

# El Papel de las Redes Superpuestas en la Evolución de la Arquitectura de Internet

Vicente Olmedo Fernández, Víctor Villagrà González, Encarna Pastor Martín, Julio Berrocal Colmenarejo  
Departamento de Ingeniería de Sistemas Telemáticos – Escuela Técnica Superior de Ingenieros de  
Telecomunicación – Universidad Politécnica de Madrid  
Tfno: +34 91 336 73 66 ext. 3024  
Fax: +34 91 336 73 33  
volmedo@dit.upm.es, villagra@dit.upm.es, encarna@dit.upm.es, berrocal@dit.upm.es

## Resumen

*Los requisitos sobre Internet no han evolucionado al mismo ritmo que lo ha hecho su arquitectura. Esto ha provocado problemas que, tradicionalmente, han sido solucionados mediante técnicas específicas orientadas a proporcionar funcionalidades que la propia arquitectura no podía ofrecer. Algunos de estos 'parches' se han aplicado sin el necesario análisis previo, violando así algunos de los principios originales. El resultado es una Internet que, con una arquitectura anquilosada y dañada, debe satisfacer necesidades que evolucionan rápidamente. Por supuesto, un rediseño completo de la arquitectura de Internet afectaría a su infraestructura, desplegada por todo el mundo, por lo que la implementación de tal cambio se antoja imposible en unos días en los que Internet está cada vez más modelada por los intereses económicos y menos influida por la investigación. Las redes superpuestas suponen una vía para validar nuevos conceptos arquitecturales, permitiendo al tiempo un despliegue progresivo de las innovaciones obtenidas.*

## 1. Introducción

Actualmente las comunicaciones se han extendido tanto que han pasado a ser algo cotidiano, un aspecto más que da forma a la sociedad actual. Esta tremenda evolución, inesperada en parte, ha integrado las comunicaciones en nuestras vidas hasta el punto de cambiar la manera en la que vemos y entendemos ciertos ámbitos de las mismas.

Puede parecer al usuario medio que la sociedad actual ha pasado a ser denominada *Sociedad de la Información* de la noche a la mañana, en un repentino y abrupto proceso en el que, sin duda alguna, los principales protagonistas son las redes IP y en especial la red Internet. Ciertamente, no hace mucho que puede decirse que los accesos de Banda Ancha se han extendido de forma casi general, acercando cada vez a más personas a la Red de redes. Sin embargo, el investigador, que ha seguido la pista del proceso evolutivo de las tecnologías de comunicación en general y de Internet en particular, sabe que el estado actual de las tecnologías no es algo milagroso, sino el fruto de una evolución lenta y gradual. Los estudios y las investigaciones dan sus frutos lentamente, tras múltiples etapas sucesivas de refinamiento, y las tecnologías Internet no son una excepción.

Por tanto, aunque los operadores y otros agentes comerciales han apostado definitivamente por Internet hace relativamente poco tiempo, la definición de las tecnologías involucradas tuvo lugar hace mucho tiempo. Se puede decir que los principios básicos que rigen el diseño de la red Internet, que componen su arquitectura, tenían hace más de treinta años el aspecto que aún hoy conservan [1].

Por supuesto, las redes no son un fin en sí mismas, sino que se crean con el objetivo de ofrecer ciertos servicios y de posibilitar ciertas aplicaciones de interés para algún colectivo. Las necesidades y requisitos que se imponen a Internet se formularon también hace treinta años, pero, a diferencia de su arquitectura, en la actualidad ya no son los mismos. La sociedad evoluciona, y lo que esperamos de la tecnología en sus diferentes facetas también debe hacerlo. Así pues, Internet, como el resto de tecnologías, debe evolucionar para seguir siendo de utilidad y cumplir sus objetivos, y lo ha hecho. Sin embargo, Internet no ha evolucionado como lo han hecho otras tecnologías. Sirva como ejemplo la telefonía móvil y, en general, cualquier tecnología de acceso. En un comienzo, la telefonía móvil era analógica y utilizaba la misma banda de frecuencias para emitir que para recibir la información, dando lugar a comunicaciones semidúplex. Tras ello, se implementaron comunicaciones dúplex, aunque aún analógicas, como era el caso del sistema de telefonía móvil AMPS en Estados Unidos. Cuando las limitaciones de este sistema se hicieron patentes, se implantó un nuevo sistema, GSM, basado en modulaciones digitales. Por supuesto, las nuevas tecnologías toman muchos de los principios de aquéllas que les preceden, pero suponen un cambio más o menos radical de la arquitectura. El usuario y el operador deben adquirir nuevos equipamientos y terminales si desean utilizar las nuevas tecnologías y beneficiarse de sus ventajas.

