



UNIVERSIDAD  
**COMPLUTENSE**  
MADRID

Proyecto de Innovación

Convocatoria 2023/2024

Nº de proyecto: 363

Virtualización de las prácticas de Redes mediante GNS3 y  
contenedores

Responsable del proyecto:

Juan Carlos Fabero Jiménez

Facultad de Informática

Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática



# Índice

<b>1. Objetivos propuestos</b>	<b>1</b>
<b>2. Objetivos alcanzados</b>	<b>2</b>
<b>3. Metodología empleada</b>	<b>2</b>
<b>4. Recursos humanos</b>	<b>3</b>
<b>5. Desarrollo de actividades</b>	<b>4</b>
5.1. Resultados y productos . . . . .	4
<b>6. Anexos</b>	<b>5</b>
6.1. RED . . . . .	5
6.1.1. Práctica 1. Introducción al entorno de laboratorio y configuración básica de la interfaz Ethernet. . . . .	5
6.1.2. Práctica 2. Encaminamiento IP, subredes y fragmentación . . . . .	6
6.1.3. Práctica 3. Protocolos de transporte UDP y TCP . . . . .	7
6.1.4. Práctica 4. Práctica final para evaluación del laboratorio . . . . .	7
6.2. AR . . . . .	8
6.2.1. Introducción al Laboratorio . . . . .	8
6.2.2. IPv6 . . . . .	9
6.2.3. Servicio de nombres DNS . . . . .	9
6.2.4. Protocolo DHCP . . . . .	10
6.2.5. Encaminamiento interno: RIP y OSPF . . . . .	10
6.2.6. Encaminamiento externo: BGP . . . . .	10
6.2.7. Seguridad en redes: cortafuegos . . . . .	11
6.3. RNG . . . . .	12
6.3.1. IPv6 . . . . .	12
6.3.2. Encaminamiento interior: OSPF . . . . .	12
6.3.3. Encaminamiento exterior: BGP . . . . .	13
6.3.4. Encaminamiento troncal: MPLS . . . . .	14
6.3.5. Redes definidas por software: SDN . . . . .	14
6.3.6. Encaminamiento multicast . . . . .	16
6.3.7. Voz sobre IP: VoIP . . . . .	17



## 1. Objetivos propuestos en la presentación del proyecto

Las máquinas virtuales VirtualBox resultan muy pesadas en cuanto a recursos, lo que limita el número de nodos que se pueden desplegar en la topología y, por tanto, la complejidad de las prácticas que se pueden desarrollar. Por otro lado, las máquinas User-Mode-Linux (uml) son muy ligeras, pero no disponen de entorno gráfico, sólo modo consola. En ambos casos, la definición de la topología de red, es decir, cómo están conectados los nodos entre sí, se debe hacer mediante ficheros de configuración, lo que dificulta la visualización por parte de los estudiantes. Esto es una grave limitación que pretende ser solventada con el presente proyecto.

Existen simuladores de red, como PacketTracer, de carácter privativo, que no resultan adecuados por su elevado coste en licencias de uso y, además, presentan limitaciones en cuanto a su funcionamiento.

El software GNS3 (Graphical Network Simulator 3, <https://www.gns3.com>) permite definir topologías de red de forma gráfica e intuitiva. Además, aunque en un principio nació con la intención de simular sistemas de red completos mediante la emulación de procesadores con arquitectura MIPS, en las últimas versiones ha sido dotado de la capacidad de gestionar también máquinas virtuales con distintas tecnologías como VirtualBox, VMWare o Qemu.

Aunque como se ha mencionado, estas máquinas virtuales son demasiado pesadas como para permitir despliegues complejos, GNS3 también soporta la incorporación de contenedores (dockers).

Por tanto, usando GNS3 podremos, por una parte, facilitar la tarea de definir topologías de red a través de una interfaz gráfica, lo que facilitará que los estudiantes entiendan el modo en que se conectan e interactúan los distintos nodos de la red y, por otra parte, al usar contenedores ligeros en recursos, al estilo de las máquinas uml, realizar prácticas de complejidad suficiente como para poner de manifiesto los conceptos que se manejan en las asignaturas de redes de computadores de la Facultad de Informática.

De esta manera, se propusieron los siguientes **objetivos**:

1. Desarrollo de un entorno gráfico para la realización de las prácticas de redes de computadores en la Facultad de Informática.
2. Utilización de contenedores (dockers) ligeros y creados ad-hoc para las prácticas de las diversas asignaturas.
3. Desarrollo de manuales que faciliten al alumno la realización de las prácticas.
4. Favorecer la iniciativa del alumno para que éste aporte su creatividad en la definición de topologías y nuevas prácticas.

## 2. Objetivos alcanzados

Podemos decir que se han cumplido todos los objetivos propuestos en el proyecto. A continuación pasamos a detallar los hitos conseguidos:

- Se han generado los contenedores apropiados para la realización de las prácticas en las diferentes asignaturas. No se ha partido de una imagen de DockerHub, sino que han sido creados *ad-hoc*.
- Se ha elaborado un guion sobre la metodología necesaria para la creación de los contenedores. Esto es algo que no se encontró en su momento en la literatura disponible.
- Se han adaptado las prácticas de las distintas asignaturas al nuevo entorno basado en GNS3.
- Se han elaborado los guiones de prácticas correspondientes.

