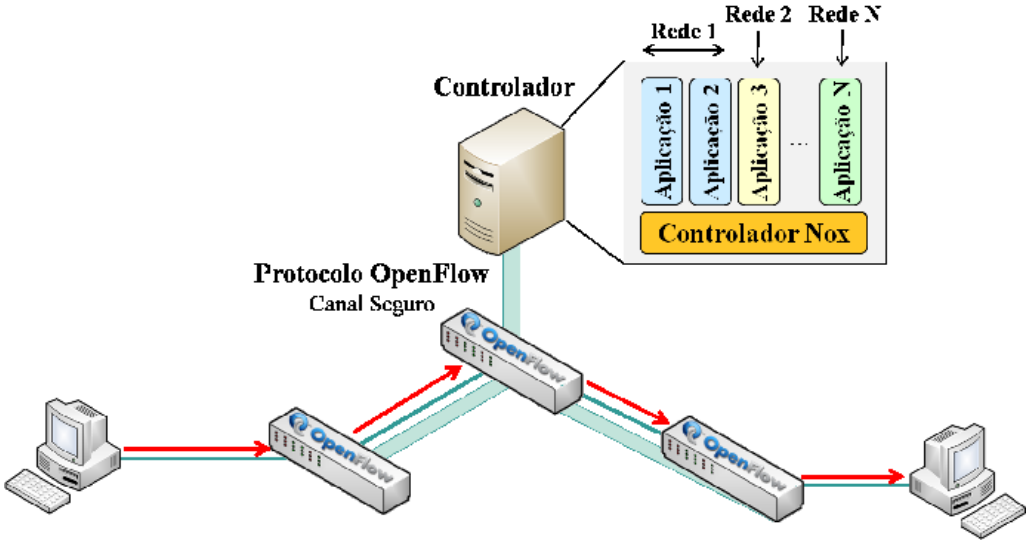


Figura 4. Arquitetura de uma rede OpenFlow. Os comutadores OpenFlow comunicam-se com o controlador através do protocolo OpenFlow em um canal seguro. O controlador executa as aplicações de controle de cada rede virtual.

A Figura 4 mostra a organização de uma rede OpenFlow e a comunicação dos comutadores com o controlador. A comunicação entre os elementos de rede e o controlador é definida pelo protocolo OpenFlow. A comunicação é estabelecida através de um canal seguro definido entre o controlador e cada elemento OpenFlow. O protocolo OpenFlow define funções para configurar e monitorar os elementos. O encaminhamento é definido com base em fluxos. Um fluxo é uma sequência de pacotes com um conjunto de características comuns obtidas do cabeçalho do pacote tais como: endereço MAC de origem e de destino, endereço IP de origem e de destinos, porta TCP etc. Quando um pacote chega ao elemento encaminhador, o elemento verifica se o pacote se adéqua a algum fluxo já definido. Em caso positivo, as ações definidas para aquele fluxo são aplicadas ao pacote. Em caso negativo, o pacote é encaminhado para o controlador, que extrai as características do fluxo, a partir deste "primeiro" pacote, e cria um novo fluxo, introduzindo-o na tabela de fluxos do elemento OpenFlow. Uma das possíveis ações que o controlador pode definir para um fluxo é que ele siga o processamento normal, seja de comutação na Camada 2, seja roteamento na Camada 3, como se não existisse o protocolo OpenFlow.

A implementação do OpenFlow pode ser feita em diversos equipamentos da rede. A sua especificação concilia recursos de hardware disponíveis em equipamentos de rede comuns, como tabela de fluxos, estruturas de filas e memória endereçada por conteúdo, com os requisitos de redes programáveis, em especial a separação do plano de controle do plano de dados. Entre as opções de implantação do OpenFlow, há a proposta do Open vSwitch, que concilia as vantagens de redes programáveis com a virtualização de sistemas. O Open vSwitch [Pfaff et al. 2009] é um comutador de software projetado tanto para ser usado em ambientes virtualizados, para transformar um computador comum em um comutador programável. O Open vSwitch é um comutador por software que executa

