

# El uso de plataformas para experimentación en Internet del Futuro para la enseñanza de redes de computadoras

Iara Machado<sup>a</sup>, Noemi Rodriguez<sup>b</sup>, Tiago Lima Salmito<sup>a,b</sup>, Michael Stanton<sup>a</sup>,  
Leandro Neumann Ciuffo<sup>a</sup>, Gustavo Neves Dias<sup>a</sup>, Daniel Area Leão Marques<sup>a</sup>,  
Celio Carlo Hernández Soria<sup>c</sup>

<sup>a</sup> RNP – Rede Nacional de Ensino e Pesquisa,  
Rio de Janeiro, Brasil  
{iara,tiago.salmito,michael,leandro.ciuffo,gustavo.dias,daniel.marques}@rnp.br

<sup>b</sup> PUC-Rio – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro,  
Rio de Janeiro, Brasil  
noemi@inf.puc-rio.br

<sup>c</sup> USP – Universidade de São Paulo,  
Sao Paulo, Brasil  
csoria@larc.usp.br

**Resumen.** In this paper, we discuss how Future Internet testbeds can be useful for teaching networking classes, both in conventional environments and in the context of online courses. Access to experimental testbeds allows students to have a hands-on experience that is impossible to provide with local resources in most organizations. This use of testbeds allows society to make use of idle resources and to profit from the public investments made in these infrastructures. Our work makes use of the FIBRE testbed, a research facility currently composed by a federation of 10 local testbeds, located in different R&E organizations in Brazil. The FIBRE testbed is already in operation and open to use. To illustrate the benefits of using the testbed, this paper contains a step-by-step description of how a student could use the FIBRE facility in an example laboratory assignment.

**Palabras Clave:** Internet del Futuro, Testbeds, Enseñanza, OpenFlow

## 1 Introducción

En los últimos diez años, la necesidad de experimentar nuevos protocolos en el Internet del Futuro se ha visto representada mediante la construcción de laboratorios virtuales. Dichos laboratorios prueban nuevas arquitecturas de red (a.k.a. testbeds o maquetas de red). Dentro de las instalaciones de pruebas más conocidas se encuentran GENI en Estados Unidos y algunos laboratorios del programa FIRE en Europa.

La necesidad de experimentar nuevas tecnologías, arquitecturas y protocolos en ambientes aislados ha fomentado la creación de testbed con el fin de aprender las ventajas y desventajas de las soluciones propuestas para evolucionar el Internet actual. Además, se ha enfocado mucho la atención en el suministro de elementos eficaces de red programables (routers y switches) a bajo costo.

Los testbeds deben permitir experimentos con la escala y heterogeneidad necesarios para el desarrollo del Internet del Futuro, para lograrlo deben proporcionar un gran número de diversos recursos que hacen difícil su construcción y mantenimiento. Por lo tanto, algunas Redes Nacionales de Investigación y Educación (RNIE) comienzan a ofrecer testbeds como servicio [6], dirigido a grupos de investigadores de redes de computadoras.

Es un hecho, que Internet necesita urgentemente evolucionar y que la investigación en ambiente de redes reales es importante, además debería ser más apoyada por los organismos de financiación. Por otro lado, no se atiende debidamente el desarrollo de los recursos humanos en esta área.

Desde hace años, estudiantes de pregrado y posgrado toman clases de redes informáticas con la misma estructura clásica, utilizando solamente modelos teóricos apoyados en herramientas de simulación que conlleva a un estudio más empírico de protocolos. Por otra parte, la alternativa de utilizar laboratorios que simulen el mundo real de las redes es poco frecuente, debido a su dificultad de mantenimiento y disponibilidad.

En primer lugar, a menudo máquinas “reales” exhiben un comportamiento que es diferente al descrito en los modelos de simulación [13]. En segundo lugar, clases prácticas en laboratorio tienden a ser mucho más motivadoras: durante años de enseñanza de redes de computadoras y sistemas distribuidos, hemos observado que a los estudiantes les gusta ver sus tareas ejecutadas en ambientes reales y sienten que han logrado más en esta situación.

En este trabajo, se discutirá cómo las plataformas para experimentación en Internet del Futuro pueden ser útiles en la enseñanza de redes de computadoras, tanto como complemento a las clases convencionales así como para cursos en línea. Este artículo hará uso del testbed FIBRE [10], que es un ambiente para experimentación compuesto por la federación de diez testbeds locales, ubicados en distintas organizaciones de I+E en Brasil.

El documento está organizado de la siguiente manera. La sección 2 describe el testbed FIBRE. La sección 3 presenta algunas iniciativas en curso que se utilizan de los testbeds GENI y FIRE en la docencia. En la sección 4 se discute el uso de FIBRE en la enseñanza, presentando una descripción paso a paso de cómo un estudiante puede utilizar el testbed para ejecutar tareas en clase. Para finalizar, en la sección 5 se mencionan algunas observaciones finales sobre este trabajo.