Cabe mencionar que se ha contado con la realimentación por parte de los estudiantes en cuanto a la facilidad o no de uso del nuevo entorno, y todas las respuestas han sido muy positivas. Por tanto, podemos afirmar que el Proyecto ha cumplido su cometido principal, que era el de facilitar el desarrollo de las prácticas de Redes en la Facultad de Informática.

## 3. Metodología empleada en el proyecto

Durante el desarrollo del proyecto se han mantenido reuniones de coordinación entre los responsables de cada módulo.

Se ha seguido un ciclo de realimentación continua entre las fases de análisis, desarrollo y prueba, como se muestra en la Figura 1. De forma casi paralela se iban escribiendo los manuales de uso de los dispositivos y de prácticas.

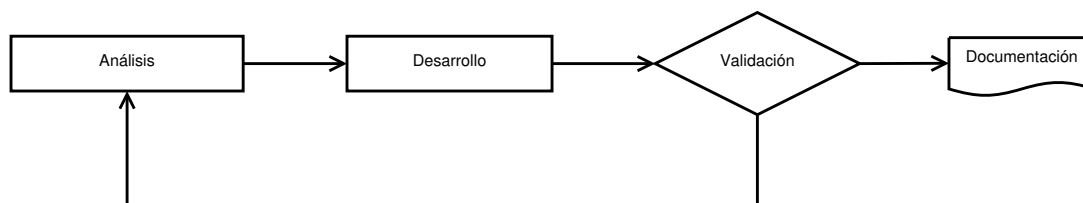


FIGURA 1: Ciclo de desarrollo.

#### 4. Recursos humanos

Todos los miembros del equipo son expertos en la materia de Redes de Computadores.

- Rubén Santiago Montero es profesor Titular de Universidad y ha impartido las asignaturas relacionadas: Redes de los Grados en Ingeniería Informática, en Ingeniería de Computadores, en Ingeniería de Software y en Desarrollo de Videojuegos, Ampliación de Sistemas Operativos y Redes (ASOR) del Grado en Ingeniería Informática, y Administración de Sistemas y Redes del Grado en Ingeniería del Software. En el proyecto ha coordinado el Módulo 1 de utilización del entorno GNS3. También ha creado la máquina virtual VirtualBox que se ha empleado como entorno de pruebas.
- Juan Carlos Fabero es profesor Contratado Doctor y ha impartido las asignaturas de Redes de los Grados en Ingeniería Informática, de Computadores y de Software, Ampliación de Redes (AR) del Grado en Ingeniería de Computadores, y Redes de Nueva Generación e Internet (RNG) del Máster en Ingeniería Informática. Ha sido el coordinador del Módulo 2, creando los contenedores *ad-hoc* y seleccionando el *software* que se debía instalar en cada dispositivo para lograr la funcionalidad deseada.
- José Luis Vázquez Poletti es profesor Titular de Universidad. Ha impartido la asignatura Redes y Seguridad (RyS) del Grado en Ingeniería en Informática (GII) y Ciberseguridad en Videojuegos (CSV) del Grado de Desarrollo de Videojuegos (GDV). Ha coordinado el Módulo 3 de elaboración de manuales de prácticas.
- Rafael Moreno Vozmediano es profesor Titular de Universidad y ha impartido y ha sido coordinador de las asignaturas de Redes de los Grados en Ingeniería Informática, Ingeniería de Computadores, e Ingeniería de Software, la asignatura de Ampliación de Redes (AR) del Grado en Ingeniería de Computadores y la asignatura Seguridad en Redes (SER) optativa en los Grados de Ingeniería Informática, Ingeniería de Computadores e Ingeniería de Software. Ha participado en las tareas de estudio del entorno GNS3 y en la elaboración de las prácticas de laboratorio para los estudiantes.
- David Pacios Izquierdo es estudiante de doctorado. Ha participado en la elaboración del manual de prácticas.
- Eduardo Sánchez Muñoz es miembro del personal de los laboratorios de informática y uno de los encargados de preparar los equipos y servidores con los requisitos solicitados de las asignaturas que van a dar clase en los mismos en entornos Windows, Linux y virtualización. Se ha encargado de la preparación, despliegue y validación del entorno de prácticas completo en todos los laboratorios de la Facultad de Informática.

## 5. Desarrollo de las actividades

La mayor parte de las actividades se han desarrollado según el cronograma previsto. La metodología que se ha seguido durante el desarrollo de este Proyecto de Innovación Educativa se corresponde con lo previsto en la memoria de solicitud. A continuación se detalla cada una de las fases:

1. Uso del simulador gráfico GNS3 para la realización de prácticas sencillas mediante contenedores predefinidos. Esta fase ha sido sencilla porque ya se contaba con experiencia en el uso de la herramienta GNS3. Corresponde con el Módulo 1 del Plan de Trabajo.
2. Creación de los contenedores específicos para las asignaturas involucradas. Esta fase ha sido la más difícil debido a la falta de documentación sobre la creación de contenedores sin partir de alguna de las imágenes disponibles en *Docker Hub*<sup>1</sup>.
3. Elaboración de los manuales de uso de los nodos y del entorno gráfico.
4. Preparación de las prácticas que deben realizar los alumnos, incluyendo sus respectivos guiones.
5. Propuesta de proyectos básicos que abran las puertas a la creatividad de los alumnos.