La evolución de Internet, sin embargo, no ha sido similar. Lo ideal hubiera sido plantear puntos de ruptura respecto a los principios originales con el fin de actualizarlos o enunciar otros distintos. De esta

forma, quedarían contemplados los nuevos objetivos y necesidades. En lugar de seguir este enfoque, se ha recurrido a una serie de sucesivos “parches”. Sobre IP, elemento inamovible e invariable de la tecnología Internet, se han ido aplicando incrementalmente nuevos elementos y tecnologías allí dónde ha sido necesario. Son varias las razones de que la evolución de Internet haya tenido esta forma.

En primer lugar, Internet nació como una red científica, los usuarios eran investigadores que la utilizaban para intercambiar conocimiento con sus colegas o como medio para facilitar y agilizar sus trabajos de investigación. Actualmente, los usos comerciales de la Red se multiplican y es imprescindible tener en cuenta la dimensión económica de Internet. La gran mayoría de los negocios dependen en mayor o menor medida de Internet y algunos de ellos se basan completamente en ella.

Por otra parte, la descentralización característica de la filosofía de Internet es también un aspecto que influye en la peculiar evolución de la Red. No existe una autoridad capaz de imponer los cambios necesarios en la arquitectura y las tecnologías involucradas. Estos cambios, por el contrario, requieren el consenso de los diferentes actores que componen la red, algo virtualmente imposible teniendo en cuenta el gran número de ellos.

El resultado es la “osificación” de la Red, tal y como apuntaba ya en 2001 el informe del *National Research Council* de Estados Unidos [2]:

*...las tecnologías exitosas y ampliamente adoptadas están sujetas a la osificación, que hace difícil introducir nuevas capacidades o, si la tecnología actual ha llegado a sus límites, sustituirla por algo mejor. Los actores industriales existentes no se ven motivados generalmente a desarrollar o implantar tecnologías disruptivas...*

La Internet actual consta de múltiples añadidos que tratan de cubrir necesidades que una tecnología que ya no da más de sí no puede cubrir por sí misma. La problemática y la preocupación aparecen cuando estos agregados violan los principios básicos impuestos por la arquitectura. Ocurre entonces que se rompe la filosofía básica original y se pierde el sustrato necesario para que aquellas aplicaciones, tanto maduras como incipientes, que se basan en él funcionen correctamente.

En la próxima sección se describirá la arquitectura de Internet y se revisarán los principios de diseño originales de la misma, para analizar los problemas más importantes a los que se enfrenta la red. A continuación se comentarán el concepto de red superpuesta, presentando la evolución del mismo hacia el concepto de virtualización aplicado a las arquitecturas de red. Tras ello, se detallarán dos propuestas, Internets Virtuales y PlanetLab, que

hacen uso de los conceptos presentados y se compararán entre sí, con el fin de comprobar las funcionalidades que ofrecen ambas plataformas. Finalmente, se destacarán los aspectos más importantes del papel de estas nuevas arquitecturas en el futuro de la Internet actual, describiendo el posible aspecto de dicho futuro a modo de conclusiones.

## **2. La arquitectura de Internet**

Para comprender los retos a los que se enfrenta la Internet actual es imprescindible analizar los principios que rigen su arquitectura, con el fin de comprobar las limitaciones a las que está sujeta y los problemas que pueden surgir a raíz de las mismas.

### **2.1. El concepto de “Arquitectura de Red”**

La noción de arquitectura de red fue introducida por primera vez en los años 70, durante la investigación de lo que luego sería la Internet actual. El concepto nace de aplicar a la comunicación entre ordenadores los principios que se manejaban en el diseño software y hardware convencional. De forma genérica, la arquitectura de un sistema consiste en una serie de principios básicos de diseño de alto nivel que orientan el diseño técnico posterior, asentando las bases y guías fundamentales que darán forma al sistema final.

En el caso concreto de las arquitecturas de red, estos principios básicos se aplican a los protocolos y algoritmos que permitirán la comunicación. Típicamente, una arquitectura de red definirá aspectos tales como dónde se mantiene el estado, la forma de designar las entidades involucradas, cómo se lleva a cabo el encaminamiento, cómo se estructuran las diferentes funciones de comunicación o cómo se implementan mecanismos de calidad de servicio.