no hipervisor, ou no domínio de gerenciamento do sistema virtualizado, como o Domínio 0 do Xen [Egi et al. 2008], e provê a conectividade entre máquinas virtuais e as interfaces físicas. No caso de um sistema sem virtualização, o Open vSwitch age de maneira similar à *bridge* nativa do Linux, encaminhando os pacotes entre as interfaces de rede do sistema. O seu modelo de operação é muito semelhante ao de um comutador Ethernet padrão, no entanto o novo modelo de comutador exporta uma interface para a manipulação do encaminhamento e o gerenciamento do estado de configuração, em tempo de execução. Essas características são desejadas para poder fazer a distribuição lógica de comutadores e para suportar a integração com os ambientes virtuais. Pela interface remota, um processo pode ler e escrever variáveis de configuração do comutador, assim como pode manipular o caminho definido para o encaminhamento de um fluxo. Nesse sentido, a interface para a manipulação de fluxos implementa um super conjunto do protocolo OpenFlow, já que agrega ainda algumas funções específicas para a virtualização.

Outra possível implementação do plano de encaminhamento de pacotes em redes virtuais é a placa NetFPGA programada com o OpenFlow para a comutação de pacotes por *hardware*, atingindo taxas de até 10 Gb/s [Naous et al. 2008]. A implantação do protocolo OpenFlow em placas NetFPGA permite que essas placas implementem a API OpenFlow e, então, possam ser controladas por um controlador OpenFlow. Dessa forma, uma aplicação OpenFlow pode controlar uma placa NetFPGA sem que haja a necessidade de implementar um novo programa específico para a placa NetFPGA.

3.3. O Sistema Híbrido XenFlow

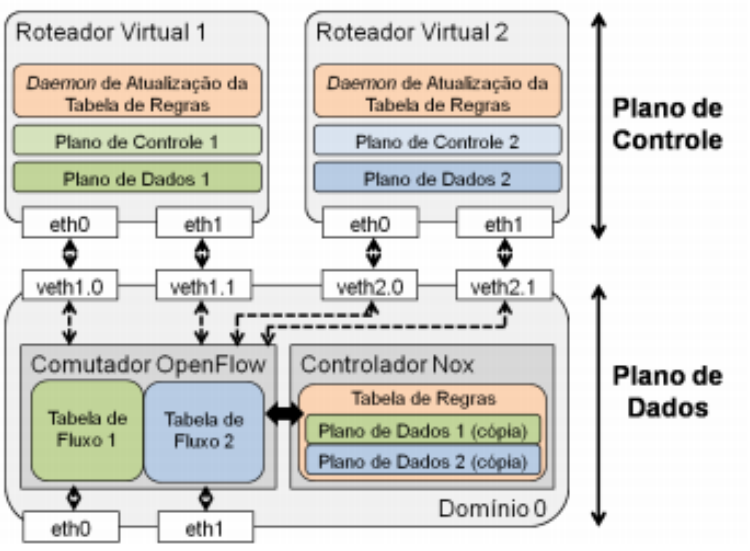


Figura 5. Roteamento no sistema XenFlow, que e baseado no paradigma da separação de planos.

XenFlow [Mattos et al. 2011b] é um sistema de virtualização híbrido baseado nas plataformas Xen e OpenFlow. O XenFlow oferece tanto a opção de controle distribuído ou de controle centralizado da rede. Para atender ao paradigma de separação de planos, as funções do roteador virtual são divididas em dois planos: o plano de controle e o plano de dados. O plano de dados é executado no Domínio 0, como mostrado na Figura 5. O plano de controle é executado na máquina virtual Xen, sendo responsável por todas as tarefas de controle, como a atualização da tabela de roteamento. Por outro lado, o plano