### 5.1. Resultados y productos

Los resultados de este proyecto han sido los siguientes:

- Entorno virtualizado basado en GNS3 y contenedores para las prácticas de las asignaturas de redes de computadores de la Facultad de Informática en las diferentes titulaciones que ofrece.
- Manual de prácticas para los estudiantes. Disponible en el Campus Virtual.
- Manual de instalación de los contenedores en GNS3.
- Ejemplos de prácticas avanzadas.

Hay que resaltar que la realimentación ofrecida por los estudiantes ha sido muy positiva y los resultados en las prácticas demuestran que el entorno desarrollado es muy eficaz a la hora de facilitar el aprendizaje.

---

<sup>1</sup><https://hub.docker.com/>

## 6. Anexos

Para finalizar, se incluyen algunos ejemplos de las prácticas de redes de computadores que se han empleado en tres de las asignaturas impartidas.

### 6.1. Prácticas de laboratorio de la asignatura Redes (RED)

El laboratorio de la asignatura Redes de los grados de Ingeniería Informática, Ingeniería de Computadores, Ingeniería del Software y de los dobles grados Informática+Matemáticas e Informática+ADE está basado en el entorno de laboratorio desarrollado en el presente proyecto. Las configuraciones de red utilizadas en las distintas prácticas utilizan contenedores creados específicamente para la asignatura a partir de una instalación *ad-hoc* de Debian y los distintos elementos de la red: servidores, encaminadores, conmutadores, etc. se despliegan e interconectan mediante el simulador GNS3.

En este curso de Redes se realizan 4 prácticas de laboratorio que se resumen a continuación.

#### 6.1.1. Práctica 1. Introducción al entorno de laboratorio y configuración básica de la interfaz Ethernet.

Esta práctica comienza con una introducción al entorno de laboratorio, donde se explica el funcionamiento del simulador GNS3, se introducen los distintos componentes de una red, tales como servidores o máquinas de usuario, encaminadores, conmutadores, etc. y se realizan algunos ejemplos de despliegue de topologías de redes sencillas como se puede ver en la Figura 2.

Esta práctica continúa con el funcionamiento del comando `ip` de Linux, para realizar las operaciones básicas de configuración de la red, tales como visualización de las interfaces de red Ethernet, activación/desactivación de una interfaz de red, configuración básica de la dirección IP, etc. También se introduce la herramienta `Wireshark` para visualización y monitorización del tráfico de red.

En esta práctica también se estudia la configuración de parámetros de la capa de enlace con la orden `ip link` (p.e. la modificación la dirección MAC de la interfaz de red o la MTU (*Maximum Transfer Unit*) de la interfaz de red), la manipulación de la tabla ARP con la orden `ip neighbour`, y la configuración avanzada de IP con el comando `ip addr` para las asignación de varias direcciones IP a una interfaz y la creación de redes lógicas a partir de una topología física (usando para ello la misma topología física de la Figura 2).

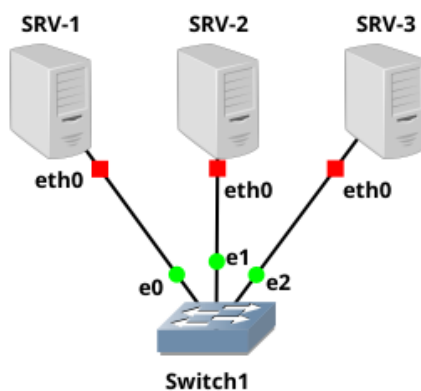


FIGURA 2: Ejemplo de topología sencilla.

### 6.1.2. Práctica 2. Encaminamiento IP, subredes y fragmentación

En esta práctica se estudia la configuración de encaminadores (*routers*) mediante la activación del reenvío de paquetes o *forwarding* y se estudia la configuración de tablas de encaminamiento mediante la orden `ip route`. En particular se estudia cómo se visualizan e interpretan las tablas de rutas en Linux, cómo se añade/elimina un encaminador predeterminado a la tabla de rutas y cómo se añade/elimina una ruta a una red. Para ello se realizan algunas topologías formadas por varias redes interconectadas mediante encaminadores, como puede verse un ejemplo en la Figura 3.

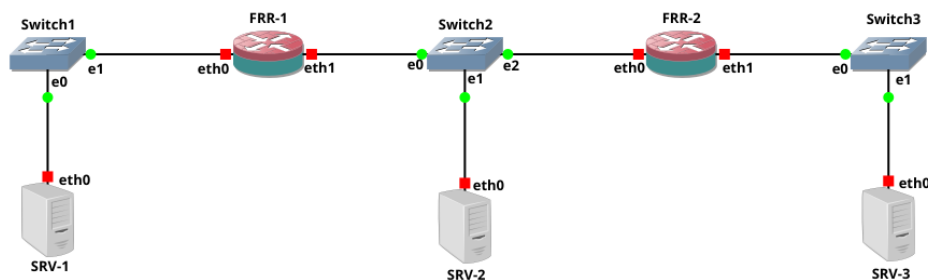


FIGURA 3: Topología de red para la práctica 2.

La práctica continúa con creación de subredes a partir de redes de clase B o redes de clase C, tal y como se muestra en el ejemplo de la Figura 4.

La última parte de esta práctica se centra en los conceptos de fragmentación y reensamblado de datagramas IP, mediante la configuración del descubrimiento de MTU.