## **2 El testbed FIBRE**

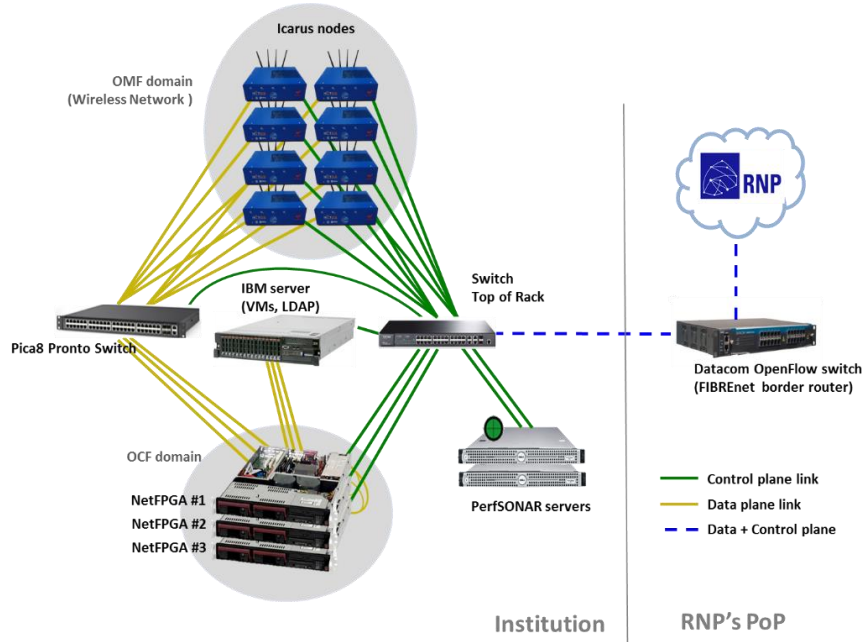
Aproximadamente desde el año 2000, un aumento de la complejidad del mantenimiento y una creciente magnitud de la arquitectura actual de Internet, ha despertado un mayor interés en la investigación de nuevas arquitecturas. Esta situación, ha sido apoyada desde el año 2005 por la planificación y construcción de plataformas para experimentación y validación de nuevas propuestas arquitectónicas.

Una contribución significativa fue introducida por el protocolo OpenFlow [4], que posibilita controlar y gestionar los flujos de datos mediante software. Para ello, el

plano de control es separado del hardware de conmutación (switches o routers), permitiendo que el diseño de la red pueda ser modificada por el usuario [27]. Hoy en día, la mayoría de los fabricantes de componentes de red ya incorporan en sus equipos un módulo de firmware de OpenFlow.

El testbed FIBRE fue construido en el ámbito de uno de los proyectos seleccionados en la primera Convocatoria Coordinada Brasil-Europa para proyectos de TICs (Tecnologías de la Información y Comunicación), financiado conjuntamente por el CNPq (Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico de Brasil) y por el Séptimo Programa Marco (FP7) de la Comisión Europea.

Actualmente, el testbed FIBRE está compuesto por una federación de diez pequeños testbeds locales, también denominadas “islas de experimentación” o simplemente “islas”. Estos testbeds locales se encuentran ubicados en ocho universidades, un centro de investigación y en la RNIE brasileña, que también presenta el Centro de Operación del testbed (a.k.a. NOC).



**Fig. 1.** Componentes de una típica isla FIBRE.

En cada isla existe un núcleo común constituido por switches openflow y un clúster de almacenamiento y computación, los cuales se encuentran apropiadamente virtualizados. Además, estas islas presentan un conjunto de puntos de acceso para permitir experimentación en redes inalámbricas. Un ejemplo de cómo está constituida una típica isla FIBRE se muestra en la figura 1, con sus instalaciones comunes y conectividad externa.

Uno de los desafíos para la experimentación de nuevas arquitecturas de red es la escalabilidad, dado que las plataformas de experimentación se utilizan en un ambiente de hardware real. Una gran topología de redes, requiere multiplexación controlada de

equipos y sistemas para permitir el manejo de recursos virtuales por el usuario. El testbed FIBRE utiliza técnicas de multiplexación con el fin de virtualizar recursos como los nodos de procesamiento, equipamientos de red y la red que conecta las islas.

El controlador OpenFlow llamado FlowVisor se utiliza para separar el control del tráfico de datos, así como para la programación de canales en redes inalámbricas. Es preciso mencionar que la virtualización no proporciona estricta fidelidad científica, ya que los experimentos son ejecutados en una infraestructura compartida, cuando debería ser en recursos físicos dedicados. Sin embargo, existen características apropiadas para atenuar esta limitación como son:

- 1) Algunas aplicaciones basadas en sistemas peer-to-peer no hacen uso intensivo de recursos de cómputo, a pesar de requerir grandes topologías.
- 2) La estricta exigencia de fidelidad científica no es imprescindible para muchas aplicaciones.
- 3) La multiplexación permite un uso más eficiente de los recursos de hardware que son limitados.

Desde el inicio del proyecto FIBRE, se decidió que el testbed debería ofrecer diversos softwares de control para el manejo de experimentos, en particular OCF (OFELIA Control Framework) [24] y OMF (cOntrol Management and Measurement Framework) [18]. El uso de diferentes softwares de control (CMFs) representa una ventaja para el testbed, ya que permite la orquestación simultánea y complementaria de recursos OpenFlow e inalámbricos.

La federación de identidad es un tema clave en el diseño del testbed FIBRE. De hecho, uno de los objetivos del proyecto fue diseñar una plataforma para experimentación donde distintos CMFs puedan trabajar juntos y de forma complementaria entre sí, además de federar múltiples instancias de un mismo CMF. En ese modelo, es posible añadir nuevas islas en cualquier momento, permitiendo que el testbed crezca y albergue más instituciones.