de dados é criado utilizando-se o OpenFlow que é responsável pelo encaminhamento dos pacotes. A ideia chave do XenFlow é, que ao usar o OpenFlow como elemento comutador, o XenFlow consegue rotear pacotes sem que seja necessário o pacote seguir até o plano de controle na máquina virtual (Domínio não privilegiado) Xen. Assim, o Xenflow não apenas comuta no plano de dados, mas também roteia no plano dados. Isto provê uma alta eficiência para o roteamento. Portanto, quando chega um pacote que não está na tabela de fluxos do comutador OpenFlow, este é enviado ao controlador Nox, que então analisa sua tabela de regras, que é copiada periodicamente dos seus roteadores virtuais, e inclui um novo fluxo no comutador OpenFlow. A partir deste ponto, todos os pacotes passam a ser apenas comutados, fazendo com que haja apenas atraso no primeiro pacote do fluxo, o que é desprezível quando se trata de fluxos de pacotes de longa duração com uma grande sequência de pacotes. Portanto, após o estabelecimento do fluxo de encaminhamento de pacotes no plano de dados (OpenFlow), ao invés de encaminhar cada pacote para a máquina virtual, o XenFlow executa as funções relativas ao roteamento no plano de dados e encaminha os pacotes direto para a interface de saída, sem passar pelo plano de controle [Mattos et al. 2011b]. No XenFlow, toda máquina física está associada a um comutador OpenFlow que liga as máquinas virtuais Xen ao resto da rede e cada máquina virtual Xen funciona como um controlador do comutador OpenFlow.

As duas principais vantagens do XenFlow são: a realização da migração de topologias virtuais sem perdas de pacote, herdada da característica de separação de planos do OpenFlow, podendo mapear um enlace lógico sobre um ou mais enlaces físicos, e a possibilidade de fazer o controle distribuído da rede, herdado do Xen, realizado por protocolos de roteamento executando em máquinas virtuais, tal qual nas redes convencionais. O XenFlow é inovador em relação ao maior alcance da migração de um roteador virtual, pois ele não se restringem ao nó físico de destino ter os mesmos vizinhos que o nó físico de origem, como acontece nas outras propostas da literatura [Wang et al. 2008, Pisa et al. 2010, Clark et al. 2005]. A facilidade provida pelo XenFlow de mapear um enlace lógico sobre um, ou mais enlaces físicos, elimina essa restrição.

4. Experimentos e Resultados

Dois ambientes de testes distintos foram implantados para avaliar o desempenho dos mecanismos de encaminhamento. Ambos foram implementados em linguagem Python. Um ambiente de teste utiliza as funções do módulo do *kernel* do Linux para geração de pacotes, `pktgen`[3] e medidas de vazão. O outro utiliza o aplicativo de testes para servidores *Web* `HTTPerf`[4], responsável por gerar demandas de conexão a um servidor HTTP para medir assim a taxa máxima de estabelecimento de fluxos. Foram realizados três experimentos distintos para cada mecanismo de encaminhamento. O primeiro experimento utilizou o `pktgen` para medir a relação entre a taxa de pacotes enviada e a recebida. O segundo usa o `pktgen` em conjunto com o `ping` para medir o atraso com um fluxo sujeito a um tráfego de fundo variável. O terceiro experimento usou a ferramenta `HTTPerf` para avaliar a taxa de conexões a servidor web, obtendo assim a taxa de fluxos por segundo que cada mecanismo de encaminhamento de pacotes é capaz de atender.

Para todos os experimentos, foi implementada uma topologia com três máquinas físicas. Uma geradora de pacotes, outra agindo como encaminhadora de pacotes e a terceira agindo como receptora de pacotes. As máquinas geradora e receptora de pacotes são servidores, cada um com dois processadores Xeon X5570, 2.93 GHz, cada processador com 8 núcleos, logo, ao todo cada servidor conta com 16 núcleos, 48 GB de memória

[3]http://www.linuxfoundation.org/collaborate/workgroups/networking/pktgen.

[4]http://www.hpl.hp.com/research/linux/httperf/.