Los principios abstractos que forman la arquitectura de red no imponen un diseño técnico concreto. Normalmente, múltiples diseños pueden satisfacer de igual forma una misma arquitectura. La arquitectura es, por tanto, una colección de ideas que aseguran la cohesión e interoperabilidad de todos aquellos elementos cuyos diseños respetan dicha arquitectura. Cuando dichos principios básicos se rompen, se pierde la homogeneidad y comienzan los problemas, la complejidad aumenta exponencialmente, al tiempo que la flexibilidad y la manejabilidad de los sistemas disminuye.

### **2.2. Principios básicos en la arquitectura de Internet**

En el caso concreto de Internet, la arquitectura recoge los siguientes principios básicos [3]:

- La red no es más que una infraestructura de reenvío de paquetes no orientado a conexión. La “inteligencia” se sitúa en los extremos de la red.
- Dicha infraestructura consta de un servicio mínimo de envío de datos a nivel de red,

complementado con diferentes servicios extremo a extremo implementados en la capa de transporte.

- Las entidades conectadas son designadas mediante direcciones, cantidades numéricas de longitud fija, jerarquizadas de forma sencilla (red, equipo final).
- Las direcciones se aplican a interfaces de red, por lo que un mismo nodo puede tener varias direcciones.

La arquitectura de Internet gira en torno a la idea fundamental del argumento extremo a extremo [4]. Situar las aplicaciones en los extremos de la red proporciona un núcleo escalable y muy flexible, apto para ser adaptado con posterioridad a las nuevas necesidades conforme éstas vayan surgiendo.

### 2.3. El futuro de la Red

A lo largo del tiempo, los requisitos iniciales que se tuvieron en cuenta en el diseño de Internet han dado paso a otros nuevos al ritmo que han cambiado las necesidades de los diferentes usuarios de la misma. Conforme surgían problemas debido a las limitaciones iniciales de la arquitectura, se han elaborado también soluciones. Así, la Internet se resiente debido sobre todo a la avanzada edad de los requisitos originales que moldearon su diseño, enfrentándose actualmente a problemas impensables hace treinta años, como la escasez de direcciones, la ausencia de mecanismos de calidad de servicio o la imposibilidad de soportar la movilidad de los equipos.

El hecho de que el corazón de la red se mantenga tal y como se definió entonces se debe a la forma de solucionar los problemas en la Red. Como se comentaba anteriormente, en el caso de Internet, como tecnología madura y ampliamente utilizada (y, por ende, muy comercializada), es muy complicado incorporar cambios radicales, por lo que se recurre a extensiones que solventan de forma puntual problemas concretos. Esta filosofía no es, a priori, errónea, puesto que permite una mejora gradual y poco traumática, ya que generalmente se mantiene la compatibilidad hacia atrás. El problema aparece cuando estos añadidos se hacen sin un mínimo control que asegure que no se violan los principios de diseño fundamentales definidos en la arquitectura. La descentralización de Internet hace imposible que exista una figura que aplique dicho control.

Así, de entre los diferentes añadidos, pueden diferenciarse aquellos que respetan la arquitectura original y se alinean con ella y aquellos que interfieren con los enunciados originales y que, por ello, son fuentes potenciales de problemas. En el primer grupo pueden destacarse, por ejemplo, tecnologías como IntServ y DiffServ, que proporcionan mecanismos para gestionar la calidad de servicio. En el segundo grupo cabe destacar los NAT (*Network Address Translator*) y los *firewalls*.

Tanto unos como otros tratan de dar respuesta a necesidades lícitas que la arquitectura por sí misma no es capaz de satisfacer (la escasez de direcciones y la seguridad, respectivamente), pero lo hacen de forma poco respetuosa para con la arquitectura. La forma actual de la Internet es la de un conjunto básico de tecnologías exprimidas al límite y extendidas puntual y, a veces, despreocupadamente.