Otro aspecto importante en la arquitectura del testbed FIBRE es MySlice [19], que es una capa de software que implementa una arquitectura de federación distribuida, lo cual hace posible examinar todos los recursos disponibles y asignar los recursos requeridos para un experimento específico. La interfaz de dicha capa, se basa en un cliente web que posibilita la autenticación y autorización centralizada, para que los usuarios interactúen con los recursos de las múltiples islas que forman el testbed.

En la figura 2 se muestra la distribución de las islas que forman el testbed FIBRE. La integración de estos recursos crean una red a gran escala. Cada isla es controlada por uno o más CMFs. La Figura 2 también muestra el conjunto de CMF disponibles en cada isla y la red que los conecta, llamada FIBRE backbone o FIBREnet.

Cada isla monitorea sus recursos utilizando Zenoss, una herramienta de código abierto para la gestión de la red. Zenoss proporciona una interfaz web que permite a los administradores supervisar eventos del sistema y la disponibilidad de los recursos. De esta manera, una página web a disposición del público presenta las informaciones de monitoreo [28].

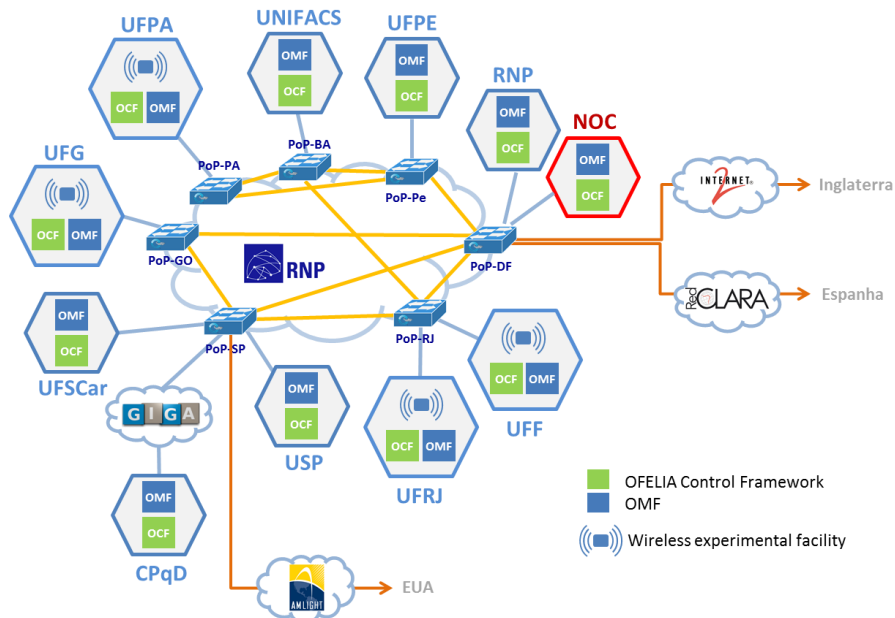


Fig. 2. El testbed FIBRE.

Durante el período del proyecto FIBRE (de octubre del 2011 a septiembre del 2014), tres islas ubicadas en Europa también integraban la plataforma. La primera isla ubicada en España llamada i2CAT, otra en la Universidad de Bristol (Inglaterra) y la última en la Universidad de Tesalia (Grecia), especializada en equipos inalámbricos. El proyecto FIBRE ha ampliado y federado dos testbeds existentes en Europa: OFELIA (OpenFlow in Europe: Linking Infrastructures and Applications) [29] y NITOS (Network Implementation Testbed using Open Source platforms) [30].

### 3 Iniciativas de enseñanza con testbeds de Internet del Futuro

La construcción de testbeds para el desarrollo de la Internet del Futuro ha sido el foco de varios proyectos alrededor del mundo. Entre estos proyectos se encuentra GENI, que parece ser el que más se ha desarrollado para extender el uso del testbed en salas de clases, incluso ofreciendo recursos de cómputo y soporte para profesores (aquí no se consideran los tutoriales dirigidos a investigadores de redes, sino un enfoque más académico, dirigido al aprendizaje de los estudiantes).

Desde 2012, GENI ha estado ejecutando sesiones de formación dirigidas específicamente a docentes asistentes (o TA - teaching assistants). La página wiki de GENI [26], contiene una sección dedicada a profesores. Además de un asesoramiento detallado sobre como planificar clases para utilizar el testbed, incluyendo material descargable para las clases, esta sección ofrece una serie de ejemplos de tareas. La

última conferencia GENI (GEC21), celebrada en octubre del 2014, Indiana, Estados Unidos, presentó un panel para compartir experiencias del uso de GENI en clases.

Ese esfuerzo de diseminación parece que ha dado resultados con la aparición de un significativo número de cursos académicos que utilizan GENI, muchos de los cuales exploran el testbed para prácticas con redes inalámbricas, protocolos y aplicaciones, mientras que otros se centran en técnicas de evaluación de la red y computación en la nube [11,15]. La mayoría son cursos que se imparten en el formato convencional, con tareas y trabajos de laboratorio que utilizan el testbed.

Recientemente, la Escuela Politécnica de Ingeniería de la Universidad de Nueva York, también ha desarrollado una serie de módulos MOOC (cursos masivos abiertos en línea) [3], cada uno de ellos cubriendo un tema relacionado con redes o sistemas distribuidos y que contienen actividades prácticas que se llevan a cabo en el testbed GENI. Los cursos son ofrecidos a través de edX, que es la organización creada por la Universidad de Harvard y el MIT para proporcionar material interactivo abiertamente disponible [31].