RAM e interface de rede Gigabit Intel. A máquina encaminhadora é um computador com um processador Intel Core i7 950, com 8 núcleos, 3.07 GHz, 4 GB de memória RAM e duas interfaces de rede Intel Gigabit e uma interface de rede com quatro portas Ethernet NetFPGA de 1 Gb/s. Com essa forma de interconexão é possível testar diversas formas de encaminhamento e roteamento de pacotes. Os resultados apresentados nessa seção apresentam intervalo de confiança de 95%.

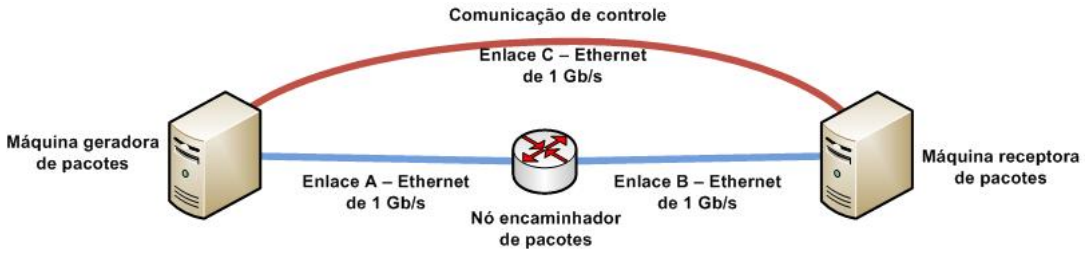


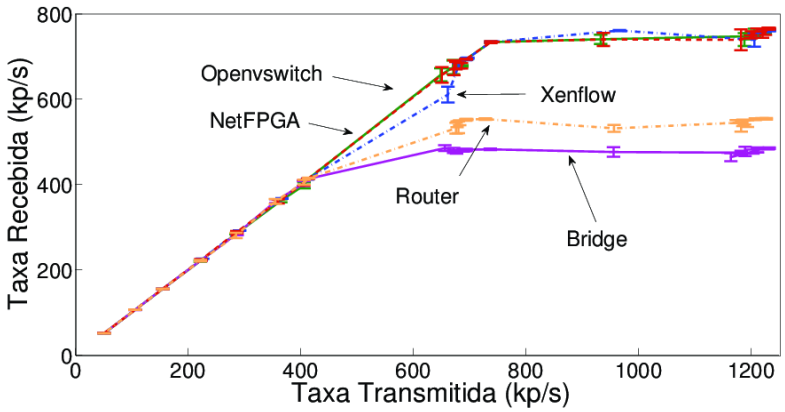
Figura 6. Configuração do ambiente de medida, com uma máquina geradora, uma encaminhadora e uma receptora.

O objetivo do primeiro experimento é medir a taxa máxima de encaminhamento de pacotes para cada modelo de encaminhamento adotado. Foi usado o `pktegen` que por ser um módulo do *kernel* do Linux permite a geração de um fluxo de pacotes com altas taxas de pacotes por segundo. Para medir a eficiência do mecanismo de encaminhamento testado, um contador é iniciado tanto na máquina geradora quanto na receptora, sendo então calculadas as taxas de pacotes gerados e recebidos por segundo. Com esse tipo de experimento, é possível avaliar a taxa de pacotes que chega com sucesso ao outro nó da rede e também verificar a quantidade pacotes que o gerador é capaz de gerar. Desta forma, a análise fica mais precisa, visto que o número de pacotes gerados oscila em função das limitações `pktgen`, como o escalonamento do processo de geração de pacotes e limitações de desempenho que impeçam a geração de uma maior taxa de pacotes.