Es bastante obvio que, a estas alturas, la mejor forma de atajar los problemas inherentes a la red sería revisar por completo la arquitectura. Por supuesto, en el mejor de los casos la definición de una nueva arquitectura sólo supondría actualizar el software de los diferentes elementos de la red, y aún esto es una tarea impensable. No es posible detener la Red. Por tanto, es necesario que la solución propuesta pueda ser desplegada de forma progresiva, permitiendo una migración gradual a la nueva arquitectura, y es aquí donde las redes superpuestas pueden ser de gran utilidad. Además, dichas redes pueden permitir probar los nuevos conceptos arquitecturales y las tecnologías involucradas en entornos más próximos a la realidad que los que pueden conseguirse mediante simulación, con el fin de comprobar su idoneidad antes de ser desplegadas.

## 3. Las redes superpuestas

Una red superpuesta (o red *overlay*) es una red de nodos que ejecutan una tecnología o aplicación que impone sus propios mecanismos y algoritmos de encaminamiento, siendo estos independientes del encaminamiento de la red física subyacente. De esta forma, la aplicación puede dar lugar a una topología lógica que difiera de la física. Entre otras cosas, esta técnica permite implementar fácilmente redes de pruebas sobre equipamiento de red existente y en funcionamiento, sin interferir con el software o con otras aplicaciones que estén funcionando en dicho equipamiento. Últimamente, el concepto de red superpuesta ha sido utilizado por algunas aplicaciones para optimizar el encaminamiento conforme a criterios diferentes de los que usa la red física.

### 3.1. Origen y evolución

El concepto de red superpuesta no es nuevo, si bien ha ido evolucionando con el transcurso del tiempo. Así, las redes superpuestas se utilizaron en una primera instancia como entornos de prueba. Desplegando una red superpuesta sobre la red física disponible, podían probarse nuevos algoritmos de encaminamiento o nuevos protocolos sin necesidad de configurar especialmente los equipos de red. Esto permitía, por un lado, que la red física siguiese ejecutando sus funciones habituales y, por otro, utilizar equipos que no estaban preparados específicamente para la nueva funcionalidad que se deseaba probar.

La primera red superpuesta propiamente dicha fue MBone [5], desplegada con objeto de probar diversos algoritmos de encaminamiento multipunto

para soportar difusión de audio y vídeo. Otro ejemplo de overlay para pruebas es el 6Bone [6], que define un esquema de direccionamiento alternativo que permite probar IPv6 sobre una red IPv4, que fue “apagado” recientemente (el 6 de Junio de 2006) tras realizar las pruebas establecidas.

Tras las primeras utilizaciones del concepto de red superpuesta, surgieron otras propuestas que hacían uso de la misma idea, aunque con un objetivo distinto. Generalmente, estas nuevas redes overlay pretendían optimizar aspectos concretos de la red, extendiendo capacidades específicas de la arquitectura física en escenarios donde dichas capacidades eran de especial relevancia. En este grupo pueden encontrarse las RONS (*Resilient Overlay Networks*) [7] o las Redes Privadas Virtuales (*Virtual Private Networks*) [8]. Las primeras modifican el encaminamiento de la red con el fin de aumentar la fiabilidad de la misma, incorporando mecanismos de encaminamiento capaces de reaccionar en breves lapsos de tiempo ante caídas de enlaces y/o routers, reconfigurando la red de la forma necesaria. Las VPNs utilizan túneles IP para crear una subred privada virtual sobre una infraestructura de red pública. En estas redes, el concepto de red superpuesta se aplica con el fin de proporcionar un servicio, y no simplemente con objeto de crear un escenario de pruebas, mediante una infraestructura desplegada sobre la infraestructura física de Internet.

La tendencia actual es trasladar los conceptos de las redes overlay a las arquitecturas P2P. En la mayor parte de dichas arquitecturas, la importancia de las entidades interconectadas no depende de factores como la localización geográfica o la capacidad de proceso, sino de los contenidos que puedan encontrarse en ellas. Es por esto que los algoritmos de búsqueda, que permiten determinar en qué elemento de la red puede encontrarse un contenido concreto, son una parte crítica de estas tecnologías. El objetivo, entonces, es desplegar la red como una red superpuesta a la red física y diseñar los algoritmos y mecanismos de encaminamiento de tal forma que se optimicen las búsquedas de los contenidos dentro de la red. Teniendo en cuenta la información que contiene cada máquina, se define una topología lógica que hará más eficientes los algoritmos de búsqueda cuando se apliquen posteriormente. En esta categoría pueden encontrarse numerosas tecnologías, como Chord [9], Pastry [10], Viceroy [11], etc.

