



Amenazas de seguridad en redes SDN

Universidad Nacional Española a Distancia (UNED)

Facultad de Informática

Proyecto de Fin de Máster



Autor: Luis Ildefonso Gómez Solana

Tutor: Miguel Romero Hortelano

Co-Tutor: Elio San Cristobal Cruz

Fecha: Septiembre 2021

*Dedicado a mi pareja Marketa, mi hija Karolina y mi hijo pequeño
Daniel, ¡Gracias por vuestro apoyo!*

*El hogar está detrás, el mundo por delante
Y hay muchos caminos por andar
A través de la sombra, al filo de la noche
Hasta las estrellas han bajado
Niebla y sombra
Nube y sombra
Todo se desvanecerá
Todo se desvanecerá*

Índice general

1. INTRODUCCIÓN	1
2. FACTORES DEL PROYECTO	3
2.1. Objetivos	3
2.2. Motivación	3
2.3. Estructura del documento	4
3. ESTADO DEL ARTE	5
3.1. Internet	5
3.1.1. Pila de protocolo de Internet	7
3.2. Computación en la Nube	8
3.2.1. Modelo de servicio	9
3.2.2. Tipos de despliegues	11
3.3. Protocolos de red	13
3.3.1. Spanning Tree Protocol	14
3.3.2. Protocolo Simple de Administración de Red	14
3.3.3. Seguridad en la capa de Transporte	15
3.3.4. Protocolo ded resolución de direcciones	16
3.3.5. Sistema de nombre de dominio	19
3.4. Software-Defined Networking	19
3.4.1. Protocolos	20
3.4.2. Controladora SDN	23
3.4.3. Mininet	25
3.4.4. RestAPI	26
3.5. Diseño de dispositivos de red	27
3.5.1. Sistemas operativo red Aruba OS	27
3.6. Centro de procesamiento de datos	28
4. Amenazas de seguridad en redes SDN	31
4.1. ARP Spoofing en SDN	31
4.1.1. Escenario ARP Spoofing para SDN	33
4.1.2. Mitigar ARP Spoofing para SDN	35
4.1.3. Escenario Proxy ARP Spoofing para SDN	38
4.1.4. Mitigar Proxy ARP Spoofing para SDN	41
4.2. DDoS	41
4.3. DNS Spoofing	41

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

El presente documento ahonda en el análisis y estudio del nuevo modelo arquitectónico para las redes de computadores conocido como *SDN* (del inglés: “*Software Defined Networking*”)

En concreto, analizará y estudiará cómo este nuevo modelo afronta los ataques de seguridad más comunes en redes de computadores.

Esta nueva tecnología, enfocada en la mejora de la Computación en la Nube y más en concreto en la optimización de la Infraestructura como Servicio, de sus siglas en inglés *IaaS*, busca agilizar la administración, gestión, automatización de las redes y ofrecer mayor flexibilidad, escalabilidad y una capa de abstracción adicional a los usuarios y clientes.

El proyecto busca crear un entorno de estudio donde se pueda estudiar la respuesta de este modelo a las amenazas de seguridad que las redes actuales deben combatir y estudiar la respuesta que dicho modelo propone para ello.

Capítulo 2

FACTORES DEL PROYECTO

2.1. Objetivos

El presente documento tiene como objetivo estudiar las amenazas de seguridad en redes de computadores que usan la arquitectura *SDN* (del inglés: “*Software Defined Networking*”) tienen que afrontar.

El proyecto investigará si estas nuevas redes solucionan este tipo de amenazas y de ser así cómo lo consiguen. Se realizará una comparación con el modelo actual y se diseñará una herramienta para poder ver dicho proceso en un ambiente controlado y desde un punto de vista práctico.

Dentro de las posibles amenazas de seguridad que se estudiaran podemos citar algunas como DDoS [1] [2] o ARP Spoofing [1] [2].

Es por tanto que el proyecto intentará dar a conocer las posibles mejoras de dicha nueva arquitectura contra estas amenazas y creará un entorno para su investigación.

2.2. Motivación

Han pasado muchos años desde que Internet se creará y se globalizara. Durante este nacimiento hemos asistido a diferentes tipos de arquitecturas de redes que se han ido sucediendo y ampliando para manejar la infraestructura sobre la que los centros de datos y por tanto la misma Internet se sustenta.

Un ejemplo llamativo serían las Redes Activas [1] [2] [3] que plantearon ya en los 90 controlar la red a través de una interfaz de programación (API). Este modelo que se extinguió debido a la carente fuerza computacional de por aquel entonces. Otros ejemplos relevantes fueron *ANTS* [4] o *SwitchWare* [5].

Hoy en día y con un Internet que no para de crecer [6] se están creando cada vez más redes y centros de datos. Todos ellos con una mayor cantidad y complejidad en cuanto a infraestructura se refiere. La gestión y seguridad de las redes a gran escala es un reto si queremos seguir ofreciendo flexibilidad, fiabilidad y mayor control a cada uno de los

clientes y dispositivos conectados a la misma. Esto se traduce en que la gestión de los centros de datos se hace especialmente tediosa y sensible para las empresas y por tanto para los administradores.

Esta mayor agilidad, flexibilidad y escalabilidad de las redes se ha convertido en unas de las principales razones para traer *nuevos* conceptos de redes o renovar ideas . Es ahora que disponemos de una mayor capacidad computacional y protocolos, cuando podemos llevarlo a cabo. De ahí que desde diversos centros de investigación, tanto públicos como privados, y empresas hayan desarrollado modelos de gestión de redes con nuevos protocolos y técnicas capaces de gestionarlas y administrarlas.

Sin embargo, puesto que el acceso y uso de Internet crece junto con la infraestructura que la mantiene y que ésta está dispersándose por el varias regiones para ofrecer disponibilidad, nos estamos exponiendo a mayor número de ataques [7]. Los ataques a los que nuestras redes se exponen tienen que ser resueltos con agilidad y rapidez evitando caídas de servicio en la medida de lo posible y este documento tratara de investigar si SDN consiga tales objetivos, estudiando casos de seguridad comunes en redes de computadores.

En este documento se ha querido ahondar en el estudio de esta nueva arquitectura y ahondar en la seguridad que la nueva arquitectura SDN ofrece.

2.3. Estructura del documento

El presente documento se divide en los siguientes capítulos y de la siguiente forma:

- Capítulo 1: Introducción. Contextualizar el proyecto en el escenario actual. Explicación del problema actual y la solución que plantea *SDN* como método de mejora para la *Infraestructura como Servicio* y la seguridad extra que ofrece.
- Capítulo 2: Factores del proyecto. Objetivos del proyecto con la motivación que ha llevado a ser realizado.
- Capítulo 3: Estado del Arte. Introducción y repaso de los conceptos más importantes y necesarios para entender este proyecto, , diseño de aplicaciones y en última instancia los protocolos usados en la configuración y gestión de las redes como *OpenFlow*, *DDoS* o *ARP Spoofing*.
- Capítulo 4: Propuestas *SDN*. Visión detallada de esta nueva arquitectura que se quiere implementar. Descripción detallada de los ataques de seguridad más comunes y la solución que SDN ofrece junto con la comparación con el modelo actual.
- Capítulo 5: Aetón. Desarrollo, presentación e implantación de la aplicación. Se define la especificación de requisitos del software y el análisis, diseño e implementación del sistema.
- Capítulo 6: Conclusión. Presentación de los objetivos finales obtenidos. Se añade una breve explicación de la situación actual del nuevo modelo y futuros pasos.

Capítulo 3

ESTADO DEL ARTE

El reto al que las empresas se han enfrentado en la última década ha sido la computación en la nube. Si hablamos desde la seguridad y según Gartner [8], las empresas que han movido su infraestructura a entornos virtuales han mejorado este apartado en al menos un 33 % que en modelos tradicionales. Este mismo documento augura que para 2022, el 95 % de los fallos de seguridad en la nube serán fallos del cliente.

Es por tanto que tenemos que pensar también en que las redes por tanto también migren a un modelo similar donde obtengamos beneficios similares. Aunque nos exponamos a nuevos retos de seguridad.

3.1. Internet

La historia de *Internet* [1] [2] empieza en 1950 durante el desarrollo de componentes electrónicos, protocolos y conceptos para la comunicación entre ordenadores.

Pero no es hasta la década de 1960 cuando se puso en marcha. El objetivo fue el de conectar varios centros de investigación que necesitaban compartir información entre ellas sobre un sistema de comunicación fiable. De ahí que el Gobierno de los Estados Unidos de América y su Ministerio de Defensa creara *ARPANET* (del inglés: “*Advanced Research Projects Agency Network*” con su versión castellana: “Red de la Agencia para los Proyectos de Investigación Avanzada”). Esta agencia se creó sobre la década de los 60. La organización detrás de *ARPANET* fue *ARPA* cuyas siglas en inglés significan “*Advanced Research Projects Agency*”.

En una primera instancia *ARPANET* estaba desplegada entre diferentes universidades o centros de investigación para poder conectarlas entre ellas. Debido al éxito de su funcionamiento se fueron incorporando más y más instituciones. Uno de sus principales atractivos es la descentralización de recursos. Los nodos podían comunicarse entre ellos y compartir datos incluso si uno de ellos fallaba. La arquitectura usada en Internet es la de cliente-servidor.

Durante las décadas siguientes se crearon multitud de protocolos y estándares para dar cabida a un mayor número de funcionalidades y dispositivos. *ARPANET* se estaba

expandiendo y necesitaba de estándares para ello. Pero fue sobre el 1981 y con el desarrollo del concepto de *paquete de red* cuando la red *ARPANET* se empezó a expandir a gran escala. Sobre esta fecha, *ARPA*, la organización detrás de su creación, había sido absorbida por la *NSF* (del inglés: “*National Science Foundation*”). Un año más tarde en 1982, se dio a conocer el nuevo estándar por el que se dirigiría lo que hoy conocemos como *Internet*, dicho protocolo se bautizó como *TCP/IP* (del inglés: “*Transport Layer Control / Internet Protocol*”).