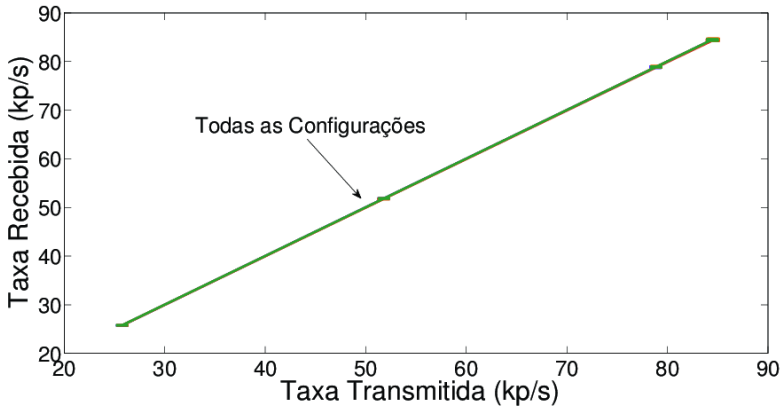
No primeiro teste, foram utilizados pacotes UDP de 36 bytes e 1472 bytes, de forma a obter quadros Ethernet de 64 e 1500 bytes de conteúdo[5], pois desta forma é possível testar o desempenho do mecanismo de encaminhamento tanto para um fluxo de numerosos pacotes pequenos, quanto para um fluxo menos intenso quanto a taxa de pacotes, porém com maior volume de transferência de dados, para pacotes grandes. A variação da taxa de pacotes enviada foi até o máximo que foi possível ser gerado. Pelos resultados apresentados na Figura 7, é possível perceber que todos os mecanismos conseguiram atingir valores muito próximos da taxa de saturação de enlace, exceto a *bridge* nativa do Linux, agindo no modo *bridge* do Xen, e o modo roteador do Xen. Tanto no modo roteador, quanto no modo *bridge*, a taxa recebida apresenta perda de desempenho, já que o roteador físico encaminha todos os pacotes para o roteador virtual, máquina virtual do Xen, onde os pacotes são processados para calcular o próximo salto de sua rota. Contudo, o modo roteador apresenta desempenho melhor, pois o encaminhamento do modo roteador baseia-se nos mecanismos nativo do Linux para encaminhamento de pacotes IP implementados diretamente no *kernel* do sistema operacional, enquanto o modo *bridge* é implementado como um módulo do *kernel* e realiza o encaminhamento de pacotes entre o roteador físico e o virtual com base no encaminhamento da Camada 2.

Para medir a variação do atraso em função de um fluxo de fundo, mais uma vez foi usado o `pktgen`. O `pktgen` permite gerar um tráfego de pacotes de 64 bytes, variando

[5] 64 bytes é o tamanho mínimo do conteúdo de um quadro Ethernet, enquanto 1500 bytes é o tamanho mais comum de MTU (*Maximum Transmission Unit*).



(a) Taxa transmitida e recebida para pacotes de 64 bytes.



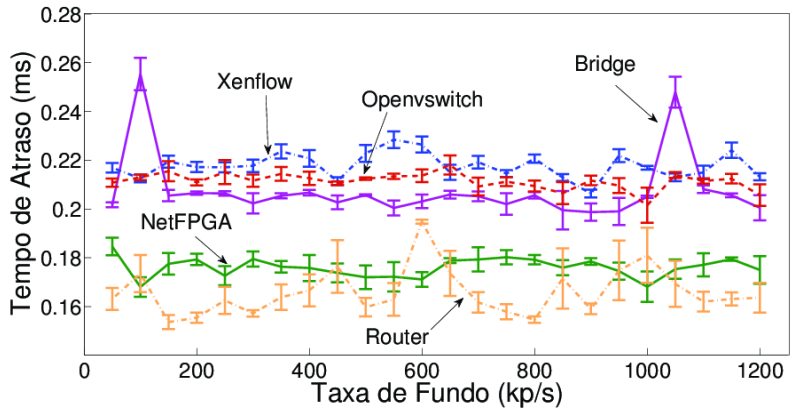
(b) Taxa transmitida e recebida para pacotes de 1500 bytes.

Figura 7. Relação entre taxa de pacotes UDP enviados e recebidos.