En 2013, la Unión Europea a través del Séptimo Programa Marco lanzó el proyecto Forge [12]. Forge tiene como motivación el uso de la infraestructura puesta a disposición por la iniciativa FIRE [3], no sólo para la experimentación, sino también para el aprendizaje. Dicho proyecto desarrolla widgets y materiales que permiten a profesores y alumnos configurar fácilmente experimentos relacionados con actividades académicas. La idea no es sólo aumentar el uso de los testbeds FIRE, sino también disminuir las dificultades de utilización y atraer más experimentadores a largo plazo.

#### **4 FIBRE en el ámbito académico**

Por lo general, los cursos de pregrado en las áreas de telecomunicaciones e informática contienen disciplinas de redes de computadoras en su plan de estudios. Hoy en día, las clases prácticas de redes en laboratorios de informática se basan, típicamente, en herramientas de software y máquinas virtuales. Algunas de las herramientas más adoptadas son el Network Simulator [7], Cisco Packet Tracer [8] y OMNeT++ [9].

Sin embargo, existe una gran diferencia entre simulación y experimentación práctica. Mediante el uso de testbeds a gran escala, los estudiantes pueden familiarizarse con la construcción de una red virtualizada, definida por software, que abarque múltiples nodos distribuidos geográficamente. Esto les permite una comprensión más concreta de los protocolos y sus limitaciones, además de motivar a más personas para trabajar en áreas de investigación relacionadas.

Los testbeds pueden proporcionar un ambiente ideal para la enseñanza de los protocolos convencionales, ya que los recursos virtuales pueden ser configurados para contener sólo las capas deseadas en la pila de protocolos, o permitir a los estudiantes reimplementar las capas restantes. Los portales de los testbeds ponen a disposición repositorios para máquinas virtuales (VM), lo que facilita la tarea para el instructor, pues puede subir las versiones reducidas al mínimo, y para los estudiantes, ya que

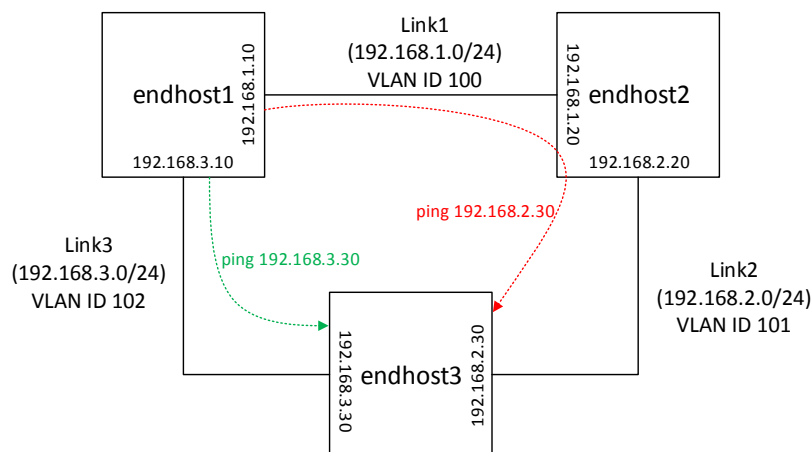
pueden configurar el número deseado de nodos y cargar la VM en ellos. Una vez que se construye la red virtual, los alumnos pueden llevar a cabo experimentos de red antes de salvar sus configuraciones y liberar los recursos informáticos involucrados para otros usuarios.

Desde el punto de vista de los usuarios experimentadores, el sustrato de red disponible es totalmente controlable a través de configuraciones explícitas y dinámicas, basadas en la abstracción FlowSpace OpenFlow. Una vez que un FlowSpace se encuentre configurado, el instructor puede proceder a la asignación de un controlador OpenFlow, el cual puede ser en una máquina virtual local o en máquinas remotas. De esta manera, los estudiantes pueden crear redes virtualizadas y proceder con la realización de sus experimentos.

La construcción de una plataforma para experimentación en Brasil que posibilite añadir recursos ubicados en otros países de forma federada, ofrece una valiosa infraestructura para la investigación y la educación. En esta sección se describirá como los estudiantes pueden utilizar el testbed FIBRE para configurar y ejecutar un experimento de enrutamiento estático en una red virtual, dedicada a través del software de control OCF. El OCF fue desarrollado en el proyecto OFELIA y adoptado por otros testbeds, como es el caso de la plataforma FIBRE).

#### 4.1 Descripción del experimento

Se describirá la configuración de un sencillo experimento de enrutamiento estático utilizando el OCF. Este experimento demuestra como crear máquinas virtuales y como asignar una topología de red aislada dentro del testbed FIBRE. El objetivo del experimento es configurar el encaminamiento de paquetes como se indica en la Figura 3; es decir, los paquetes del endhost1 enviado a la dirección IP 192.168.2.30 del endhost3 deben encaminarse a través del endhost2.



**Fig. 3.** Experimento de enrutamiento estático.

En este experimento, se utilizan tres máquinas virtuales en diferentes sitios del testbed conectadas a través de tres redes aisladas en una topología de malla. Cada enlace de red es una red virtualizada independiente asignada de forma dinámica por intermedio del plano de datos utilizando un ID de VLAN específico (100, 101 y 102 en este caso). El endhost2 debe ser configurado para encaminar los paquetes que llegan a través de sus interfaces de red.