Tal y como se comentó anteriormente, *Internet* se basa en un modelo cliente-servidor, donde el servidor proporciona servicios a uno o varios clientes y el cliente es el demandante de estos. El cliente es el que establece entonces la comunicación en primera instancia y a través de la red, ya sea local o a través de la *WAN* (del inglés: “*Wide Area Network*”). Una vez la comunicación establecida, el servidor satisfecerá la petición del cliente, si procede, y cuando acabe dicha operación se dará por terminada la comunicación.

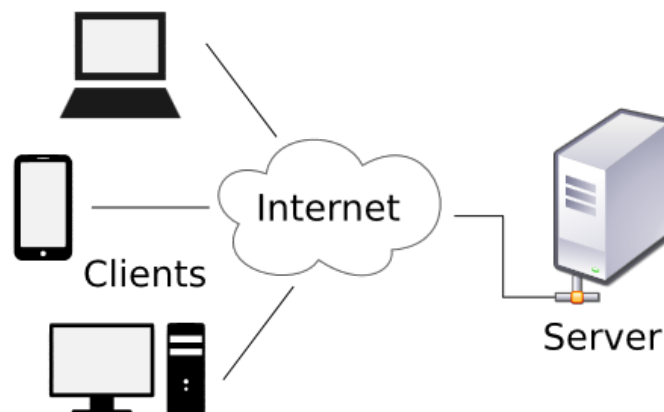


Figura 3.1: Modelo Cliente-Servidor

Pasaron los años y aunque *Internet* fue creciendo no fue hasta 1990 donde consiguió realmente revolucionar el mercado y vida social global. Expandiéndose de manera mayoritaria a todos los lugares del mundo. Cualquier dispositivos que soportara el protocolo *TCP/IP* de *Internet* podía conectarse y comunicarse con otros dentro de esta nueva red, sin fronteras entre estados ni costes por saltar entre países.

Para ver este crecimiento podemos referir a la *Organización Internacional de las Telecomunicaciones* - ITU [9] (en inglés: “*International Telecommunications Union*”). Esta organización nos muestra el porcentaje de población conectada a *Internet* con un histórico:

	2005	2010	2020
Población mundial	6.5 mil millones	6.9 mil millones	7.8 mil millones
Sin usar Internet	84 %	70 %	40 %
Usan Internet	16 %	30 %	60 %
Internet en países en desarrollo	8 %	21 %	47 %
Internet en países desarrollados	51 %	67 %	87 %

Cuadro 3.1: Tabla de usuarios usando Internet

3.1.1. Pila de protocolo de Internet

Tal y como se comentó anteriormente, *Internet* funciona con la pila de protocolo conocida como *TCP/IP* - Protocolo de Control de Transmisión / Protocolo de Internet (o en inglés: “*Transmission Control Protocol / Internet Protocol*”).

Su primera implementación oficial fue en el año 1989 y está recogida en el RFC 1122 [10]. Dicho protocolo es el estándar de facto y basado en el conocido modelo *OSI* (en inglés: “*Open Systems Interconnection*”) que fue creado en primera instancia y como modelo teórico para modelar Internet. Este se desarrolló en los años 1982, en donde se implementó para ARPANET.

La pila de Internet (TCP/IP) se basa en dos ideas:

- Robustez: Capaz de enviar paquetes bien formados. Igualmente inteligente para recibir paquetes con ciertos errores.
- Extremo a extremo: Los únicos elementos que mantienen estado de la comunicación son los extremos, es decir, se entiende y se debe asumir que Internet no guarda el estado de la comunicación llevada a cabo entre dos clientes.

Este protocolo, al igual que su homólogo *OSI*, se basa en la segmentación de la comunicación en niveles y la encapsulación de la información según pasen a través de estos.

A continuación podemos ver una pequeña descripción de cada uno de los niveles de estas dos pilas de protocolos:

- Modelo OSI. Creada por *International Organization for Standardization* (ISO), y recogida en el siguiente estándar ISO/IEC 7498-1 [10]. Tiene 7 niveles diferentes: Físico, datos, red, transporte, sesión, presentación y aplicación.
- Modelo TCP/IP. Recogido en el estándar RFC 1122 [10] al que luego se añadieron otros RFC para el resto de las capas. Tenemos un total de cinco capas: Físico, datos, red, transporte y aplicación.

La imagen siguiente muestra la comparación de cada modelo y la división en niveles de la pila de protocolo de cada uno de ellos:

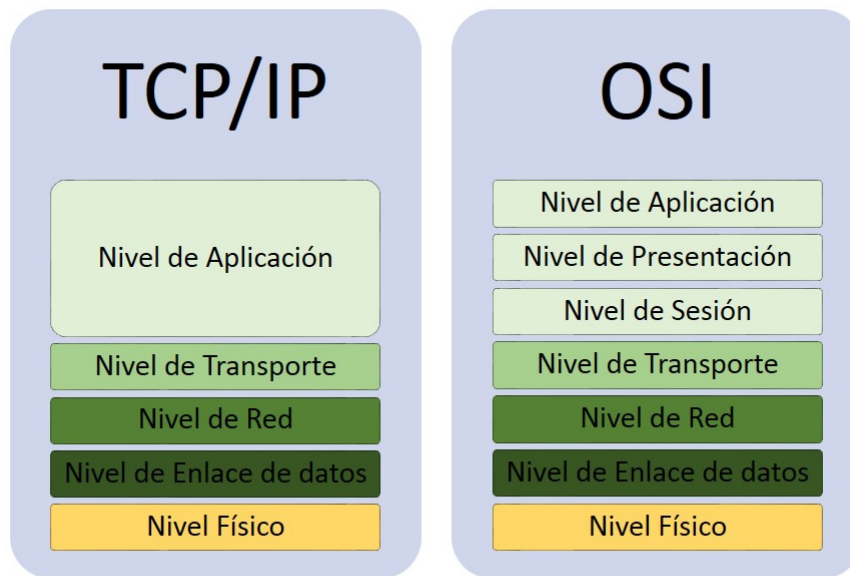


Figura 3.2: TCP/IP - OSI

La siguiente imagen describe un paquete de datos con las diferentes cabeceras por niveles según TCP/IP:

Cabecera Físico	Cabecera Red	Cabecera IP	Cabecera Transporte	Datos de Usuario
-----------------	--------------	-------------	---------------------	------------------

3.2. Computación en la Nube

Aunque existen diferentes definiciones sobre este concepto que pueden diferir unas de otras, *Computación en la Nube* [1] [2] [11] [12] [13] (del inglés: “*Cloud Computing*”) se puede definir básicamente como la transformación de servidores, almacenamiento y dispositivos de red en un producto escalable, consumible y auto abastecido.

La *Computación en la Nube* ofrece recursos tecnológicos de la siguiente manera:

- Sobre la red
- Como un servicio consumible

Además y normalmente tiene las siguientes características:

- Escalable. Añadiendo diferentes nodos o elementos según se necesiten a conjunto de recursos.
- Múltiples inquilinos. Varias empresas o clientes diferentes pueden disfrutar al mismo tiempo del recurso.

- Auto abastecido. Clientes pueden provisionar mayor o menor cantidad de recursos según lo necesiten.
- Pago por uso. Clientes pagan por los recursos usados y normalmente en relación con el uso en términos de computación del mismo.

Este nuevo modelo de servicio se puede desplegar en un centro de datos donde switches, routers, almacenamiento y servidores están todos localizados en el mismo sitio o geográficamente distribuidos en diferentes sitios donde cada sitio se compone de uno de estos centros de datos.

Las ventajas que los clientes finales y empresas pueden encontrar en este nuevo modelo de servicio son:

- Flexibilidad. Los clientes pueden provisionar la cantidad de recursos necesarios en cada momento cubriendo los posibles picos de carga que puedan tener en su negocio y desligarse de ellos una vez haya transcurrido dicha necesidad.
- Reducción de costes operacionales. *Computación en la Nube* permite a los clientes comenzar su negocio con un coste de entrada ínfimo si lo comparamos con lo que supondría el despliegue de recursos y mantenimiento por su cuenta. Recordando que el cliente paga por el uso que haya hecho del mismo.
- Accesibilidad. Debido a que los recursos se ofrecen a través de la red, los clientes pueden usarlos desde cualquier parte. Deslocalización geográfica es un beneficio para la empresa.
- Disponibilidad. Debido a que se puede provisionar gran cantidad de recursos, *Computación en la Nube* nos permite tener varios elementos funcionando de manera activa-activa/activa-pasiva para que en caso de fallo el servicio no se vea afectado. Esto se puede entender tanto a nivel de servicios como a nivel físico.
- Eficiencia. Puesto que Computación en la nube nos provee de servicios, los clientes y empleados pueden centrarse más en dichas tareas relegando a un segundo plano los problemas operacionales y de mantenimiento.
- Seguridad. Puesto que los servicios son ofrecidos sobre una plataforma, *Computación en Nube* puede enfocarse y automatizar procesos para mejorar y asegurar la integridad y privacidad de los datos.

3.2.1. Modelo de servicio

El modelo de servicio o estructura que lleva a cabo la *Computación en la Nube* determina el tipo de recursos que se proveen a cada tipo de clientes.