Pero si las redes superpuestas pueden ser de utilidad en la evolución de la arquitectura de Internet es gracias a tendencias paralelas a las mencionadas anteriormente que plantean el concepto de red overlay desde un punto de vista genérico, implementando arquitecturas de red virtual no específicas ni orientadas a un aspecto concreto de la red. Esta visión de la idea de red superpuesta da lugar al concepto de *virtualización*.

### 3.2. Virtualización

Hasta ahora las redes overlay siempre servían a objetivos específicos o suponían la construcción de arquitecturas bien definidas sobre la Internet. En todas las tecnologías de red superpuesta se define una nueva arquitectura, con esquemas de direccionamiento y mecanismos de encaminamiento propios. Sin embargo, existe una tendencia muy interesante en este campo hacia la *virtualización*.

Virtualización es un concepto general y relativamente antiguo aplicable a muchos campos, y no sólo al ámbito de las redes de comunicaciones. Mucho antes de que se aplicase en éstas, se crearon, por ejemplo, sistemas de memoria virtual y máquinas virtuales para lenguajes de programación y para emular hardware. En esencia, virtualizar un elemento consiste en ofrecer sus capacidades, abstrayendo las capacidades físicas subyacentes y ofreciéndolas al usuario del elemento virtual. En el caso de la memoria virtual, esto permite ofrecer más memoria de la que hay realmente disponible.

Cuando el concepto de virtualización se aplica a los elementos de una red, es posible ofrecer un conjunto de routers y hosts virtuales. Por supuesto, la forma en que éstos se virtualizan es configurable, por lo que estos elementos podrán tener las capacidades que se deseen para cada escenario concreto. Una vez que se configura la virtualización y se lleva a cabo, se dispone de una red superpuesta a la red física sobre la que podrá implementarse una arquitectura cualquiera [12].

Como se ve, existe una ligera divergencia respecto del concepto clásico de red superpuesta en el sentido de que no se ofrece una red virtual con determinadas características u optimizada para favorecer aspectos concretos, sino que se proporciona una red virtual “limpia” sobre la que desplegar arquitecturas y/o servicios cualesquiera, sin interferir, por supuesto, en el correcto funcionamiento de la red física subyacente.

Este concepto puede así ser de gran utilidad a la hora de estudiar y probar el comportamiento de nuevas arquitecturas o servicios, lo cual será un paso fundamental para la definición de una nueva arquitectura para Internet.

## 4. Dos ejemplos: Internet Virtual y PlanetLab

Las dos propuestas que se presentan a continuación hacen uso del concepto de virtualización. No ofrecen una funcionalidad concreta ni proporcionan redes superpuestas especializadas, sino que despliegan una infraestructura de red virtual que puede utilizarse como escenario de despliegue de conceptos de red innovadores.

### 4.1. Internet Virtual

En la propuesta para arquitecturas de Internet Virtual [13] se aplica el concepto de virtualización a cada elemento de la red Internet para obtener una red superpuesta cuya arquitectura es idéntica a la de la

red física. La red virtual cuenta con routers, hosts y enlaces virtuales, los mismos elementos que Internet. Además, se utilizan también el mismo esquema de direccionamiento y los mismos mecanismos de encaminamiento.

De esta forma, se consigue una red superpuesta idéntica en funcionalidad a la Internet subyacente, cuya topología puede ser definida según las necesidades de cada escenario de aplicación. Como se ve en la Figura 1, a partir de una misma topología física puede obtenerse la topología lógica que mejor se adapte a las aplicaciones que se deseen desplegar sobre la infraestructura superpuesta.

Para conseguir la red virtual superpuesta cada elemento de la red ejecuta un software que afecta al encaminamiento de tal forma que un mismo equipo puede:

- Formar parte de más de una red superpuesta a la vez (conurrencia), permitiendo que los recursos se repartan entre diferentes redes virtuales.
- Participar varias veces en la misma red virtual (recurrencia), lo cual posibilita la creación de redes virtuales con un número mayor de elementos que la red física de partida.
- Utilizar sus capacidades virtuales para dar lugar a nuevos elementos virtuales superpuestos (recursividad), posibilitando la construcción de redes superpuestas sobre otras redes superpuestas.

Las Internets Virtuales se construyen a partir de túneles IP sobre IP. No se trata de túneles convencionales, puesto que se hace uso de encapsulación de dos niveles con el fin de virtualizar también el nivel de enlace, permitiendo así la recurrencia. Así, esta propuesta no proporciona una red específica o especializada, pero asume el uso de IP como protocolo de transporte en la red virtual.