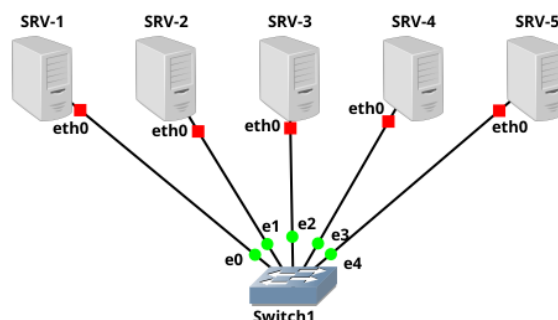


FIGURA 4: Creación de subredes.

### 6.1.3. Práctica 3. Protocolos de transporte UDP y TCP

Esta práctica está dedicada al estudio del modelo cliente/servidor para aplicaciones TCP y UDP. Para ello se utiliza una configuración de red muy sencilla (véase la Figura 5) formada únicamente por dos máquinas que actuarán como cliente y servidor, respectivamente.

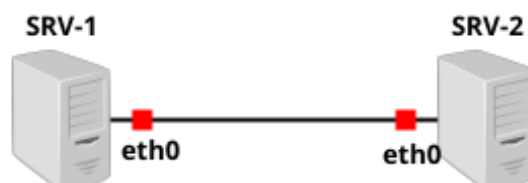


FIGURA 5: Configuración cliente-servidor.

La práctica comienza con la introducción al comando `netcat` que permite abrir puertos UDP/TCP en un servidor y establecer conexiones UDP/TCP desde un cliente `netcat`. También se estudia la orden `ss`, sucesor del antiguo `netstat`, que permite visualizar el estado de los sockets TCP y UDP en una máquina Linux. Esta práctica incluye un análisis de los formatos de los datagramas UDP y los segmentos TCP capturados mediante Wireshark, el estudio de los mecanismos de establecimiento y fin de conexión en TCP y la configuración de las distintas opciones de TCP.

### 6.1.4. Práctica 4. Práctica final para evaluación del laboratorio

La práctica 4 consiste en la realización de una práctica final individual que permitirá evaluar el desempeño de los alumnos en el laboratorio de Redes. En esta práctica los alumnos debe-

rán desplegar una topología de red formada por varias redes y encaminadores y llevar a cabo la configuración de las distintas máquinas de la red (tanto máquinas de usuario, como encaminadores) para garantizar la correcta comunicación entre todas ellas. La Figura 6 muestra un ejemplo tipo de práctica final.

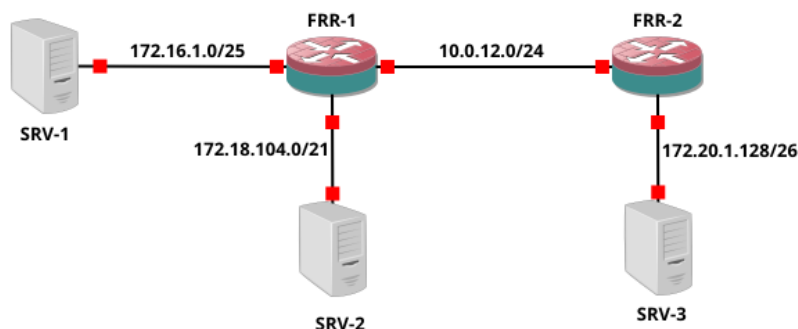


FIGURA 6: Ejemplo de práctica final.

## 6.2. Ampliación de Redes (AR)

La asignatura de Ampliación de Redes se imparte durante el 2º cuatrimestre del 3º curso del Grado en Ingeniería del Computadores. En ella se tratan temas que no se han podido ver en la asignatura de Redes, como IPv6, encaminamiento dinámico, configuración automática con DHCP, servicio DNS y programación de aplicaciones cliente-servidor.

Esta es una asignatura con marcado carácter práctico, pues casi la mitad de las clases se imparten en laboratorio. Esto hace que sea necesaria la elaboración de un guion detallado de las prácticas que se deben realizar para afianzar los contenidos vistos en las clases de teoría.

A continuación enunciamos las prácticas que se proponen en la asignatura de Ampliación de Redes.

### 6.2.1. Introducción al Laboratorio

Se trata de una toma de contacto con el entorno de simulación GNS3 y los contenedores, pues para muchos estudiantes es la primera vez que lo utilizan.

Se explican las funcionalidades principales de GNS3, el uso de los dispositivos que se emplearán durante el curso (en esta asignatura sólo los encaminadores FRR y los servidores SRV), así como la depuración de los enlaces mediante *wireshark*.

### 6.2.2. IPv6

Se introduce el protocolo IP de nueva generación, IPv6. Se incide, sobre todo, en el formato de las direcciones, el anuncio de vecinos y la autoconfiguración.

Se propone una práctica con una topología sencilla que ponga de manifiesto el uso del mecanismo de anuncio de prefijos y autoconfiguración, como se puede ver en la Figura 7.



FIGURA 7: Anuncio de prefijos y autoconfiguración en IPv6.

### 6.2.3. Servicio de nombres DNS

Se explica el funcionamiento y configuración de los servidores de nombres, tanto primarios como secundarios. En la topología de la Figura 8 se configura SRV-1 como servidor primario para una zona DNS y SRV-2 como secundario. La máquina SRV-3 actúa como cliente. Se pone de manifiesto que los servidores autoritativos de una zona no necesitan estar en la misma red.