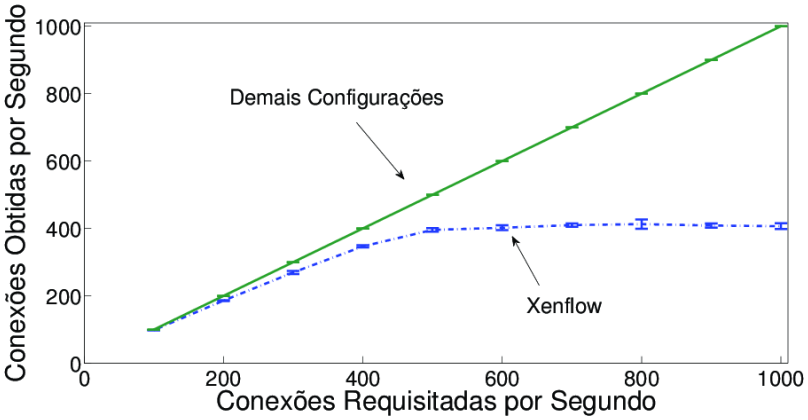
durante o teste, até a capacidade máxima de geração de 1.2 M pacotes/s[6]. Em paralelo com esse tráfego, foi medido o tempo médio que pacotes *ICMP Echo Request* e *Echo Reply*, da aplicação `ping`, levaram para serem executados para cada taxa de fluxo de fundo. Os resultados mostrados na Figura 8(a) revelam que a variação do tráfego de fundo causa uma variação do tempo de atraso, entretanto, essas oscilações não seguem um padrão específico. O mecanismo de encaminhamento assistido por *hardware*, NetFPGA, apresenta um tempo reduzido de atraso. Esta maior eficiência ocorre porque a NetFPGA evita o atraso do envio de pacotes ao sistema operacional para decisão de encaminhamento de pacotes, pois como utiliza *hardware* dedicado a funções de rede. O modo roteador também apresentou um atraso reduzido em relação aos outros mecanismos.

O terceiro experimento realizado verifica a limitação de cada mecanismo de encaminhamento para a definição de fluxos por segundo. O experimento é realizado medindo quantas conexões HTTP são estabelecidas em função da quantidade de conexões requisitadas, cada conexão HTTP estabelece dois fluxos no mecanismo de encaminhamento, um entre o cliente e o servidor e o outro no sentido inverso. Esse teste visa medir a limitação de cada mecanismo de encaminhamento para a resposta à alta carga de requisição de novos fluxos por segundo. Na topologia do teste, um dos computadores faz o papel de

[6]O limite de 1.2M pacotes/s é a limitação da configuração de *hardware* e *software* utilizados nos experimentos.



(a) Atraso de ida e volta em pacotes ICMP.



(b) Taxa de fluxos atendidos.

Figura 8. Atraso do ping com tráfego de fundo e limitação da taxa de definição de fluxos por segundo no mecanismo de encaminhamento.

cliente e estabelece conexões com o servidor HTTP em outro computador, a conexão é realizada através da máquina encaminhadora. Para realizar as conexões HTTP, foi utilizada a ferramenta `HTTPerf` que é usada para medir a performance de servidores *web*. Nesta medida de desempenho o XenFlow apresenta menor desempenho que a maioria dos mecanismos de encaminhamento. A limitação do XenFlow ocorre, pois o XenFlow introduz dois atrasos no mecanismo de encaminhamento. O primeiro atraso deve-se ao fato do primeiro pacote de cada fluxo ser enviado ao controlador, gerando, portanto, um atraso quando comparado aos modos *bridge* e roteador do Xen. O segundo atraso introduzido pelo XenFlow é o atraso relativo ao cálculo do próximo destino do pacote na rede, pois no XenFlow, ao invés de serem definidos dois fluxos para o pacote ir à máquina virtual e sair da máquina virtual para a interface de saída, só um único fluxo é definido encaminhando o pacote diretamente no plano de dados. A separação de planos apresenta a desvantagem da redução da taxa de fluxos por segundo suportada pelo XenFlow, mas, como ressaltado pela Figura 7(a), também apresenta a vantagem da taxa de encaminhamento de pacotes com o XenFlow ser superior aos modos *bridge* e roteador do Xen.