Una de las ventajas de las redes superpuestas basadas en esta tecnología es que el autor de la propuesta ha desarrollado también un sistema software de creación y mantenimiento de las overlays denominado X-Bone [14]. Gracias a dicha herramienta, las redes virtuales pueden ser configuradas y desplegadas rápidamente, siendo también posible modificar fácilmente la topología de

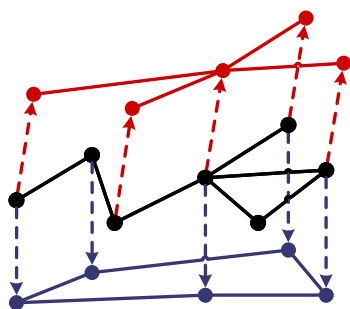


Figura 1 – Las Internets Virtuales permiten múltiples topologías IP lógicas a partir de una física

las mismas en caso necesario.

En las Internets Virtuales, puesto que se virtualiza completamente la arquitectura de Internet, los protocolos y aplicaciones diseñados para ella funcionarán sin cambios sobre la red virtual superpuesta. De esta forma, esta tecnología posibilita la creación de escenarios y entornos de prueba para nuevos servicios que vayan a desplegarse luego sobre la Internet real.

#### 4.2. PlanetLab

PlanetLab [15] es otro ejemplo de tecnología que permite virtualizar los elementos de red para crear redes superpuestas no especializadas. Su arquitectura se basa en dos elementos clave: los Monitores de Máquinas Virtuales (*Virtual Machine Monitors – VMM*) y los Servicios de Gestión (*Management Service*). Los VMM se ejecutan en cada nodo y proporcionan la interfaz de acceso a los recursos lógicos del mismo. Las aplicaciones que se ejecuten sobre la red superpuesta verán los recursos virtuales en lugar de los físicos a través de la interfaz que ofrece el VMM. Por otra parte, los Servicios de Gestión se utilizan para controlar la red superpuesta, descubriendo los nodos que participan en la misma, monitorizando su funcionamiento y actualizando el software que se ejecuta en los mismos.

Sobre la plataforma ofrecida por PlanetLab pueden desplegarse múltiples redes superpuestas. Los nodos son virtualizados para dividir sus recursos entre los diferentes nodos virtuales, por lo que cada overlay posee sus propios recursos, tal y como se defina para la misma, y no es interferida por el funcionamiento de otras redes superpuestas sobre el mismo nodo. Esta división y separación de los recursos de cada overlay se conoce como *slice* y se realiza mediante mecanismos implementados a nivel de sistema operativo en cada elemento de la red.

Aunque PlanetLab es una tecnología basada también en el concepto de red overlay, difiere de otras tecnologías en sus fines. No sólo se pretende ofrecer la posibilidad de construir entornos para probar nuevas arquitecturas o servicios, sino que pretende ser también una forma de ofrecer dichos servicios a usuarios finales. La idea de PlanetLab no es sólo participar en la prueba de nuevas aplicaciones, sino también en el despliegue y uso de las mismas. Por tanto, el reto de esta tecnología es diseñar una arquitectura de virtualización y redes superpuestas que permita conjugar la visión de los investigadores y de los desarrolladores. Esta filosofía da lugar a los principios de diseño siguientes [15][16]:

- Virtualización distribuida: Existe la posibilidad de dividir los recursos de cada nodo y repartirlos entre las diferentes redes superpuestas en las que dicho nodo está participando. Cada aplicación se ejecuta en un *slice* de la red superpuesta sin interferir con otras aplicaciones que puedan estar ejecutándose en el mismo nodo.

- Control distribuido de los recursos: PlanetLab implementa una estructura de control distribuida, basada en un conjunto mínimo de políticas comunes para todos los nodos que luego y complementada después mediante políticas locales en cada uno de ellos.
- Gestión descentralizada: En lugar de recurrir a un servicio único que gestione toda la red superpuesta, la arquitectura contempla la presencia de múltiples de estos servicios de gestión. Cada servicio estará encargado de controlar una de las diferentes *slices* que se ejecutan simultáneamente sobre la plataforma.
- Interfaces centradas en las aplicaciones: Con el fin de promover el desarrollo y despliegue de aplicaciones sobre PlanetLab, la red superpuesta debe ofrecer Interfaces de Programación de Aplicaciones (APIs) eficientes y atractivas para el programador, que abstraigan y faciliten el acceso a los recursos virtuales.