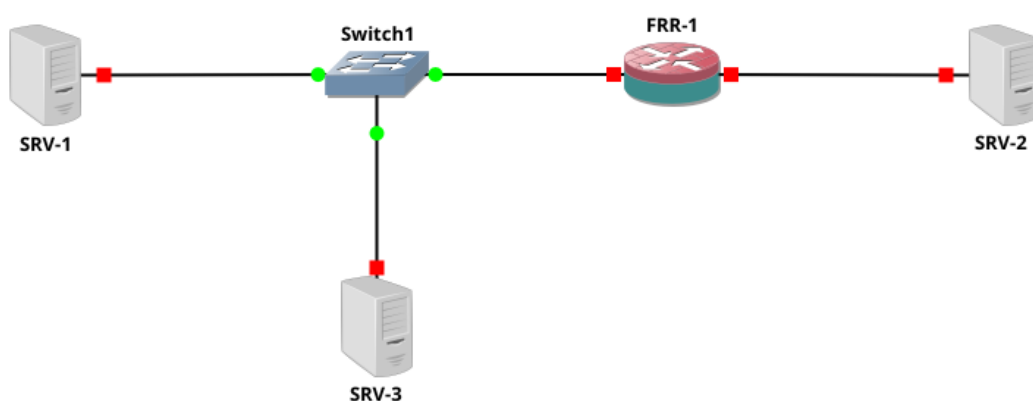


FIGURA 8: Servicio de nombres DNS y DHCP.

### 6.2.4. Protocolo DHCP

Se explica el protocolo *Dynamic Host Configuration Protocol* para la configuración dinámica de la red, sobre todo en IPv4 aunque también se introduce su uso para IPv6. La topología empleada es la misma que en la práctica de DNS, de la Figura 8.

El encaminador FRR-1 actúa también como servidor DHCP, asignando a SRV-3 una dirección dentro del rango asignado e informándole de cuáles son los servidores DNS que debe utilizar, en este caso, SRV-1 y SRV-2.

### 6.2.5. Encaminamiento interno: RIP y OSPF

En la Figura 9 se muestra la topología que se define para configurar los algoritmos de encaminamiento dinámico. En primer lugar se emplea el algoritmo RIP (*Routing Information Protocol*), tanto para IPv4 como para IPv6 (RIPng). A continuación, se crea otro proyecto con la misma topología pero esta vez con el algoritmo de encaminamiento interior más utilizado en el mundo real, OSPF (*Open Shortest Path First*), OSPFv2 para IPv4 y OSPFv3 para IPv6.

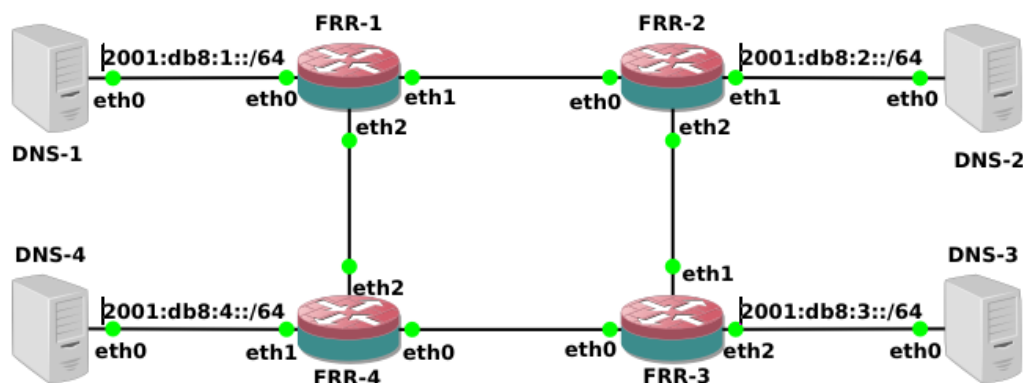


FIGURA 9: Práctica de encaminamiento dinámico (RIP y OSPF) en IPv6.

### 6.2.6. Encaminamiento externo: BGP

Esta práctica es una introducción al protocolo de encaminamiento exterior BGP (*Border Gateway Protocol*). Se destaca la importancia de este protocolo para construir internet, aunque en este curso sólo se abordan los conceptos y la configuración básica.

Para mostrar el anuncio de prefijos se utiliza una topología simple con 4 sistemas autónomos (AS, *Autonomous Systems*) como la mostrada en la Figura 10.

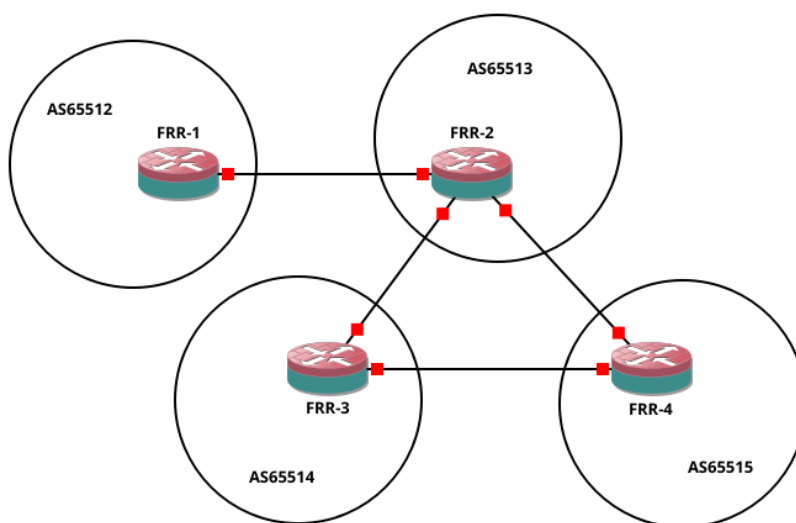


FIGURA 10: Encaminamiento BGP.