## 4.2 Configuración del experimento

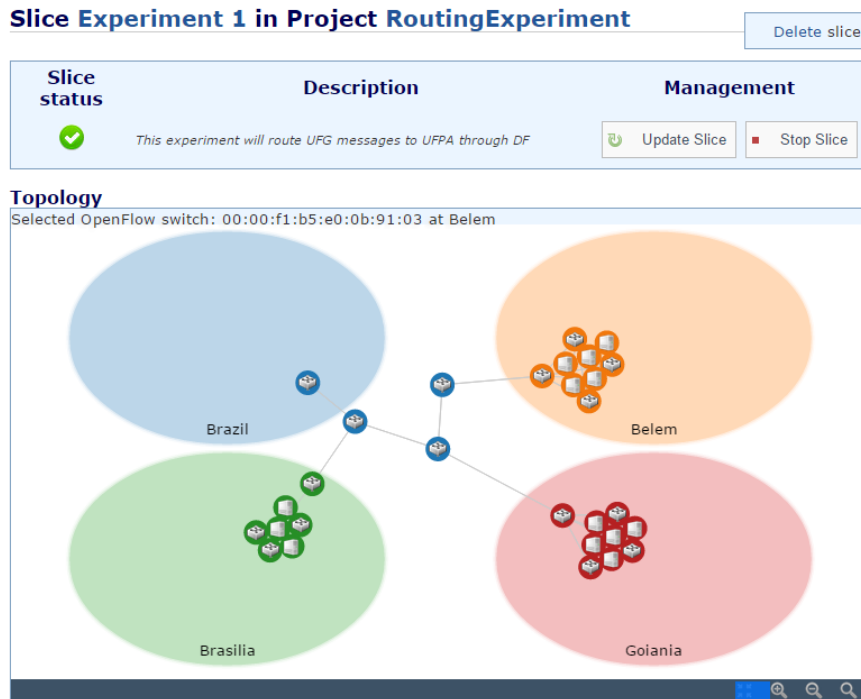
El OCF utiliza el concepto de "slice" (feta) para describir un experimento. Los *slices* describen los recursos que se utilizarán y las configuraciones del experimento. En el caso de que el estudiante tiene permiso para participar en un experimento, puede utilizar *slices* existentes asociados al experimento o crear *slices* nuevos. Al crear uno nuevo, debe ser informado el nombre, descripción y fecha de expiración del mismo. Una vez transcurrido el tiempo de duración del *slice*, la isla FIBRE puede restablecer los recursos reservados.

Para configurar un nuevo experimento, el estudiante debe primeramente solicitar el acceso a un proyecto en la interfaz web de OCF. Los estudiantes pueden ver y modificar configuraciones de proyectos en los que se les ha concedido permiso. Estos permisos se conceden generalmente por los propietarios del proyecto (profesores).

El alumno usuario debe comenzar el experimento realizando la reserva de los recursos. Los experimentos configurados por una instancia local OCF (mantenida por una de las islas del testbed) pueden utilizar solamente sus propios recursos locales. En experimentos federados con múltiples islas, los usuarios deben acceder a la instancia de OCF mantenida por el NOC y añadir a su proyecto los agregados necesarios de todas las islas deseadas. Los agregados son los grupos de recursos disponibles en las islas, bajo el control de un agregado global (a.k.a. "Aggregate Manager").

En la página de administración del *slice* mostrada en la figura 4, el panel de topología muestra la topología física de los recursos en los agregados disponibles para el *slice*. Estos recursos pueden comprender switches OpenFlow, servidores de virtualización y las conexiones entre switches y servidores.





**Fig. 4.** Topología física del “slice”.

Las máquinas virtuales (VMs) son creadas en el área de recursos computacionales de la página de administración del *slice* como se muestra en la figura 5. Durante el proceso de creación, será concedida una dirección IP para la máquina virtual. Esta dirección IP es accesible solamente a través de la red privada (VPN) del testbed FIBRE. Las VMs pueden ser iniciadas, apagadas, reiniciadas o borradas haciendo clic en la acción correspondiente en el área de recursos computacionales. Los experimentadores pueden crear tantas máquinas virtuales como sea necesario para su experimento, respetando los límites de cómputo del servidor.

• **Virt. Aggregate: AM Virt UFPA**

Name: **AM Virt UFPA**  
 Status: ✔  
 Physical location: **Belem**  
 Resources:

Server Name	Virt. Tech.	Operating System	CPU	Memory	Disc	Update
VM_SERVER_NetFPGA1_0301	XEN	GNU/Linux Debian (7.0)	None	None	None	<span>🔄 Update</span>

VM Name	State	Operating System	Memory	Mgmt IP	Actions	Update Status
endhost3	stopped	GNU/Linux Debian (6.0)	128	10.130.12.12	<span>Start</span> <span>Delete</span> <span>🔄 Update</span>	

*SSH access: ~# ssh maria\_silva@rnp@10.130.12.12 (password: your user password)*  
*SSH common details: to access as root just type **su** inside (password: **openflow**)*

**Fig. 5.** Área “Computational Resources”.

Para utilizar recursos OpenFlow, los experimentadores se lo deben añadir en sus *slices*, especificando un controlador de OpenFlow para el experimento. En el área de agregado OpenFlow de la página de administración del *slice* representado en la figura 6, es posible seleccionar los “data paths” disponibles en el *slice* (identificación y número de puerta) para definir los FlowSpaces para el experimento. Al iniciar el *slice*, un ID de VLAN específico es reservado para cada FlowSpace definido en el plano de datos. Cada máquina virtual instanciada tiene una interfaz dedicada que se encuentra conectada a la red del plano de datos.