PlanetLab lleva un paso más allá el concepto de virtualización. En realidad, aunque el resultado de aplicar esta tecnología es una red superpuesta, la libertad del investigador sobre dicha red es total, puesto que ni siquiera se impone una arquitectura de red. Es decir, sobre la red virtual resultante es posible probar arquitecturas de red completas, desde los protocolos de enlace hasta las aplicaciones.

#### 4.3. Similitudes y diferencias

Las propuestas presentadas son dos ejemplos de aplicación del concepto de virtualización a redes de comunicaciones, en concreto a la red Internet. Ambas suponen una generalización del concepto de red superpuesta en la medida en que no dan lugar a redes overlay especializadas, sino a arquitecturas genéricas. Sin embargo, el nivel de generalización de ambas es diferente.

Por un lado, la arquitectura de Internets Virtuales propuesta es un primer paso hacia la virtualización de los elementos de la red, puesto que, aunque da lugar a una red virtual genérica, se define una arquitectura para la misma (la arquitectura de Internet). En cierto modo, este aspecto limita la flexibilidad de la plataforma resultante, en las que se asume el uso de IP como protocolo de transporte.

En este sentido, PlanetLab supone un mayor grado de virtualización, al no imponer siquiera una arquitectura para la red superpuesta. Simplemente se virtualizan los recursos de red. De esta forma, sería posible probar sobre PlanetLab arquitecturas completas, que definan incluso nuevos protocolos de enlace y de transporte, lo cual no puede hacerse mediante Internets Virtuales.

Otra diferencia fundamental entre estas dos tecnologías se refiere a su visión inicial. Mientras que la Internet Virtual pretende desplegar redes superpuestas a pequeña y mediana escala, más cercana al concepto clásico, PlanetLab persigue la creación de un entorno a escala global, de forma que

se obtenga una infraestructura virtual lo más fiel posible a la Internet. Ante la importancia de este aspecto, los creadores de la Internet Virtual y X-Bone han desarrollado una propuesta para la aplicación de esta arquitectura a escala global, que han denominado Global X-Bone o GX-Bone [17].

Ambas tecnologías tienen sus bondades y sus debilidades, y su aplicación a un escenario concreto ha de ser valorada conforme a las peculiaridades del mismo. Teniendo en cuenta el caso particular de su aplicación para la superación de los obstáculos a los que se enfrenta Internet y la evolución de su arquitectura de forma gradual y abordable, será más adecuada aquella que ofrezca la mayor flexibilidad y funcionalidad, tanto para los investigadores como para los agentes comerciales involucrados. Estas consideraciones sitúan a PlanetLab como clara candidata, al orientarse no sólo a las tareas de investigación, sino también al despliegue progresivo e incluso la explotación final de los resultados y productos obtenidos.

#### 5. Conclusiones

Aunque probablemente la mejor solución para superar la osificación de la red y dotar a la Internet de una arquitectura fresca y flexible, adaptada a las necesidades y tendencias actuales, sería definir una nueva arquitectura basada en la anterior pero también muy diferente, no es probable que los diferentes actores económicos que participan en la Red lleguen jamás al consenso necesario para abordar un cambio tan radical y significativo.

Las arquitecturas virtuales superpuestas pueden suponer una gran herramienta para probar nuevos conceptos arquitecturales y aplicaciones a partir de la infraestructura física actual. Las redes virtuales permitirán no sólo probar las innovaciones desde un punto de vista estrictamente investigador, tratando de comprobar su comportamiento y de medir su eficiencia, sino también observar, antes de su puesta en producción, la aceptación de las mismas por parte de los clientes potenciales. Podría incluso llegarse a utilizar la infraestructura virtual como medio de despliegue comercial de la nueva aplicación o servicio. Es imprescindible dotar a estas tecnologías de esta dimensión económica, que es ya una realidad en la Internet, puesto que sin ella no podrán dar cabida a todos los elementos de la red que pretenden emular. Por esto, aunque la complejidad sea un claro inconveniente de PlanetLab frente a las Internets Virtuales cuando lo que se desea es un entorno de pruebas de tamaño medio basado en IP, un planteamiento como el de PlanetLab se muestra como la alternativa más conveniente en la renovación de la arquitectura de Internet, al incluir esta importante faceta económica.