### 6.2.7. Seguridad en redes: cortafuegos

Los contenedores FRR disponen del *software nftables* que permite implantar medidas de seguridad en redes como cortafuegos (*firewalls*). Se realiza una práctica donde, se restringe el acceso a una red interna (representada por SRV-3 en la Figura 11) según el protocolo (IPv4, IPv6, TCP, UCP), el puerto destino y la dirección origen (SRV-1 o SRV-2).

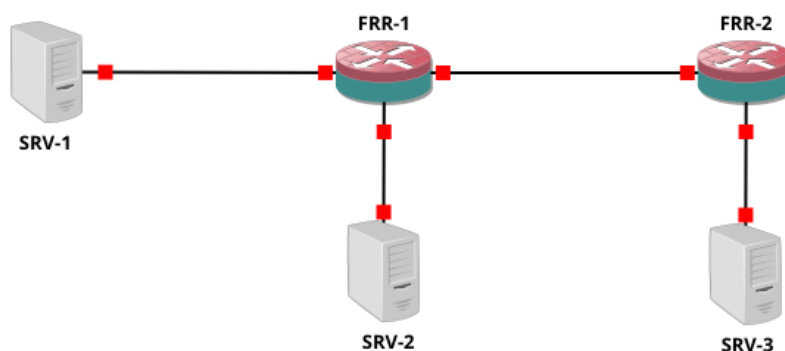


FIGURA 11: Cortafuegos con nftables.

Se encuentra disponible el manual completo de prácticas para su descarga desde el Campus Virtual.

### 6.3. Redes de Nueva Generación (RNG)

La asignatura de Redes de Nueva Generación e Internet se imparte en el primer cuatrimestre del primer curso del Máster en Ingeniería Informática. Tiene carácter obligatorio.

La metodología docente es un poco distinta a la de las asignaturas de grado, por tratarse de un grupo reducido e impartirse íntegramente en el laboratorio. Esto nos permite hacer un mayor número de prácticas, propuestas en el momento y según se va avanzando en la teoría. Por eso no hay un guion de prácticas como tal, sino un conjunto de ellas que se van proponiendo en cada momento para ilustrar los conceptos que se acaban de ver.

A continuación veremos el temario de la asignatura y alguna de las prácticas propuestas en cada tema.

#### 6.3.1. IPv6

En este tema se profundiza en el protocolo IPv6. Hay que tener en cuenta que al Máster llegan estudiantes que han seguido diferentes itinerarios, de manera que algunos ya han visto los conceptos básicos mientras que otros no han estudiado nada de IPv6.

Uno de los apartados del tema son los mecanismos de transición, donde se estudian los diferentes tipos de túneles que se emplean actualmente para facilitar la interconexión de “islas” IPv6 a través de redes IPv4: túneles 6in4, 6to4, 6rd... Aquí proponemos una práctica que permita ensayar la configuración de túneles 6in4 con la topología mostrada en la Figura 12.

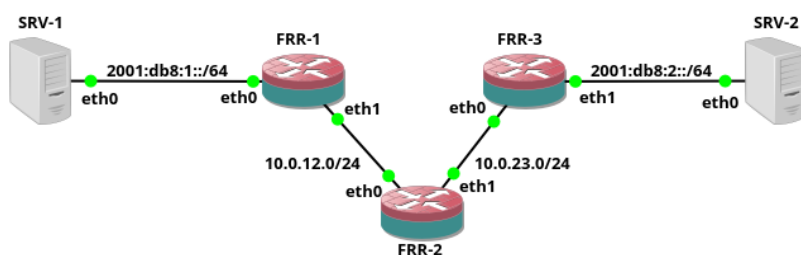


FIGURA 12: Túneles 6in4.

#### 6.3.2. Encaminamiento interior: OSPF

En este tema se amplía lo visto en las asignaturas de Grado en lo referente a los algoritmos de encaminamiento interior. Se estudia OSPF para IPv4 (OSPFv2) y OSPF para IPv6 (OSPFv3). Se insiste en el filtrado de rutas mediante listas de control de acceso

(ACL, *Access Control Lists*) y en la división en áreas de los sistemas autónomos. En las figuras 13 y 14 se muestran las prácticas propuestas para IPv4 e IPv6, respectivamente.

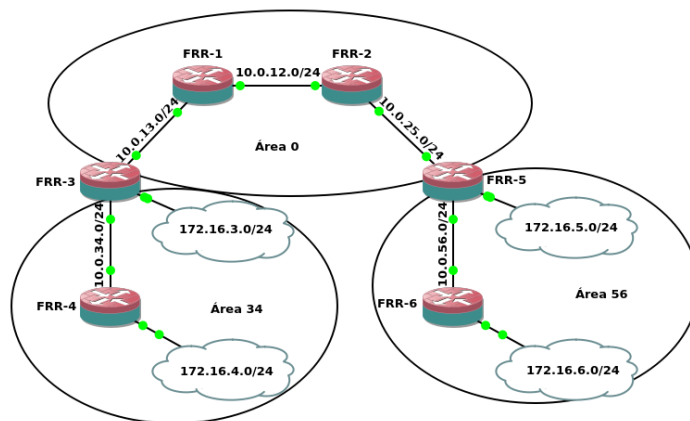


FIGURA 13: Áreas con OSPFv2.