La computación en la nube se podría dividir según los tres tipos de clientes y servicios posibles [13]:

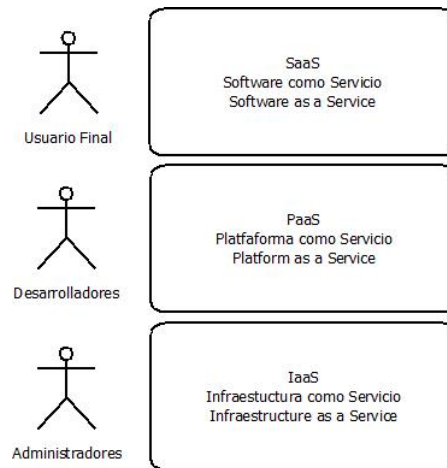


Figura 3.3: Computación en la nube

La definición de cada sección sería:

- *SaaS*: Aplicaciones que ofrecen acceso a un servicio sobre Internet. En este nivel y tipo de modelo de servicio nos encontramos a los consumidores de servicios finales. A ellos se les ofrece servicios como almacenamiento o computación online que pueden usar a su voluntad. El operador de la nube manejará el funcionamiento de ésta en una capa inferior.

En este modelo encontramos navegadores web o aplicaciones que puede ser ejecutadas en local o en la nube como *Gmail*, *Dropbox* o incluso sistemas operativos (a través de clientes ligeros) de los que el usuario maneja la capa superior pero que realmente reside y se está ejecutando externamente en la nube.

- *PaaS*: En este nivel encontramos las herramientas necesarias para que los desarrolladores creen sus aplicaciones. Este usuario recibirá por tanto una plataforma sobre la cual podrá desarrollar aplicaciones y que está provisionada sobre la nube misma. El usuario es por tanto capaz de manejar el almacenamiento, red, sistemas operativos u otros recursos que sean necesarios para crear sus aplicaciones. En este modelo nos encontramos con bases de datos como *MySQL*, servidores web como *Apache*. Algunas de las empresas que ofrecen este servicio son *Google* vía su *App Engine*.
- *IaaS*: Ofrece la infraestructura necesaria sobre la que los otros dos niveles se basan. Proveedores como *Amazon* vía su *Elastic Compute Cloud* son los encargados de ofrecernos servicios de máquinas virtuales, redes y almacenamiento en donde el servicio se cobra por uso computacional.

Una especial mención a la diferencia que hay entre *SaaS* y *PaaS* es que con *SaaS* los clientes o consumidores no crean aplicaciones sino que simplemente hacen uso de ellas.

En la imagen siguiente podemos ver que elementos y productos que podemos encontrar en cada una de estas divisiones:



Figura 3.4: Arquitectura Computación en la nube

De las tres tipos de divisiones, *IaaS* puede llegar a ser una de las más complicadas de entender, ya que por sus características es la más escondida y desconocida al conjunto de los usuarios. Aunque ya se mencionaron servicios que se sitúan en esta categoría no podemos olvidarnos de *Helion* [14] u *OpenStack* [15] como ejemplos importantes de *IaaS*.

3.2.2. Tipos de despliegues

Los despliegues posibles se basan en quién administrará los recursos que se van a entregar o servir.

En este sentido tenemos tres tipos de nubes o despliegues posibles:

- Nube privada - Dicha nube ofrece servicios sólo a unos usuarios específicos como miembros de una empresa o departamento. Los servicios, a través de la red, se mantienen siempre en la empresa y detrás de sus cortafuegos, todos ellos en sus servidores de datos. Normalmente no se transmiten a través de Internet los datos aquí contenidos.

Esta solución requiere el despliegue de hardware en local junto con su correspondiente mantenimiento, lo que hace que el coste se eleve. Aunque el mantenimiento puede ser llevado por una empresa externa. Ciertamente es que esta idea soluciona posibles problemas de seguridad, gobernabilidad sobre los datos, disponibilidad y control.

- Nube pública - También conocida como nube externa, la infraestructura es mantenida por el proveedor de servicios que es el dueño final de la infraestructura. Las compañías compran por tanto servicio y los usuarios acceden a dichos servicios sobre Internet u otro tipo de conexión ofrecida por el proveedor.

Nubes públicas ofrecen un uso compartido de servicios para todos los usuarios de las mismas o diferentes compañías. Las compañías normalmente pagan por uso computacional del mismo. En un sentido económico, el ahorro inicial es considerable, puesto que las compañías no tienen que hacer un gran desembolso inicial y además se desentienden del mantenimiento de la infraestructura, delegando todo ello en dicho proveedor de servicios.

Sin embargo, tener los recursos compartidos entre diferentes usuario con diferentes empresas de por medio, dilapida la seguridad y el control que las empresas tienen sobre sus datos, ya que no son los dueños finales de la infraestructura, simplemente la alquilan por uso. No saben qué ocurre de verdad con sus datos. Es la razón por la que la nube pública no es un modelo empresarial muy consolidado en aquellas empresas que tienen información altamente confidencial que no puede ser delegada o de la que carece de un control total.

- Nube comunitaria - Este tipo de nube esta compartida por diferentes organizaciones y empresas que comparten un mismo interés. Puede ser administrada tanto por una de estas organizaciones como por una externa (delegando en ella las tareas de mantenimiento)
- Nube híbrida - En dicho modelo el proveedor de servicios ofrece una nube pública al mismo tiempo que ofrece ciertos beneficios de las nubes privadas mencionadas anteriormente. Provee de un panel de administración donde servidores, red, almacenamiento y seguridad se pueden manejar individualmente por el consumidor o empresa. Normalmente también se ofrece un mayor rendimiento, disponibilidad y capacidad al igual que un mayor número de medidas de seguridad para garantizar aún más la privacidad que en las nubes públicas.

Es por tanto que en la actualidad muchas empresas buscan este modelo híbrido donde pueden tener un mayor control sobre la infraestructura que almacena sus datos pero que les permita delegar ciertas tareas de administración en terceras compañías.



Figura 3.5: Tipos de Cloud

Las nubes mencionadas anteriormente tienen todas las características siguientes en común:

- Alta accesibilidad.
- Recursos compartidos.
- Flexibilidad.
- Alta escalabilidad.
- Usan el servicio como medio.

3.3. Protocolos de red

Los *protocolos de red* se definen como la concreción de reglas y convenciones que permiten la comunicación entre uno o varios dispositivos de red. En ellos se usan técnicas de intercambio de paquetes para enviar y recibir información.

La razón de su existencia se debe a la necesidad de establecer un convenio común de normas que permitan la interacción de dispositivos. Pueden ser usados a una escala local o a nivel global (Internet) dependiendo de la complejidad y las necesidades.

Esta comunicación entre diferentes dispositivos de red requiere que los protocolos incluyan mecanismos de identificación para poder llevarse a cabo, normalmente recogidos en los estándares creados previos a su utilización. Estos documentos recogen los diversos tipos de mensajes que se pueden llevar a cabo para que ambas partes puedan comunicarse correctamente amén de la explicación de su funcionamiento, los más conocidos serían los RFCs (*Request for Comments*) [16]

Los siguientes protocolos de red son sólo una pequeña muestra de lo que se usa hoy en día. Han sido escogidos puesto que han sido usados en este proyecto:

- Spanning tree (o en inglés: “*Spanning Tree Protocol - STP*”)
- Protocolo de administración de red (o en inglés: “*Simple Network Management Protocol - SNMP*”).
- Seguridad de la capa de transporte (o en inglés: “*Transport Layer Security - TLS*”).
- Protocolo de resolución de direcciones (o en inglés: “*Address resolution protocol - ARP*”).
- Sistema de nombre de dominio (o en inglés: “*Domain Name System - DNS*”).

3.3.1. Spanning Tree Protocol

El objetivo de este protocolo es asegurar una red física libre de bucles lógicos. Al mismo tiempo debe evitar las conocidas tormentas por multidifusión de paquetes de red.

Dicho protocolo está recogido en el estándar IEEE 802.1D-2004 [1] [2] [10] [17]. Esta revisión es la última que existe en este momento y la actualmente usada en la mayoría de los dispositivos de red. La última revisión es retro compatible con las versiones anteriores [1] [2] [10] [17].

Tal y como se comentó anteriormente, este protocolo de red elimina bucles lógicos en una red física. Si partimos de una red con forma de malla, el algoritmo elimina bucles lógicos de dicha red física, cortando caminos hacia el destino que sean fútiles o no nos acerquen al destino, convirtiéndolo en una topología tipo árbol.

Ejecutándose cada vez que se modifica una conexión y realizándose a nivel de puerto. Los nodos en el sistema tienen un identificador. El sistema tiene un nodo principal o nodo raíz el cual tendrá el menor identificador de nodo. Este valor se calcula sumando la dirección física del switch conocida como dirección *MAC*, junto con la prioridad del mismo (siendo ésta configurable por el administrador). También se asigna a cada segmento un coste que depende de su distancia hasta el nodo raíz. En ciertos escenarios es posible que exista un empate entre dos caminos, en dicho caso, el que tenga mayor prioridad será el designado como candidato y camino disponible para la comunicación. El resto de puertos y segmentos de red se bloquearán y podarán para así evitar los bucles lógicos.

El algoritmo usado en *STP* consume un elevado número de recursos que aumenta cuanto más complicada es la red dada. De ahí que se haya depurado dicho algoritmo teniendo otros como “*Rapid STP Rapid Spanning Tree Protocol - RSTP*” - IEEE 802.1w [1] [2] [10]. *RSTP* es compatible con *STP*.

Otros protocolos de red ven el problema de manera diferente y solucionan el problema de los bucles de manera más eficiente. Este es el caso de *Multiple Spanning Tree Protocol - MSTP* - IEEE 802.1s [1] [2] [10] o *Per-VLAN Spanning Tree PVST* [1] [2] [10].