5. Conclusão

Este artigo avaliou o desempenho de elementos encaminhadores de redes virtuais de diferentes técnicas de virtualização. A ferramenta de virtualização Xen oferece dois

modos nativos para encaminhamento de pacotes em virtualização de redes, o modo roteador e o modo ponte. O modo roteador realiza o encaminhamento IP entre máquinas virtuais, enquanto o modo ponte realiza o encaminhamento na camada de enlace, agindo assim como uma ponte Ethernet. A técnica de encaminhamento de pacotes OpenFlow também é analisada. Todos estas formas de encaminhamento de pacotes são comparadas com a proposta XenFlow do Grupo de Teleinformática e Automação (GTA). Os resultados comprovam a maior eficiência de encaminhamento de pacotes da técnica de separação de planos usada na comutação OpenFlow, uma vez que os pacotes são encaminhados no plano de dados sem passar pelo plano de controle. Os resultados também revelam que o desempenho de encaminhamento é superior ao se usar encaminhamento pelo *hardware* provido por NetFPGA, agindo com um comutador OpenFlow. Por outro lado, observa-se que a maior complexidade envolvida no encaminhamento através de máquinas virtuais Xen limita a sua taxa de encaminhamento de pacotes. Contudo, ao usar a comutação híbrida XenFlow, que combina a flexibilidade do Xen e o desempenho do OpenFlow seguindo o paradigma de separação de planos, a taxa de encaminhamento alcançada é superior à obtida pelos mecanismos nativos do Xen e similar aos mecanismos de encaminhamento baseados no OpenFlow.

Os resultados mostram taxas de encaminhamento similares do XenFlow e OpenFlow, implementado pelo Open vSwitch. O desempenho similar do XenFlow e do OpenFlow se deve às dias técnicas usarem separação de planos e encaminharem pacotes de forma bem eficiente. A diferença Xenflow é no primeiro pacote do fluxo, quando é definido o fluxo no comutador OpenFlow.

Os resultados de avaliação de desempenho apresentados comprovam que o sistema híbrido XenFlow se coloca como uma proposta eficiente que provê alta taxa de encaminhamento de pacotes, sendo, portanto, uma opção viável e de baixo custo para redes virtuais e plataformas de teste de protocolos para Internet do Futuro.

6. Referências

[Bianco et al. 2010] Bianco, A., Birke, R., Giraudo, L., and Palacin, M. (2010). Openflow switching: Data plane performance. In *Communications (ICC), 2010 IEEE International Conference on*, pages 1–5. IEEE.

[Chowdhury and Boutaba 2010] Chowdhury, N. M. K. and Boutaba, R. (2010). A survey of network virtualization. *Comput. Netw.*, 54(5):862–876.

[Clark et al. 2005] Clark, C., Fraser, K., Hand, S., Hansen, J., Jul, E., Limpach, C., Pratt, I., and Warfield, A. (2005). Live migration of virtual machines. In *Proceedings of the 2nd conference on NSDI*, pages 273–286. USENIX Association.

[de Oliveira et al. 2012] de Oliveira, R. E. Z., Piccoli Filho, P. P., Ribeiro, M. R., and Martinello, M. (2012). Parâmetros balizadores para experimentos com comutadores openflow: avaliação experimental baseada em medições de alta precisão. *SBrT*.

[Egi et al. 2008] Egi, N., Greenhalgh, A., Handley, M., Hoerdt, 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.

[Egi et al. 2007] Egi, N., Greenhalgh, A., Handley, M., Hoerdt, M., Mathy, L., and Schooley, T. (2007). Evaluating Xen for router virtualization. In *Computer Communications and Networks, 2007. ICCCN 2007. Proceedings of 16th International Conference on*, pages 1256–1261. IEEE.

[Feamster et al. 2007] Feamster, N., Gao, L., and Rexford, J. (2007). How to lease the Internet in your spare time. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*.