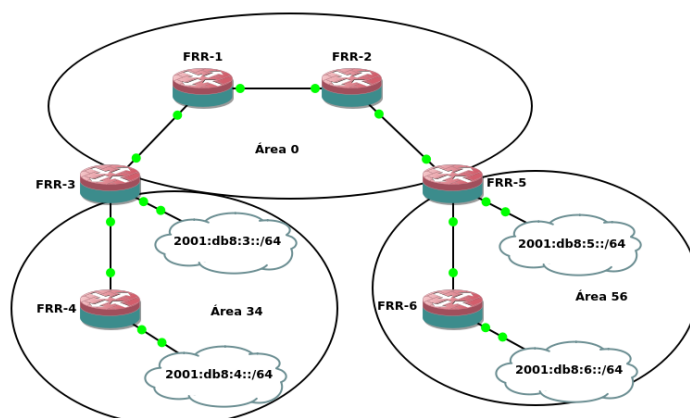


FIGURA 14: Áreas con OSPFv3.

### 6.3.3. Encaminamiento exterior: BGP

Este tema intenta dar una visión global sobre el encaminamiento BGP, esencial para el funcionamiento de internet. Además de los conceptos teóricos, se proponen prácticas de dificultad progresiva hasta terminar con una donde se integran las políticas de encaminamiento, la interacción con otros protocolos y los comportamientos no deterministas (o *wedgies*).

En la figura 15 se muestra la práctica que se realiza al finalizar el tema. Inicialmente los

encaminadores deben tener información completa sobre todos los anuncios en la red, para posteriormente fijar como enlace secundario el que une los sistemas autónomos AS65512 y AS65514 a través de los respectivos FRR-1 y FRR-4, y mantener como enlace principal el que une AS65512 con AS65515 a través de FRR-3 y FRR-5, aplicando los mecanismos de políticas de encaminamiento.

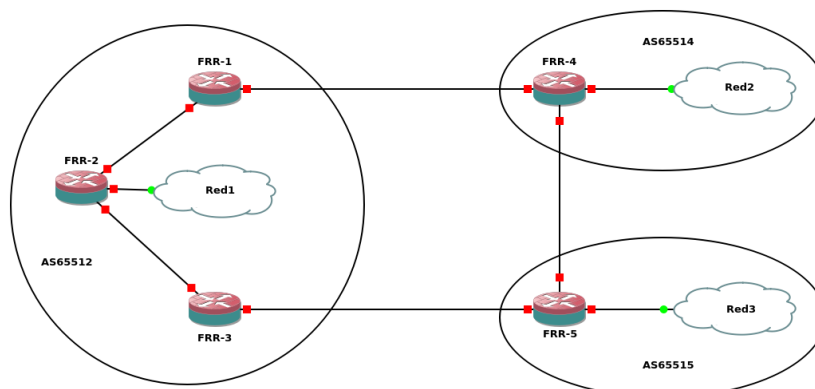


FIGURA 15: Práctica sobre políticas de encaminamiento entre Sistemas Autónomos.

#### 6.3.4. Encaminamiento troncal: MPLS

Con este tema se pretende introducir el encaminamiento independiente de IP que se realiza en las grandes troncales mediante *Multiprotocol Label Switching*. Se definen los conceptos de LSP (*Label Switching Path*) y FEC (*Forwarding Equivalence Class*). Posteriormente se estudia la Ingeniería de Tráfico y la gestión de flujos en función de sus características.

En la figura 16 se representa la topología que se emplea para la práctica de LDP (*Label Distribution Protocol*).

#### 6.3.5. Redes definidas por software: SDN

Se estudian las Redes Definidas por Software (SDN, *Software Defined Networks*), de gran importancia actualmente en Centros de Proceso de Datos que soportan virtualización de servicios, pero que también están utilizándose en redes corporativas, gracias al soporte por parte de los fabricantes del estándar OpenFlow.

Para este tema se definieron contenedores específicos, los llamados OVS (de *Open Virtual Switch*), que permiten las tareas de definición de flujos para su tratamiento posterior.