3.3.2. Protocolo Simple de Administración de Red

Dicho protocolo se encuentra en el nivel 5 o nivel de aplicación de la pila TCP/IP (véase sección: 3.1.1). Su última versión es la *SNMPv3*, recogida en el RFC 3410 [1] [2] [10]. Dicho protocolo nos permite intercambiar información de control y configuración entre dispositivos de red.

El objetivo que conseguimos es poder centralizar el mantenimiento de estos dispositivos (switches, routers, impresoras, cámaras, teléfonos IP o demás dispositivos) en un único punto donde los administradores estén al corriente de su estado y reciban periódicamente información de los mismos al igual que también puedan realizar ciertas configuraciones

remotas.

Este protocolo permite, tanto la recolección de datos desde el dispositivo, como la modificación de los mismos desde la aplicación de gestión central. Estos valores están almacenados en los dispositivos administrados y residen en variables organizadas de manera jerárquica.

La forma de acceder a ellas desde la aplicación central es conociendo previamente sus bases de datos, éstas son llamadas “Bases de información de gestión” (o en inglés: “*Management information base (MIBs)*” [1] [2]).

El escenario de este sistema de control sería:

- Servidor de gestión central donde reside la aplicación de manejo y control.
- Dispositivos de red administrados.
- Cliente software instalado en el dispositivo de red administrado que comunica con la aplicación de gestión central.

Por tanto el servidor central podrá tanto hacer llamadas para volcar o preguntar por información a los objetos de las bases de datos de los dispositivos conectados como recibir valores o modificaciones en forma de alarma o simple información, todo ello a través del agente que estos dispositivos tienen funcionando en sus sistemas.

Esta comunicación se realiza normalmente sobre UDP. La idea de usar UDP es la de no alterar y sobrecargar el funcionamiento global de la red con posibles pérdidas de datos y control de paquetería.

3.3.3. Seguridad en la capa de Transporte

Este protocolo de seguridad conocido por sus siglas en inglés como *TLS* (del inglés: “*Transport Layer Secure*”) [1] [2] se encuentra en la capa de transporte y justo debajo del nivel de aplicación (véase sección: 3.1.1). El objetivo es asegurar que la comunicación entre aplicaciones y usuarios sea segura (normalmente se usa a través de Internet) evitando por ejemplo que terceros puedan leer el mensaje en caso de interceptarlo.

Sucesor del bien conocido protocolo *SSL* [1] [2] (en inglés: “*Secure socket Layer*”), *TLS* en su última versión 1.2 y descrito en los RFC 5246 y RFC 6176 [10] asegura la comunicación en los siguientes pasos:

- Negociación del protocolo y algoritmo a usar.
- Intercambio de las llaves públicas y privadas (usando por ejemplo: RSA o Diffie-Hellman).
- Cifrado de la comunicación simétricamente usando RC4 o IDEA.

La pila de protocolo de dicho sistema de seguridad se puede ver en la siguiente imagen:

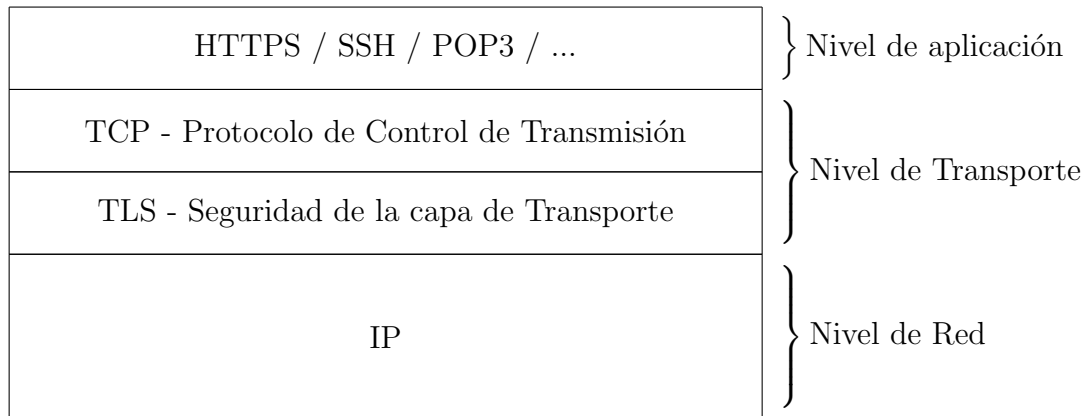


Figura 3.6: Pila de protocolo TLS

En la imagen superior se puede ver como *TLS* funciona sobre *TCP* pero dentro de dicho nivel, ofreciendo un nivel y capa de seguridad a las aplicaciones. Más información en la sección: 3.1.1.

3.3.4. Protocolo de resolución de direcciones

ARP [1] [18] [19] es un protocolo utilizado en el protocolo de Internet (IP) que asigna direcciones IP a las direcciones físicas (MAC). Este protocolo opera en la interfaz de red de la pila IP (sección: 3.1.1).

El término resolución de dirección apunta al proceso que se realiza para encontrar la dirección de un ordenador en red. La resolución ocurre cuando el ordenador cliente envía una petición al servidor remoto para que este le devuelva un paquete de información con la dirección final del servidor requerida.

Una red Ethernet utiliza dos direcciones físicas, una que identifica al emisor y otra el receptor. La dirección física del receptor puede variar y definir redes de difusión. Para reducir el número de peticiones, cada elemento de red contiene una pequeña memoria que almacena la información por un corto periodo de tiempo, una vez terminado se volverá a actualizar dicha entrada en la tabla con otra petición.

La ejecución de la resolución física de una computadora sería algo como esto:

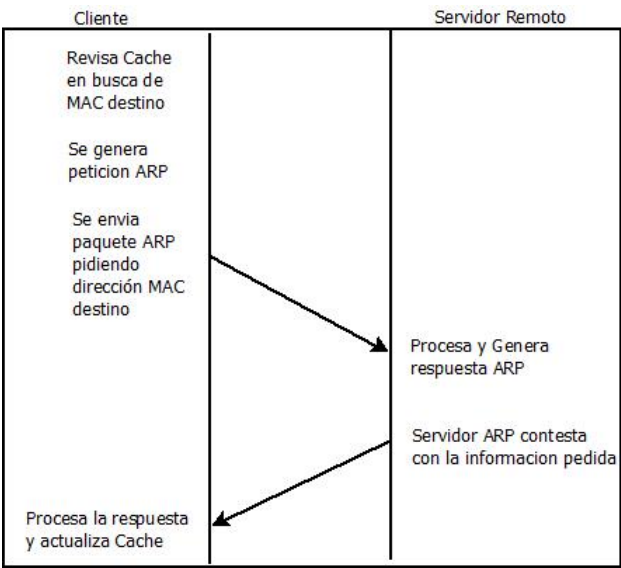


Figura 3.7: Mensaje ARP

En el siguiente esquema vemos como es un paquete ARP:

	Bits 0–7	Bits 8–15	Bits 16–23	Bits 24–31		
0	Tipo de dirección de hardware (HTYPE)		Tipo de protocolo de red (PTYPE)			
32	Longitud de la dirección de hardware (HLEN)	Longitud de la dirección de protocolo (PLEN)	Operación			
64	Dirección MAC del remitente					
96						
112	Dirección IP del remitente					
144	Dirección MAC del destinatario					
176						
192	Dirección IP del destinatario					

Figura 3.8: Paquete ARP

3.3.4.1. ARP Spoofing

Un ataque de tipo ARP Spoofing [1] [20] ocurre cuando un elemento de red envía paquetes ARP a un cliente o víctima intentando suplantar a un tercero, para ello sustituirá la MAC del servidor que quiere suplantar con la suya. Después de un ataque exitoso, todo el trafico del cliente que vaya a este supuesto host, pasará a traves del atacante, este tipo

de ataques se conocen como MITM ó *Man-in-the-middle* [1] [20].

Pensemos en este escenario:

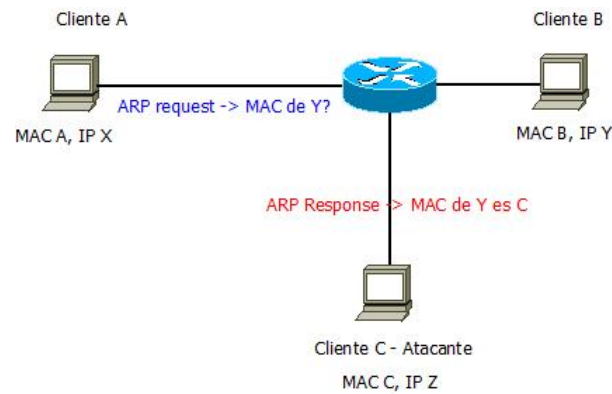


Figura 3.9: Escenario mensaje ARP

En dicho escenario el Cliente A, genera un paquete ARP de petición con esta forma:

Paquete ARP	
Protocolo	IPv4
MAC Emisor	MAC A - Cliente A
IP Emisor	IP X - Cliente A
MAC Receptor	Dirección MAC broadcast
IP Receptor	IP Y - Cliente B

Puesto que desconocemos los elementos que de red y quién nos puede ayudar, el paquete se envía por difusión a todos los elementos de la red local (por eso usamos una dirección Broadcast para la MAC)

Por lo dicho anteriormente y sabiendo que todos los elementos recibirán esta petición, nuestro atacante el Cliente C, generará la respuesta ARP que envía al Cliente A con el objetivo de suplantar la identidad de B:

Paquete ARP	
Protocolo	IPv4
MAC Emisor	MAC C - Cliente C
IP Emisor	IP B - Cliente B
MAC Receptor	MAC A - Cliente A
IP Receptor	IP A - Cliente A

Con este paquete vemos como el Cliente C hace que el Cliente A asuma que la IP B tiene por dirección MAC C.