[Fernandes et al. 2010] Fernandes, N., Moreira, M., Moraes, I., Ferraz, L., Couto, R., Carvalho, H., Campista, M., Costa, L., and Duarte, O. (2010). Virtual networks: Isolation, performance, and trends. *Annals of Telecommunications*, pages 1–17.

[Guimaraes et al. 2013] Guimaraes, P. H. V., Ferraz, L. H. G., Torres, J. V., Mattos, D. M. F., Piedrahita, A. F. M., Lopez, M. E. A., Alvarenga, I. D., Rodrigues, C. S. C., and Duarte, O. C. M. B. (2013). Experimenting content-centric networks in the future internet testbed environment. *Workshop on Cloud Convergence, ICC*.

[Keller and Rexford 2010] Keller, E. and Rexford, J. (2010). The platform as a service model for networking. In *Proceedings of the 2010 internet network management conference on Research on enterprise networking*, pages 4–9. USENIX Association.

[Mann et al. 2013] Mann, V., Vishnoi, A., and Bidkar, S. (2013). Living on the edge: Monitoring network flows at the edge in cloud data centers. In *Communication Systems and Networks (COMSNETS), 2013 Fifth International Conference on*, pages 1–9. IEEE.

[Mattos et al. 2011a] Mattos, D., Fernandes, N. C., Costa, V., Cardoso, L., Campista, M. E. M., Costa, L. H. M. K., and Duarte, O. C. M. B. (2011a). OMNI: OpenFlow MaNagement infrastructure. In *2011 NoF'11*, pages 52–56, Paris, France.

[Mattos et al. 2011b] Mattos, D. M. F., Fernandes, N. C., and Duarte, O. C. M. B. (2011b). XenFlow: Um sistema de processamento de fluxos robusto e eficiente para migração em redes virtuais. In *SBRC'2011*.

[McKeown et al. 2008] McKeown, N., Anderson, T., Balakrishnan, H., Parulkar, G., Peterson, L., Rexford, J., Shenker, S., and Turner, J. (2008). OpenFlow: in campus networksenabling innovation in campus networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*.

[Naous et al. 2008] Naous, J., Gibb, G., Bolouki, S., and McKeown, N. (2008). NetFPGA: reusable router architecture for experimental research. In *Proceedings of the ACM workshop on Programmable routers for extensible services of tomorrow*. ACM.

[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*.

[Pisa et al. 2010] Pisa, P., Fernandes, N., Carvalho, H., Moreira, M., Campista, M., Costa, L., and Duarte, O. (2010). Openflow and xen-based virtual network migration. In Pont, A., Pujolle, G., and Raghavan, S., editors, *Communications: Wireless in Developing Countries and Networks of the Future*, volume 327 of *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, pages 170–181. Springer Boston.

[Pisa et al. 2011] Pisa, P. S., Couto, R. S., Carvalho, H. E. T., Neto, D. J. S., Fernandes, N. C., Campista, M. E. M., Costa, L. H. M. K., Duarte, O. C. M. B., and Pujolle, G. (2011). VNEXT: Virtual NEtwork management for Xen-based Testbeds. In *2011 NoF'11*, Paris, France.

[Unnikrishnan et al. 2010] Unnikrishnan, D., Vadlamani, R., Liao, Y., Dwaraki, A., Crenne, J., Gao, L., and Tessier, R. (2010). Scalable network virtualization using fpgas. In *Proceedings of the 18th annual ACM/SIGDA international symposium on Field programmable gate arrays*, pages 219–228. ACM.

[Wang and Ng 2010] Wang, G. and Ng, T. E. (2010). The impact of virtualization on network performance of amazon ec2 data center. In *INFOCOM, 2010 Proceedings IEEE*, pages 1–9. IEEE.

[Wang et al. 2008] Wang, Y., Keller, E., Biskeborn, B., van der Merwe, J., and Rexford, J. (2008). Virtual routers on the move: live router migration as a network-management primitive. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 38(4):231–242.