Una vez seleccionados los FlowSpaces y creadas las máquinas virtuales, el usuario debe configurar la dirección IP para que coincida con la VM que alberga el controlador OpenFlow. Para llevar a cabo el experimento, el estudiante inicia el *slice* en la página de administración. Entonces, se desencadenará una solicitud de FlowSpace para los switches OpenFlow involucrados, asegurando que todas las VMs del *slice* estén activas.

Dentro del *slice*, el experimentador puede usar las máquinas virtuales como “end-hosts” y los FlowSpaces como la red del plano de datos. Los estudiantes pueden acceder a las VMs a través de SSH en la VPN del testbed FIBRE, utilizando sus nombres de usuario y contraseñas. Los estudiantes pueden instalar en las VMs cualquier controlador OpenFlow o software necesario para el experimento. Es válido mencionar que un conjunto de controladores OpenFlow se encuentran preinstalados en las imágenes de las VMs, pero los estudiantes tienen la opción de adicionar su propia implementación de controlador.

**• OpenFlow Aggregate: AM OF UFG ▲**

Name: **AM OF UFG**  
 Status: **✓**  
 Automatic approval: **✓**  
 Physical location: **Goiania**  
 Resources:

**Requested Flowspaces (3) ⓘ** [More information ▼](#)  
**Granted Flowspaces (3) ⓘ** [More information ▲](#)

FlowSpace	Associated OpenFlow Interfaces
VLAN ID: 102 - 102	OpenFlow Switch: 00:00:00:00:00:00:89:02 - Port 1 OpenFlow Switch: 00:00:00:00:00:00:89:02 - Port 4 OpenFlow Switch: 67:8c:08:9e:01:62:d6:42 - Port 26 OpenFlow Switch: 67:8c:08:9e:01:62:d6:42 - Port 48
VLAN ID: 101 - 101	OpenFlow Switch: 00:00:00:00:00:00:89:02 - Port 1 OpenFlow Switch: 00:00:00:00:00:00:89:02 - Port 4 OpenFlow Switch: 67:8c:08:9e:01:62:d6:42 - Port 26 OpenFlow Switch: 67:8c:08:9e:01:62:d6:42 - Port 48
VLAN ID: 100 - 100	OpenFlow Switch: 00:00:00:00:00:00:89:02 - Port 1 OpenFlow Switch: 00:00:00:00:00:00:89:02 - Port 4 OpenFlow Switch: 67:8c:08:9e:01:62:d6:42 - Port 26 OpenFlow Switch: 67:8c:08:9e:01:62:d6:42 - Port 48

Openflow controller: **tcp:10.136.12.89:6633**

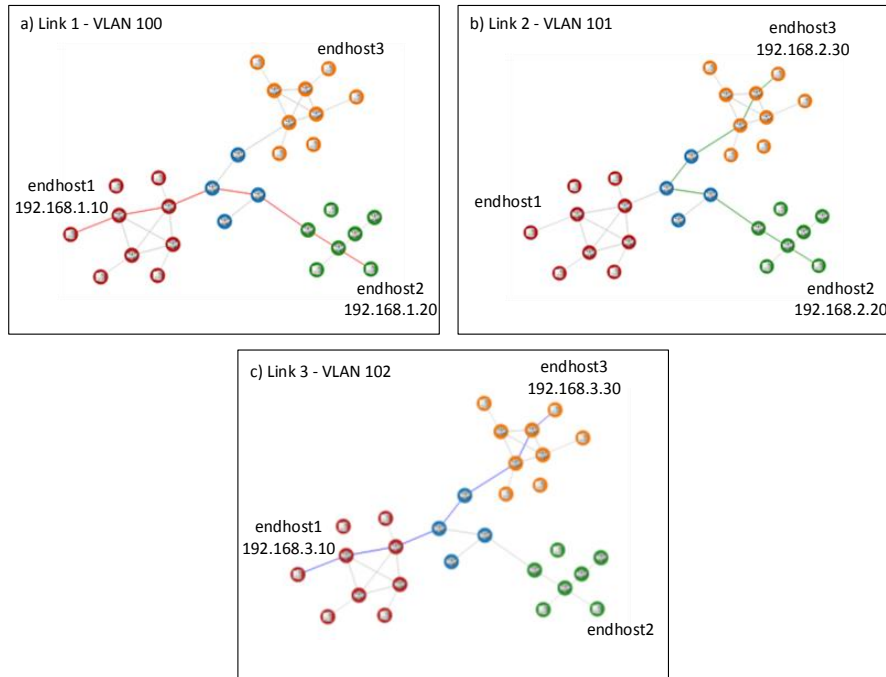
Actions:

Remove from slice:

Fig. 6. Área “OpenFlow Aggregate”.

### 4.3 Configurar la red y ejecutar el experimento

En esta sección, se describirán los procedimientos de configuración de red para el experimento de enrutamiento estático mostrado en la figura 3. En este experimento, se asignaron tres FlowSpaces y tres máquinas virtuales. La topología de cada FlowSpace reservado se muestra en la figura 7.