Por la definición y uso de ARP, este tipo de ataques afecta tanto a servidores como a otros elementos de red (switches, routers...) Enviar información falsa para infectar y alterar

el contenido de la tabla ARP y por tanto alterar el tráfico de la red es el objetivo de este ataque.

Ataques como ARP Spoofing se dan en elementos de red que estén en la misma red local o capa 2. Este tipo de ataques pueden ser la entrada para otro tipo de ataques como los DoS (Denial of Service), sección ??.

Una posible solución para este tipo de ataques es el uso de entradas ARP que sean estáticas, haciendo que la tabla ARP tenga valores ya predefinidos y que no los actualice. En redes empresariales esto puede ser inviable y podemos pensar en técnicas como DHCP snooping [1] [21].

3.3.5. Sistema de nombre de dominio

3.4. Software-Defined Networking

Software-defined network (SDN) [1] [2] [11] [22] [23] [24] [25] es un nuevo modelo de arquitectura de red donde el panel de control y el panel de datos no se desarrollan en el mismo dispositivo de red.

Este nuevo diseño arquitectónico de red permite por tanto la centralización de las decisiones de control de flujo de datos en un punto externo al elemento de red. El sistema central enviará esta información de control a los dispositivos conectados para que ellos se encarguen exclusivamente de enviar el tráfico con respecto a estas órdenes.

La imagen siguiente compara la manera de controlar y manejar un dispositivo de red con el modelo actual y el modelo de *SDN*:

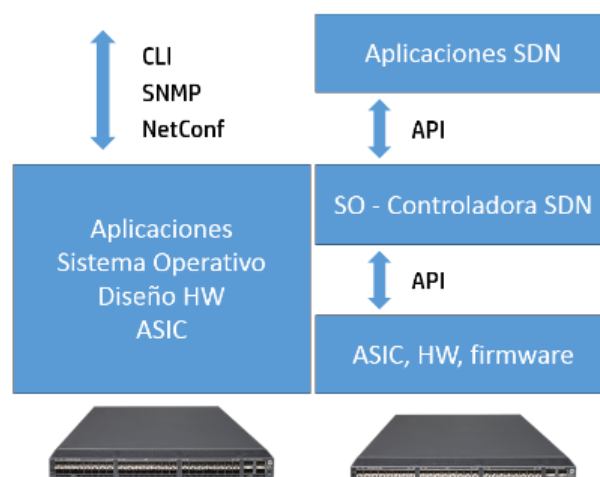


Figura 3.10: Modelo SDN y actual

Tal y como se puede ver en la imagen superior, *SDN* busca ofrecer a los operadores de red acceder y controlar los elementos de la misma usando aplicaciones y técnicas de

automatización vía diversos programas, sin tener que preocuparse por la capa física o la infraestructura actual de red.

Como resultado de esta nueva manera de entender la red, las futuras aplicaciones que se basen en ella podrán abstraerse de la infraestructura real y física que haya debajo, tratándola como un ente lógico y virtual. *SDN* consigue abstraerse de la capa física usando interfaces de acceso a la misma. Es así también como esta tecnología se centra en la mejora de nuestra Infraestructura como servicio (IaaS) mencionada anteriormente (véase sección: 3.2).

Alguna de las primeras aproximaciones de esta arquitectura podrían ser *WebSprocket/softswitch* [26] o *Geoplex* [27], años 1998.

3.4.1. Protocolos

SDN se puede llevar a cabo usando diversos protocolos. Existen dos partes en las que necesitamos protocolos para comunicarnos: Infraestructura-Controladora y Controladora-aplicaciones (véase imagen 3.10).

Normalmente el protocolo usado para comunicar la infraestructura física y la controladora es *Openflow*. Dicho protocolo es uno de los más conocidos y representativos pero no el único. Podemos decir que *SDN* es más que *Openflow* y *Openflow* no es sólo *SDN*. *SDN* no es un protocolo en concreto sino una nueva arquitectura de red como se comentó en el apartado anterior, debemos verlos y entenderlos como una revolución en este aspecto.

Otros protocolos que son también usados entre la infraestructura y la controladora serían: *l2RS*, *PCE-P*, *BGP-LS*, *FORCES*, *OMI*, and *NetConf/Yang*, *SNMP* [1] [2]. Todos ellos son estándares oficiales.

Por otra parte, la comunicación entre la controladora y las aplicaciones carecen de esta estandarización. En dicho campo no existe todavía un estándar oficial o referente y las compañías están creando sus propias soluciones. En estos momentos lo más habitual es encontrar desarrollos donde se usan *APIs* (sección: 3.4.4).

3.4.1.1. Openflow

Openflow [1] [2] [28] [29] es el primero de los estándares de comunicación existentes en el mercado que definen una interfaz de comunicación entre el panel de control y el envío de datos en la arquitectura *SDN*.

Su desarrollo empezó en la *Stanford University* alrededor del 2007; ya en el 2009 se publicó la primera versión estable de este protocolo OF 1.0. Este estándar dio paso a la necesidad de crear una comunidad dedicada a este menester y en 2011 se creó la fundación *ONF* (del inglés: “*Open Networking Foundation*”) [28].

En estos momentos muchas de las mayores empresas tecnológicas interesadas en *SDN* se han unido a esta organización y están contribuyendo en la medida de sus posibilidades.

En estos momentos, *Openflow* puede ser usada en su última versión estable: 1.5 [30]. Sin embargo, OF 1.0 y 1.3 siguen siendo las más extendidas y usadas en ámbitos empresariales.

Este nuevo estándar, permite acceso directo y manipulación de la capa de envío de datos de diferentes routers y switches, ya sean virtuales o físicos. A día de hoy no hay otro protocolo con la misma madurez que éste y que admita todas las características que éste realiza, siendo capaz de mover la capa de control fuera del dispositivo de red final a una unidad lógica central basada en software.

Una rápida comparativa de las diferentes versiones de *Openflow*, la podemos encontrar en la siguiente tabla:

Características	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
Tablas múltiples	X				
Grupos	X				
Etiquetas: MPLS y VLAN	X				
Puertos virtuales	X				
Fallo de conexión de la controladora	X				
Servicio extensible		X			
Compatible con IPv6 - Básico		X			
Cambio de rol de controladora		X			
Métricas por flujo			X		
Etiquetado red troncal			X		
Metadatos ID-túnel			X		
Compatible con IPv6 - extendido			X		
Bundles				X	
Puertos ópticos				X	
Sincronización de tablas				X	
Tablas de salida					X
Pipeline de paquetes					X
Openflow Extensible Statistics					X
Meter Actions					X

Cuadro 3.2: Tabla comparativa - Evolución de *Openflow*

La información detallada acerca de qué nuevas tecnologías trae la última versión de *Openflow* 1.5.1 puede verse en el siguiente documento [30].

Este protocolo especifica las diferentes operaciones y primitivas que un programa externo es capaz de usar para programar los dispositivos de red. *Openflow* tiene que ser implementado en ambos lados de las comunicaciones para que sea posible la comunicación. Para ello se hacen uso de flujos (en inglés conocidos como “*flows*”), estos flujos de

datos se usan para identificar el tráfico de red basado en las diferentes reglas ya predefinidas que pueden ser programados estática o dinámicamente por *SDN*.

La imagen siguiente escenifica dónde se encuentra dicho protocolo dentro del switch y su relación con la controladora:

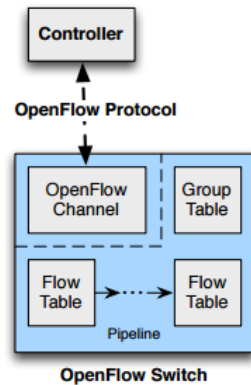


Figura 3.11: Esquema Switch Controladora en Openflow

Los flujos de datos contienen tres campos: paquete de entrada, campo para estadísticas y acciones a llevar a cabo en caso de que encontremos coincidencias en los campos señalados anteriormente.

Por otra parte cada dispositivo de red mantendrá una tabla (o varias) de flujo local (véase imagen: 3.11) que contiene una serie de campos que son en los que basará sus decisiones. Los campos más importantes serían:

- Coincidencia. Elementos a comparar con el paquete de entrada, en caso de encontrar se realizara lo que diga el campo acción.
- No coincidencia. En caso de no coincidir se enviará a la controladora.
- Acciones. En caso de que un paquete coincida con los elementos de coincidencia se realizarán las acciones listadas en este campo como por ejemplo: enviar, eliminar, difundir por todos los puertos...

Esta tabla de coincidencias puede ser completada por la controladora junto con las aplicaciones desplegadas sobre ella ya sea de manera reactiva o proactiva. Es decir, la controladora puede volcar datos nada más reconocer a un switch o esperar a que éste le pida información acerca de qué hacer con un paquete de red y entonces enviarle la información.

El funcionamiento y toma de decisiones de un switch con *Openflow* está en la siguiente imagen:

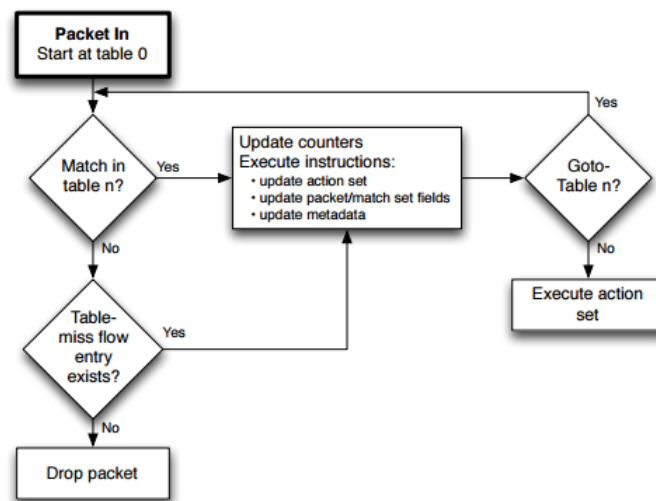


Figura 3.12: Flowchart [31]

Puesto que SDN permite ser configurable por flujos de datos, la red adquiere un grado de tecnificación y granularidad elevado.