Por tanto, en un futuro las redes superpuestas emularán de tal forma a la Internet que englobarán no sólo a los investigadores, sino también a los desarrolladores de aplicaciones y a los clientes

potenciales de las mismas. Podrán probarse nuevas aplicaciones, pero también podrán venderse nuevos servicios. En cierto modo, podría plantearse entonces que en un escenario de estas características ya se habría alcanzado la transición hacia una nueva arquitectura para la Internet, convirtiendo la red superpuesta en un fin en sí misma. Sin embargo, será necesario analizar cuidadosamente si los inconvenientes que suponen este tipo de redes (rendimiento, escalabilidad...) están a la altura de las necesidades impuestas sobre ellas o, por el contrario, las convierten en un “parche” más construido sobre la Internet y cuya finalidad sea únicamente la de retrasar el momento en el que un cambio radical de la Red sea inevitable.

### Agradecimientos

Los autores desearían agradecer la colaboración de Alfonso Sánchez-Macián por el tiempo empleado en la revisión de este trabajo y por sus útiles comentarios.

### Referencias

- [1] R. Braden, D. Clark, S. Shenker, and J. Wrocalwski. “Developing a Next-Generation Internet Architecture”. Internal Whitepaper, MIT Laboratory of Computer Science. Julio 2000.
- [2] U. S. National Research Council. “Looking Over the Fence at Networks”. National Academy Press. 2001. Washington D.C.
- [3] B. Carpenter. “RFC 1958 – Architectural Principles of the Internet”. Internet Architecture Board. Junio 1999.
- [4] J. H. Saltzer, D. P. Reed, D. D. Clark. “End-To-End Arguments in System Design”. ACM Transactions on Computer Science, Vol. 2, Nº 4. Noviembre 1984.
- [5] H. Eriksson. “MBONE: The Multicast Backbone”. Communications of the ACM, Vol. 37, Nº 8, págs. 54-60. Agosto 1994.
- [6] The Old 6Bone Home Page. [www.6bone.net/old\\_6bone\\_home\\_page.html](http://www.6bone.net/old_6bone_home_page.html)
- [7] D. Andersen, H. Balakrishnan, F. Kaashoek, R. Morris. “Resilient Overlay Networks”. 18<sup>th</sup> ACM Symposium on Operating Systems Principles (SOSP). Banff, Canada. Octubre 2001.
- [8] D. Fowler. “Virtual Private Networks: Making the Right Connection”. Morgan Kauffmann Publishers. California. 1999.
- [9] I. Stoica et al. “Chord: A Scalable Peer-to-Peer Lookup Service for Internet Applications”. Procs. of the ACM SIGCOMM, ACM Press, págs. 149-160. 2001.
- [10] A. Rowstron, P. Druschel. “Pastry: Scalable, Distributed Object Location and Routing for Large-Scale Peer-to-Peer Systems”. Procs. of the International Conference on Distributed Systems Platforms (Middleware), págs 329-350. 2001.
- [11] D. Malki, M. Naor, D. Ratajczak. “Viceroy: A Scalable and Dynamic Emulation of the Butterfly”. Procs. of the ACM Principles of Distributed Computing, ACM Press, págs.183-192. 2002.
- [12] L. Peterson, S. Shenker, J. Turner. “Overcoming the Internet Impasse through Virtualization”. Procs. of the 3<sup>rd</sup> Workshop on Hot Topics in Networks (HotNets-III). Noviembre 2004.
- [13] J.D. Touch et al. “A Virtual Internet Architecture”. ACM SIGCOMM Workshop on Future Directions in Network Architecture. Karlsruhe, Alemania. 2003.
- [14] J. Touch. “Dynamic Internet Overlay Deployment and Management Using the X-Bone”. Computer Networks, págs. 117-135. Julio 2001.
- [15] L. Peterson et al. “A Blueprint for Introducing Disruptive Technology into the Internet”. First Workshop on Hot Topics in Networking (HotNets-I). Octubre 2002.
- [16] L. Peterson, T. Roscoe. “The Design Principles of PlanetLab”. Operating Systems Review, Vol. 40, Nº1, págs. 11-16. Enero 2006.
- [17] J. Touch et al. “A Global X-Bone for Network Experiments”. Procs. of the IEEE Tridentcom 2005, págs. 194-203. Trento, Italy. Marzo 2005.