**Fig. 7.** La topología de red virtual del experimento.

Una máquina virtual adicional debe ser creada para albergar el controlador OpenFlow del experimento, como Floodlight [21], POX [22] o Ryu [23], actuando como un “learning switch L2”. Ese switch Nivel 2 (L2) aprende el mapeo entre direcciones MAC y puertas observando los paquetes. Si el switch ha visto un envío de paquete para un destino particular, el paquete es enviado para la puerta exacta; de lo contrario, se debe inundar todas las puertas con el paquete como hace un hub para averiguar el destino correspondiente.

Para configurar la red del plano de datos en las VMs instanciadas, el estudiante debe acceder a cada máquina virtual a través del plano de control IP y configurar la red virtualizada para el experimento, de acuerdo con la configuración que se muestra en la Figura 3. Por ejemplo, el Listado 1 muestra los pasos para configurar las interfaces de red, VLANs, IPs y el enrutamiento de la VM endhost1.

**Listado 1.** Configuración del endhost1 para el experimento de enrutamiento.

```

root@endhost1:~# vconfig add eth1 100
Added VLAN with VID == 100 to IF -:eth1:-
root@endhost1:~# ifconfig eth1 up
root@endhost1:~# ifconfig eth1.100 192.168.1.10
root@endhost1:~# vconfig add eth1 102
Added VLAN with VID == 102 to IF -:eth1:-
root@endhost1:~# ifconfig eth1.102 192.168.3.10

```

```
root@endhost1:~# route add -host 192.168.2.30 gw 192.168.1.20 eth1.100
```

Después de configurar la red de todos los endhosts, el experimentador debe activar el encaminamiento de paquetes en la VM del endhost2 con el comando que se muestra en el Listado 2.

**Listado 2.** Habilitando el encaminamiento de paquetes IP en la VM del endhost2.

```
root@endhost2:~# echo 1 > /proc/sys/net/ipv4/ip_forward
```

Por último, el experimentador puede verificar la exactitud de su configuración mediante el comando ping en la VM endhost1, como se describe en el Listado 3. Se puede observar que la latencia (RTT) del primer paquete es mayor debido al comportamiento del *learning switch* L2, que debe descubrir la puerta de forma dinámica.

**Listado 3.** Probando el experimento de enrutamiento.

```
root@endhost1:~# ping 192.168.2.30
PING 192.168.2.30 (192.168.2.30) 56(84) bytes of data.
64 bytes from 192.168.2.30: icmp_req=1 ttl=62 time=641 ms
64 bytes from 192.168.2.30: icmp_req=2 ttl=62 time=53.0 ms
...
```

A través de los procedimientos descritos en esta sección, los estudiantes y los profesores pueden usar el testbed FIBRE para asignar tanto las redes virtuales dedicadas como las máquinas virtuales necesarias. De esta manera, se puede configurar un experimento básico de enrutamiento de paquetes entre múltiples redes.

## 5 Observaciones finales

En este trabajo, se ha discutido el uso de plataformas de experimentación en Internet del Futuro para la enseñanza de redes de computadoras. La utilización de testbed en disciplinas académicas podrá aportar a la próxima generación de investigadores una mayor capacidad para lidiar con los nuevos modelos arquitectónicos de la red, así como con la continua evolución del Internet. Es importante tener en cuenta que la utilización de una plataforma a gran escala permite a los estudiantes simular una situación del mundo real, prescindiendo así de herramientas de software para simulación de redes en los laboratorios.

Actualmente, el testbed FIBRE abarca ocho universidades en Brasil, donde 25 de sus investigadores también actúan como profesores de redes de computadoras. En total, esos profesores imparten clases en 53 cursos diferentes de pregrado y posgrados. Un estudio realizado en octubre del 2014 reveló que sólo cuatro profesores utilizaban el testbed FIBRE en clases, pero la gran mayoría pretendían utilizarlo en un futuro. El nivel de madurez y para que eso acontezca es fundamental que la plataforma cuente con un buen nivel de madurez y soporte.

Con el fin de garantizar la sustentabilidad de infraestructuras a gran escala como el testbed FIBRE, una preocupación general es la de atraer a los usuarios. Aunque las plataformas de experimentación sean esenciales para la evolución del Internet, en general los usuarios no consumen la totalidad de su capacidad. La exploración de esta capacidad ociosa es importante para mejorar la educación de alumnos de redes de computadoras, como también para alcanzar una mejor comprensión de dicha materia y propiciar un aumento en el número de usuarios.

Un objetivo significativo para FIBRE es aumentar el apoyo a los educadores, siguiendo el ejemplo de GENI Education [16]. Algunas tareas se han previsto para apoyar el resultado de este objetivo, como son:

- Actividades de disertación dirigidas a los profesores, mostrándole como utilizar la opción de testbed en sus clases.
- Proporcionar un repositorio de actividades prácticas, es decir, ejercicios sugeridos que se podrían aplicar a los estudiantes en las clases.

La idea en general sería la construcción de una comunidad de educadores, proporcionándoles materiales didácticos para su uso en clase.

En última instancia, la difusión del uso de plataformas de experimentación para Internet del Futuro es también una forma de la sociedad hacer mejor uso de una gran inversión, normalmente hecha con recursos públicos.