3.4.2. Controladora SDN

Tal y como comentamos anteriormente *Software-defined network* (SDN) se basa en separar el panel de control y datos, donde el panel de control de datos está centralizado en una controladora.

Existen en el mercado varias controladoras, cada una de ellas tiene un abanico de posibilidades y funcionalidades diferentes. Algunas de las más importantes sería: OpenDayLight , HPE VAN SDN [32], NOX[33], Ryu y POX.



Figura 3.13: POX

Esta última controladora *POX* [1] [2] [34] [35], está escrita en Python [36] y básicamente está orientada a un uso académico y no comercial. La controladora sirve de entorno de trabajo donde los desarrolladores pueden crear sus aplicaciones y empezar a adentrarse en esta nueva tecnología. Esta controladora soporta las siguientes características:

- Soporta una interfaz “*Pythonic*” [1] [2] para poder comunicarse con las aplicaciones.

- Capacidad de usar diversos componentes de red útiles para descubrir una topología, selección de ruta, etc.
- Puesto que está basado en *Python* es multiplataforma (Windows, Linux, Mac OS).
- Soporta el mismo interfaz de usuario y herramientas de virtualización que usa NOX [33].

Actualmente puede comunicarse usando Openflow 1.0 solamente. Aunque la versión OF 1.1 podría llegar a funcionar pero sólo parcialmente.

Para el desarrollo de este trabajo se ha escogido esta controladora debido a los siguientes factores:

- Es una controladora desarrollada en Python cuyo lenguaje es cómodo de aprender y trabajar.
- El código es de libre acceso.
- Puesto que su enfoque es académico tenemos cantidad de material disponible en Internet [34] [35].

3.4.2.1. Alternativas

Una de las posibles alternativas podría ser *NOX* [33]. Este proyecto nació a partir de *POX* y está recabando cada vez más adeptos. También con licencia *GNU* pero basada en este caso en *C++* en vez de *Python*.

Otra posibilidad habría sido elegir una controladora de uso comercial y/o privativa como puede ser la usada por la empresa HPE y llamada *VAN SDN Controller* [32]. Esta controladora basada en *Java* se caracteriza por tener mucho mayor rendimiento, permite despliegues con alta redundancia.

Otra posibilidad proveniente del ámbito empresarial sería *OpenDayLight* [37]. Esta controladora es también de código abierto y está desarrollada en Java. Ofrece alto rendimiento, modularidad y la posibilidad de desplegarla de manera distribuida, sin duda un candidato a *POX*.

En la siguiente tabla tenemos un estudio comparativo de las diferentes controladoras que entendemos son relevantes:

	NOX	POX	Floodlight	OpenDayLight	HPE
Lenguaje	C++	Python	Java	Java	Java
Rendimiento	Alto	Lento	Alto	Alto	Alto
Distribuida	No	No	Sí	Sí	Sí
OpenFlow	1.0	1.0	1.0, 1.3, 1.4	1.0, 1.3	1.0, 1.3
Multi-tenant Clouds	No	No	Sí	Sí	Sí
Curva aprendizaje	Moderado	Fácil	Difícil	Difícil	Difícil
Código abierto/libre	Sí	Sí	Sí	Sí	No

Cuadro 3.3: Tabla comparativa de controladoras SDN

3.4.3. Mininet

Emulador de red es la definición de *Mininet* [1] [2] [38] [39]. Con dicha aplicación podemos emular switches, servidores y routers. También podemos generar conexiones entre ellas creando así nuestra topología de red deseada.

Mininet se comporta como una máquina GNU/Linux de propósito general a la que nos podremos conectar vía *SSH* (del inglés: “*Secure Shell*”) por ejemplo. Una vez dentro de dicha máquina podremos lanzar nuestras aplicaciones como si de un entorno GNU/Linux normal se tratara. El objetivo es poder ejecutar y poner en funcionamiento switches, router y servidores, a los que también nos podremos conectar como si de elementos independientes se tratasen. Podremos por tanto crear una red virtual, configurarlos y manejar tráfico real entre ellos.

Dentro de las posibilidad que nos ofrece *Mininet* y GNU/Linux podremos configurar, generar y monitorizar el tráfico de red que nuestra red virtual podrá manejar usando herramientas externas como *WireShark* [40] u *Ostinato* [41], herramientas para la monitorización y generación de tráfico en la red. Con *Mininet* crearemos la red virtual y su configuración y con herramientas adicionales (provistas con GNU/Linux) somos capaces de generar un tráfico de red que nuestra red virtual manejaría según nuestra configuración como si se tratase de una red real.

Un ejemplo de red virtual que podemos crear en *Mininet* con herramientas como *MiniEdit*:

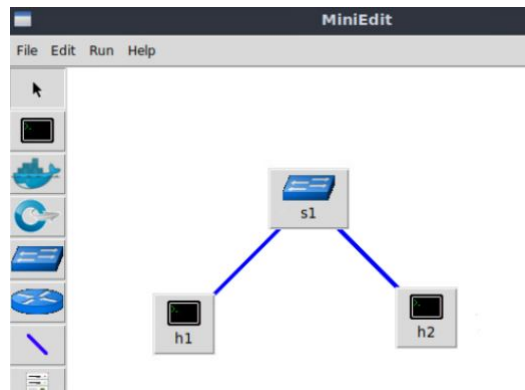


Figura 3.14: MiniEdit

Mininet hace uso de un modelo de virtualización ligero conocido en inglés como “*light-weight virtualization*”. Con dicha técnica podemos usar un único sistema para conseguir recrear una red entera, funcionando sobre un único núcleo de Linux, sistema y usando el mismo código de usuario.

Es por tanto que *Mininet* es una de las herramientas más conocidas para crear redes virtuales a día de hoy. Tal y como se comentó antes y debido al tipo de virtualización que usa, requiere pocos recursos desde el lado del servidor donde funcionara. Aunque ello depende del tamaño y complejidad de la red.

3.4.4. RestAPI

Transferencia de Estado Representacional ó *Rest* (del inglés: “*Representational State Transfer - REST*”) *interfaz de programación de aplicaciones* ó *API* (del inglés: “*Application Programming Interface - API*”) [1] [2] [28] es una nuevo modo para crear, leer, actualizar, o borrar información en un servidor. Esta nueva arquitectura de software para sistemas distribuidos es la usada para manejar la conocida Internet 3.1: WWW o en inglés: “*Workd wide web*”, como modelo conocidos que usan *Restful API*.

REST, desarrollado por Roy Fileding, tiene por objetivo la interacción entre sistemas independientes. Permite la interacción cliente-servidor con una mínima sobrecarga en ambos extremos. En contraposición con otros protocolos como SOAP (del inglés: “*Simple Object Access Protocol*”).

Las características de este sistema de comunicaciones residen en:

- Modelos cliente servidor sin estados. La petición realizada con cada mensaje HTTP debe autocontener toda la información necesaria que haga que el receptor no necesite mantener un estado de la misma. Es decir, debe ser suficiente como para entender lo enviado.
- Un conjunto de operaciones definidas. Las operaciones que se pueden realizar deben ser especificadas con anterioridad y conocidas por ambas partes.

- Sintaxis universal. Rest hace uso de URI para poder identificar sus recursos de manera universal.
- Uso de hipertextos. para la transición de estados como para la información. Los más conocidos son XML o HTML.

Algunas de las mayores empresas que podemos encontrar hoy en día ofrecen este tipo de bibliotecas de funciones. De entre ellas podemos destacar a Facebook, Amazon y Yahoo!

Es ahí donde los desarrolladores pueden por tanto crear sus propias aplicaciones y realizar las peticiones necesarias a los servidores de dichas empresas para obtener o volcar información de o en ellos y abstraerse por medio de una capa de software de los procesos inferiores.

3.5. Diseño de dispositivos de red

En el mundo empresarial existen varias compañías que están a la vanguardia de la creación de elementos y protocolos de red. Algunas de estas empresas privadas más conocidas serían Cisco, HPE, Juniper [42].

Las empresas arriba mencionadas están a la vanguardia en la creación de hardware y software de uso empresarial y enfocado a las redes. Dispositivos de alto rendimiento y con variedad de tecnologías que ofrecen desde técnicas de virtualización hasta redundancia en las condiciones más adversas.

Todas ellas disponen de sistemas operativos creados específicamente para su hardware de la tecnología que el mercado y empresas necesitan.

3.5.1. Sistemas operativo red Aruba OS

La compañía *Aruba* [1] [2] fue adquirida por HPE en 2015 [1] [2]. Aruba tiene un sistema operativo el cual está ramificado en varias distribuciones dependiendo del hardware en el que se instale. En el caso que nos interesa, tenemos ArubaOS [43], que está centrado en switches.

Aruba OS es un sistema operativo monolítico donde todos los servicios, procesos, sistema de ficheros y drivers están dentro del Kernel. [44].

Dicho sistema operativo, *ArubaOS*, tiene las siguientes características [45]:

- Protección contra ARP Spoofing, 802.1X, ACLs.
- Soporte para Openflow y posibilidad de usar Rest APIs.
- Protocolos para virtualización como: VLAN o VxLAN.

- Monitorización y control de errores en tiempo real sin interrupción del tráfico de red.