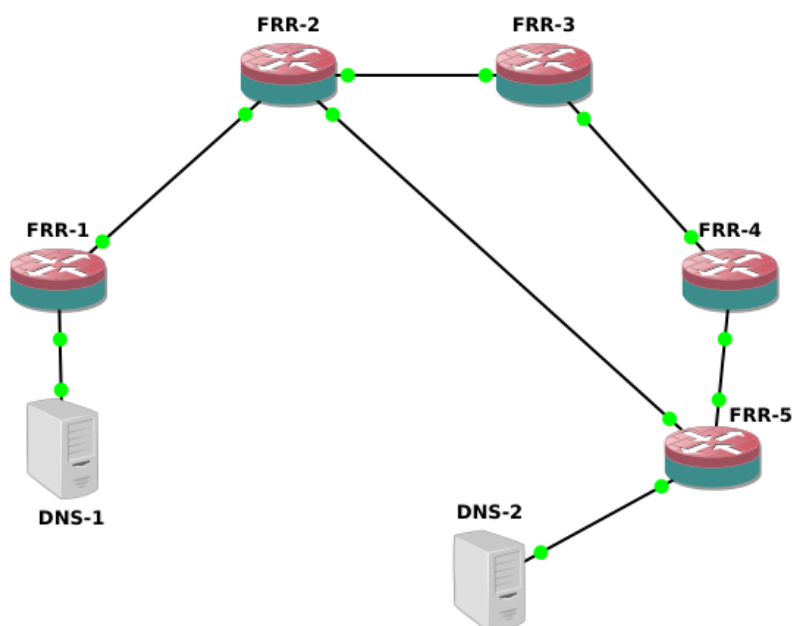


FIGURA 16: Encaminamiento MPLS.

Las prácticas van enfocadas a la utilización de SDN para la definición de las características en tiempo real de la red corporativa, de implantación de políticas de calidad de servicio (QoS, *Quality of Service*), así como la garantía de las políticas de seguridad. En este sentido, en la figura 17 se propone una práctica donde se restringe el anuncio de prefijos IPv6 a una sola máquina autorizada en la red, con el fin de evitar que un usuario malintencionado pueda anunciar sus propios prefijos falsos.

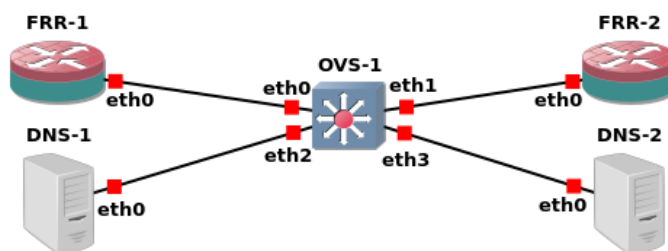


FIGURA 17: Restricción de anuncios de prefijos IPv6 a la máquina autorizada.

En la figura 18 se hace uso de las colas para limitar el tráfico multicast que circula por la red, algo que resulta imprescindible en redes extensas, como podría ser la propia red de la

UCM, para que dicho tráfico no sature los recursos de ancho de banda de los enlaces.



FIGURA 18: Calidad de servicio mediante colas.

### 6.3.6. Encaminamiento multicast

Se introducen los conceptos de encaminamiento por multidifusión, fundamental, por ejemplo, para la TVIP (Televisión sobre IP). Se definen los protocolos PIM (*Protocol Independent Multicast*) en modo denso (DM, *Dense Mode*), disperso (SM, *Sparse Mode*) y específico según la fuente (SSM, *Source Specific Multicast*).

Se propone una práctica bastante compleja, mostrada su topología en la figura 19, utilizando PIM-SM. Gracias a la ligereza de los contenedores, se hace posible la realización de este tipo de prácticas donde el número de elementos de red es considerable.

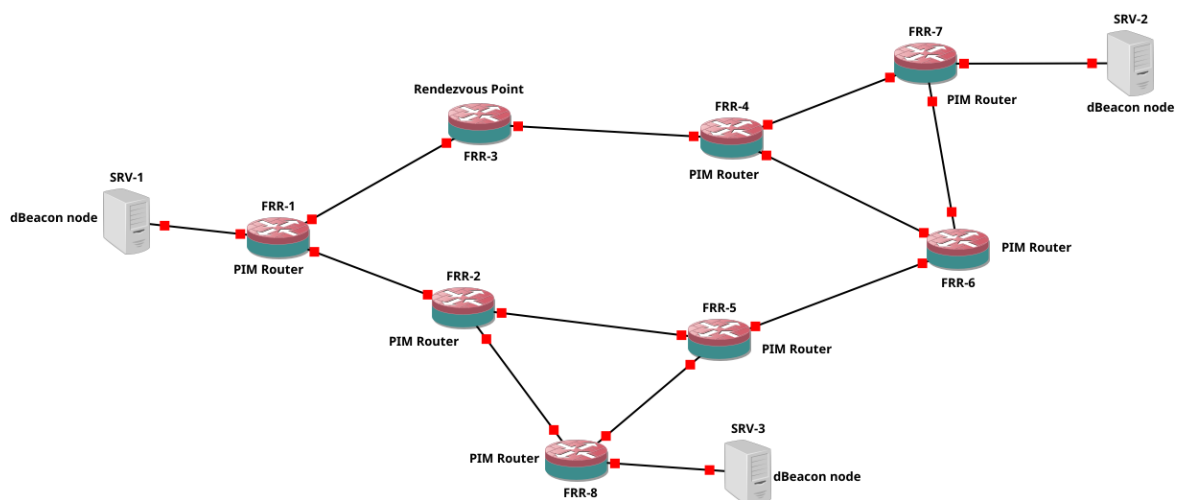


FIGURA 19: Multicas con PIM-SM.

### 6.3.7. Voz sobre IP: VoIP

Este tema abarca lo relacionado con servicios avanzados de telefonía sobre IP, desde la capa física a la de aplicación.

Aunque se desarrolló un contenedor específico con Asterisk, el *software* que se encarga de la definición y gestión de una centralita telefónica VoIP, finalmente, y por falta de tiempo, se optó por hacer una demostración con un teléfono físico VoIP y el *software* libre Linphone.