## Referencias

1. GENI - Global Environment for Network Innovations, <http://www.geni.net/>, accessed on 29/7/2014.
2. AKARI project (2008), "New Generation Network Architecture: AKARI Conceptual Design" (ver1.1), [http://web.archive.org/web/20100414082316/http://akari-project.nict.go.jp/eng/concept-design/AKARI\\_fulltext\\_e\\_translated\\_version\\_1\\_1.pdf](http://web.archive.org/web/20100414082316/http://akari-project.nict.go.jp/eng/concept-design/AKARI_fulltext_e_translated_version_1_1.pdf), accessed on 29/7/2014.
3. FIRE - Future Internet Research and Experimentation, <http://cordis.europa.eu/fp7/ict/fire/>, accessed on 29/7/2014.
4. McKeown, N. et al. (2008), "OpenFlow: Enabling Innovation in Campus Networks", In: ACM SIGCOMM Computer Communication Review, Volume 38, Number 2, April 2008, p. 69-74.
5. Choudhury, N.M.M.K., and Boutaba, R. (2010), "A survey of network virtualization", In: Computer Networks, Volume 54, March 2010, p. 862-876.
6. GÉANT Testbeds, <http://www.geant.net/Innovation/Testbeds/Pages/Home.aspx>, accessed on 30/7/2014.
7. The Network Simulator - ns-2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>, accessed on 30/7/2014.
8. Cisco Packet Tracer, <https://www.netacad.com/web/about-us/cisco-packet-tracer>, accessed on 30/7/2014.
9. OMNeT++, <http://www.omnetpp.org/>, accessed on 30/7/2014.
10. FIBRE (Future Internet testbeds/experimentation between Brazil and Europe), <http://www.fibre.org.br>, accessed on 31/7/2014.
11. Calyam, P.; Seetharam, S.; Antequera, R.B., "GENI Laboratory Exercises Development for a Cloud Computing Course," Research and Educational Experiment Workshop (GREE), 2014 Third GENI, vol., no., pp.19,24, 19-20 March 2014.

12. Marquez-Barja, Johann M.; Jourjon, Guillaume; Mikroyannidis, Alexander; Tranoris, Christos; Domingue, John and DaSilva, Luiz A. (2014). FORGE: Enhancing elearning and research in ICT through remote experimentation. In: IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), 3-5 April 2014, Istanbul, Turkey.
13. Jain, R. The Art of Computer Performance Analysis. Wiley. 1991.
14. Emulab - Network Emulation Testbed, <http://www.emulab.net/>, accessed on 30/11/2014
15. Robert Ricci, "Evaluating Networked Systems" course. <http://www.flux.utah.edu/users/ricci/ens/>, accessed on 30/11/2014
16. GENI Education, <http://www.cs.unc.edu/Research/geni/geniEdu/modules.html>, accessed on 30/11/2014.
17. Azodolmolky, S., Nejabati, R., Peng, S., Hammad, A., Channegowda, M.P., Efstathiou, N., Autenrieth, A., Kaczmarek, P. and Simeonidou, D.. "Optical FlowVisor: An OpenFlow-based optical network virtualization approach," Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2012 and the National Fiber Optic Engineers Conference , 4-8, March 2012.
18. Rakotoarivelo, T., Ott, M., Jourjon, G., Seskar, I.: OMF: a control and management framework for networking testbeds, ACM SIGOPS Operating Systems Review archive, 43(4), 2010.
19. Augé, J., Parmentelat, T., Turro, N., Avakian, S., Baron, L., Larabi, M., Rahman, M., Friedman, T., Fdida, S..Tools to foster a global federation of testbeds. Computer Networks (special issue on Future Internet Testbeds). 2013.
20. Peterson, L., Ricci, R., Falk, A., Chase, J. (Eds.): Slice-Based Federation Architecture, draft (2010), <http://groups.geni.net/geni/attachment/wiki/SliceFedArch/SFA2.0.pdf> [Accessed November 2014]
21. Floodlight OpenFlow Controller. <http://www.projectfloodlight.org/floodlight/> [Accessed November 2014]
22. POX OpenFlow Controller <http://www.noxrepo.org/pox/about-pox/> [Accessed November 2014]
23. Ryu SDN Framework. <http://osrg.github.io/ryu/> [Accessed November 2014]
24. Sune, M., Bergesio, L., Woesner, H., Rothe, T., Kopsel, A., Colle, Puype, B., Simeonidou, D., Nejabati, R., Channegowda, M., Kind, M., Dietz, T., Autenrieth, A., Kotronis, V., Salvadori, E., Salsano, S., Krner, M., and Sharma, S., "Design and implementation of the OFELIA FP7 facility: The european openflow testbed", Computer Networks (special issue on Future Internet Testbeds) (2013), pp. 1389-1286.
25. Duerig, J., Ricci, R., Stoller, L., Strum, M., Wong, G., Carpenter, C., Fei, Z., Griffioen, J., Nasir, H., Reed, J. and Wu, X.. Getting Started with GENI: A User Tutorial. ACM SIGCOMM Computer Communication Review (CCR). 42, 1 (Jan 2012), 72-77.
26. GENI Wiki <http://groups.geni.net/geni> [Accessed November 2014]
27. Carlos Arteché González "Despliegue de una maqueta de red basada en OpenFlow", Proyecto fin de carrera, Universidad de Cantabria, Febrero 2014, 97p.
28. FIBRE's Zenoss. <http://mon.fibre.org.br:8080/> (user/password: guest/guest) [Accessed January 2015]
29. OpenFlow in Europe: Linking Infrastructures and Applications. <http://www.fp7-ofelia.eu/> [Accessed April 2015]
30. NITOS Wireless testbed. <http://nitlab.inf.uth.gr/NITlab/index.php/testbed> [Accessed April 2015]
31. edX Inc. <https://www.edx.org/> [Accessed April 2015]