Un esquema visual de su arquitectura sería el siguiente:

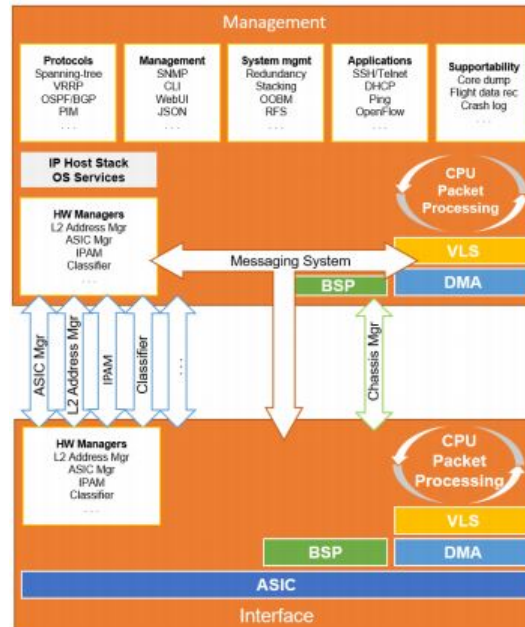


Figura 3.15: Centro de datos

Elementos como Openflow, STP ó PIM son llevados a cabo por el módulo Virtual LAN Subsystem ó VLS.

3.6. Centro de procesamiento de datos

Un *Centro de Procesamiento de Datos* (CPD) [1] [2] se define como el conjunto de diferentes elementos de computación como servidores, elementos de almacenamiento y elementos para su interconexión como conmutadores en un mismo espacio físico necesarios para una organización o proveedor de servicios.

La idea es concentrar en una sala todos los diferentes elementos necesarios para el procesamiento de datos para una empresa. Estos recursos y datos serán luego usados por clientes y empleados, realizándose en el mismo espacio todas las operaciones necesarias para llevar a cabo el negocio.

La intención es mejorar el rendimiento del negocio acercando datos y procesadores. Reducir coste de mantenimientos concentrando todos los elementos en un unico punto, sin olvidar que en ciertos casos se deben crear soluciones redundantes y copias de seguridad fuera del centro de datos.

Nuevas técnicas de alta disponibilidad se han desarrollado donde podemos ver por ejemplo como máquinas virtuales pueden moverse entre centro de datos dependiendo de

las necesidades del cliente.

La imagen siguiente sería un ejemplo de un centro de datos:

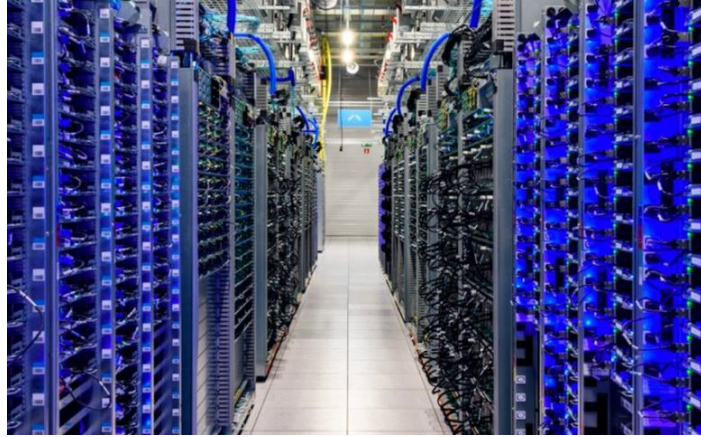


Figura 3.16: Centro de datos

Capítulo 4

Amenazas de seguridad en redes SDN

En este apartado trataremos de explicar algunas de las amenazas a las que las redes SDN tienen que enfrentarse hoy en día. La selección de estas amenazas se ha basado en varias listas que podemos encontrar en diferentes artículos ?? ??.

En cada una de las siguientes secciones explicaremos en detalle como funciona la amenaza y sus particularidades en el campo de SDN. También veremos y explicaremos como responder a dicha amenaza para mitigarlas.

4.1. ARP Spoofing en SDN

La primera de las amenazas que queremos estudiar está relacionada con el protocolo ARP. En secciones anteriores explicamos qué era el protocolo ARP y cómo funcionaba, sección 3.3.4. De igual manera también explicamos un ataque relacionado con este protocolo y llamado *ARP Spoofing*, sección 3.3.4.1, y es en el que nos centramos en esta sección.

Recordemos brevemente el funcionamiento de ARP y planteemos un escenario para una amenaza del tipo ARP Spoofing sin olvidarnos de la singularidad que una red SDN plantea.

Si hablamos de ataques ARP Spoofing podemos pensar en dos variantes en el caso de redes SDN:

- El mecanismo de difusión empleado por ARP para vincular direcciones IP a direcciones MAC hace que un elemento local que pertenezca al mismo dominio de difusión pueda suplantar la identidad de uno de ellos y redirigir el tráfico. Este tipo de ataques lo podemos encontrar en las redes actuales y es el que tratamos en la siguiente sección 4.1.1
- *Proxy ARP* [1] [2] es la manera más habitual que una red SDN controla las peticiones ARPs. La controladora central contiene y maneja la tabla MAC - IP para que el resto

de servidores no tenga que hacerlo. Esto hace que ataques dirigidos a la controladora para *envenenar* dicha tabla de traducción hagan un objetivo claro. La idea de tener un servidor Proxy es la de reducir las peticiones y el tráfico en la red. Este escenario se explicará en la sección 4.1.3.

!!!!BORRAME!!!!

En una red TCP/IP, sección 3.1.1, los paquetes se envían para que alcancen un destinatario a través de una dirección IP. Bajo esta capa IP, tenemos la cabecera MAC donde la dirección de una máquina física esta escrita como siguiente o último destinatario. En caso de que un cliente desconozca dicha dirección física, debe preguntar por ella al resto de elementos de dicha red enviando una petición a todos los elementos de la red local.

Un esquema simple de un escenario ARP Spoofing sería el siguiente:

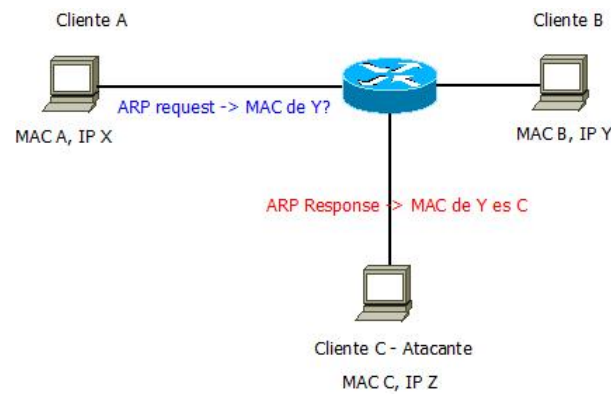


Figura 4.1: Escenario mensaje ARP

En el escenario superior nuestro Cliente A quiere comunicarse con el Cliente B. Cliente A sólo conoce la dirección IP del Cliente B. Nuestro Cliente A desconoce la dirección MAC del Cliente B.

El Cliente A por tanto pregunta a la red local si alguien conoce la dirección MAC que pertenece a dicha dirección IP del Cliente B y de ser así que le responda con tal información. Esto lo hará enviando un paquete ARP a todo el dominio de difusión.

Es entonces cuando nuestro Cliente B debería responder con la información pedida. Sin embargo, nuestro atacante, Cliente C, responde con un paquete ARP malicioso. Tiene información cambiada para suplantar la identidad de nuestro Cliente B. Ahora el Cliente A, enviará los paquetes con IP Y a la dirección MAC Z. Tipo de ataque Man-in-the-middle, sección ??.

Este tipo de ataques pertenecen a la capa 2 ya que estamos suplantando y manejando información de direcciones MAC que pertenecen al nivel de red de la pila TCP-IP, sección: 3.1.1.

Esto quiere decir que agentes externos a nuestra red no pueden alterar o recrear este tipo de ataques sin acceso a nuestra LAN.

Existen varios métodos para evitar en la medida de lo posible este tipo de ataques. Algunos de ellos sería:

- Completar la tabla ARP con entradas estáticas. Evitamos que nuestra tabla ARP este malformada pero añade un coste enorme de administración que grandes despliegues no pueden asumir.
- Inspeccion dinámica ARP ó en inglés "Dynamic ARP Inspection" (DAI). Gracias a esta tecnología podemos revisar respuestas y paquetes ARP contra nuestro servidor DHCP y verificar su validez. Si no tenemos una entrada IP-MAC en nuestro servidor DHCP entonces nos deshacemos del paquete. Esta tecnología la podemos usar en aquellos puertos que estimemos como no fiables.
- Asegurarnos que solo los dispositivos permitidos se pueden conectar a nuestra red local con método como 802.1X.

!!!!BORRAME!!!!

4.1.1. Escenario ARP Spoofing para SDN

En este primer escenario SDN, tendremos los elementos necesarios para desarrollar un ataque ARP Spoofing. Este es el escenario propuesto para este tipo de ataque:

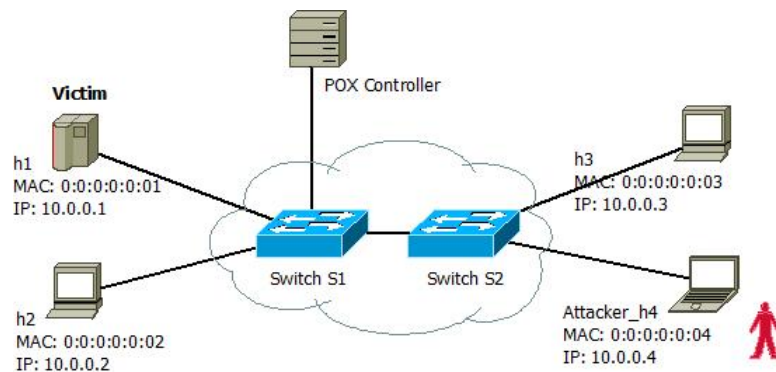


Figura 4.2: Escenario ataque ARP Spoofing

Nuestra topología para este escenario está recogida en el fichero *mininetSlice.py* que se puede encontrar en nuestro repositorio de GitHub ??.

Nuestro entorno de ejecución está explicado en el apartado *Entorno de Ejecución*, sección ??.

En este escenario, nuestra intención es desde la máquina atacante *h4* crear un ataque de intermediario ó *Man-in-the-middle MiTM* [20] [1]. El tráfico que el cliente ó víctima *h3* envíe al servidor *h1* pasará a través de *h4*.

Lanzamos nuestra topología en un terminal:

```
$ python2 mininetSlice.py
```

Lanzamos nuestra controladora POX en otra terminal:

```
$ pox.py forwarding.l2_learning
```

Tal y como se puede ver en la manera en que hemos lanzado la controladora POX, el control de las peticiones ARP no es centralizado sino individualmente y por cada host. Proxy ARP será tratado en la siguiente sección 4.1.3

Tras lanzar los *scripts*, los *hosts* tienen su tabla ARP vacía ya que no se ha efectuado ninguna interacción entre ellos. Recordamos que esta información se puede obtener a través del comando *arp* dentro del *Xterm* de cada uno de los *hosts*.

Dentro de *Mininet* ejecutamos el siguiente comando:

```
mininet> xterm h1 h3 h4
```

Dentro del *Xterm* de nuestro *h4* ejecutamos la aplicación *WireShark* y *Ettercap* (??)

```
$ wireshark &
$ ettarcap -G &
```

En *Wireshark* debemos elegir la interfaz *h4-eth1* para poder revisar el tráfico. En *Ettercap* debermos elegir la misma interfaz y añadir el *h1* y *h3* como *target* 1 y 2 respectivamente.

Dentro del *Mininet* ejecutamos le servidor web para nuestro *h1*:

```
mininet> h1 python -m SimpleHTTPServer 80 &
```

Ahora tenemos nuestro escenario preparado para el ataque. Si revisamos la tabla de ARP de nuestro *h1* justo antes de lanzar el mismo, veremos algo como lo siguiente:

Address	HWtype	HWAddresses	Flags Mask	Iface
10.0.0.4	ether	00:00:00:00:00:04	C	h1-eth1
10.0.0.3	ether	00:00:00:00:00:03	C	h1-eth1
10.0.0.2	ether	00:00:00:00:00:02	C	h1-eth1

Cuadro 4.1: Tabla ARP - Antes del ataque ARP Spoofing

Si ahora ejecutamos *Ettercap* y actualizamos la tabla ARP de *h1* veremos estos cambios:

Address	HWtype	HWAddresses	Flags Mask	Iface
10.0.0.4	ether	00:00:00:00:00:04	C	h1-eth1
10.0.0.3	ether	00:00:00:00:00:04	C	h1-eth1
10.0.0.2	ether	00:00:00:00:00:02	C	h1-eth1

Cuadro 4.2: Tabla ARP - Después del ataque ARP Spoofing

La situación actual de nuestra topología sería la siguiente:

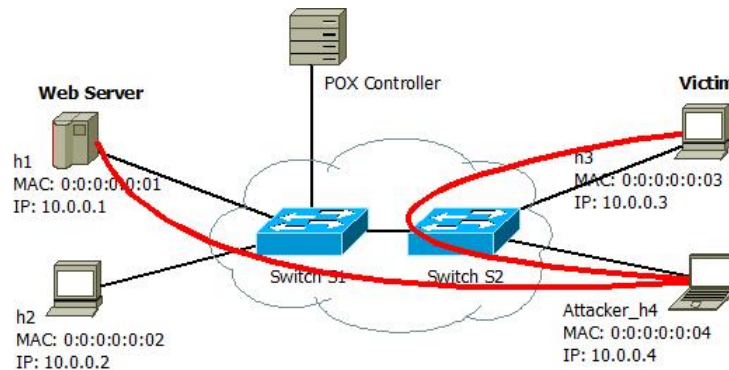


Figura 4.3: Ataque MiTM - ARP Spoofing

Podemos comprobar como todo el tráfico sigue funcionando entre *h3* y *h1* y que éste pasa a través de *h4* gracias a *WireShark*. Por ejemplo el tráfico hacia y desde el servidor Web pasará por *h4*. Para comprobarlo y desde el terminal *Mininet* ejecutamos el siguiente comando con el hacemos una petición al servidor web:

```
mininet> h3 wget -O h1
```

Esto es lo que vemos en *WireShark* de *h4*:

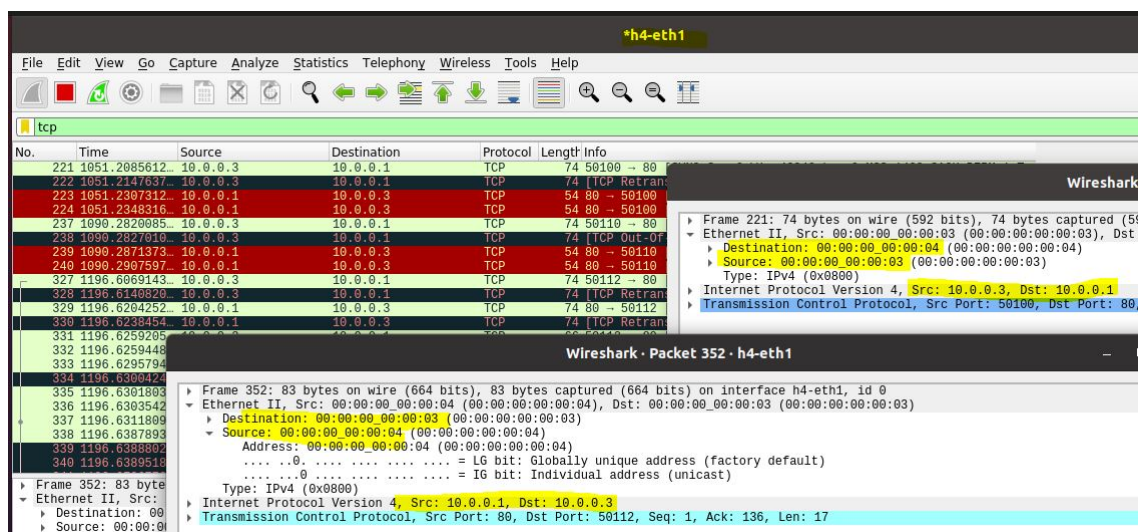


Figura 4.4: Ataque MiTM - WireShark

Podemos por tanto dar por confirmado que ataques del tipo *MiTM* [1] [2] usando ARP Spoofing es posible en redes SDN.

4.1.2. Mitigar ARP Spoofing para SDN

En esta sección plantearemos algunas soluciones para mitigar *ARP Spoofing* y evitar que ataques tan fáciles de reproducir como el arriba mencionado se reproduzcan.

Para ello mencionaremos algunos de los métodos que actualmente se usan y cuál es la versión que usan las redes SDN.

Las redes tradicionales usan varios métodos que suelen estar recogidos bajo algún nombre que aglutina varios de ellos. Un ejemplo sería el de *Dynamic ARP Protection* [49], sección 3.5.1.

De entre los métodos posibles, nos centraremos en:

- Crear listas estáticas en la tabla ARP donde las direcciones IP-MAC sean fijas y no se puedan cambiar en cada uno de los hosts, sección 4.1.2.1.
- Crear puertos de confianza o *trusted* de los cuales aceptemos tráfico ARP y otros que sean revisados o bloqueados llegado el caso.

4.1.2.1. Entradas estáticas IP-MAC para mitigar ARP Spoofing

Es una regla general que cada una de las entradas que componen la tabla ARP se actualiza cada cierto tiempo. Es por eso que cada dispositivo envíe paquetes ARP para actualizar dichos elementos, sección 3.3.4.

Por eso intentar envenenar esta tabla es el objetivo que persiguen los atacantes y que conseguimos en la sección anterior.

Una de las soluciones que proponemos es escribir de manera estática las entradas en dicha tabla y que los servidores relacionen inequívocamente una IP y su MAC para evitar así que terceros corrompan esta información.

Esto lo podemos conseguir con un pequeño re-diseño en la lógica de nuestra topología anterior para *Mininet* y que se encuentra en el fichero: *MitigateARPSpoofingStatic.py*, repositorio en [48]. En esta topología hemos *forzado* a los *hosts* a incluir entradas estáticas en dicha tabla que quedaría así para el *h1*:

Address	HWtype	HWAddresses	Flags Mask	Iface
10.0.0.4	ether	00:00:00:00:00:04	CM	h1-eth1
10.0.0.3	ether	00:00:00:00:00:03	CM	h1-eth1
10.0.0.2	ether	00:00:00:00:00:02	CM	h1-eth1

Cuadro 4.3: Tabla ARP - Entradas estáticas

Podemos confirmar como el *flag* confirma que dicha entrada ha sido manualmente introducida (sección 3.3.4).

Intentemos realizar el mismo ataque hecho en 4.1.1 desde *host h4* para comprobar si este método es efectivo.

Nuestro *hosts*, *h1* y *h3*, reciben paquetes ARP para que actualicen su tabla ARP. Sin embargo, los servidores comprueban que dichos valores ya están asignados y por tanto no

lo actualizan.

En la siguiente captura de pantalla vemos que *h1* recibe paquetes ARP de *h4* con nuevos valores *envenenados* que no son actualizados en la tabla ARP:

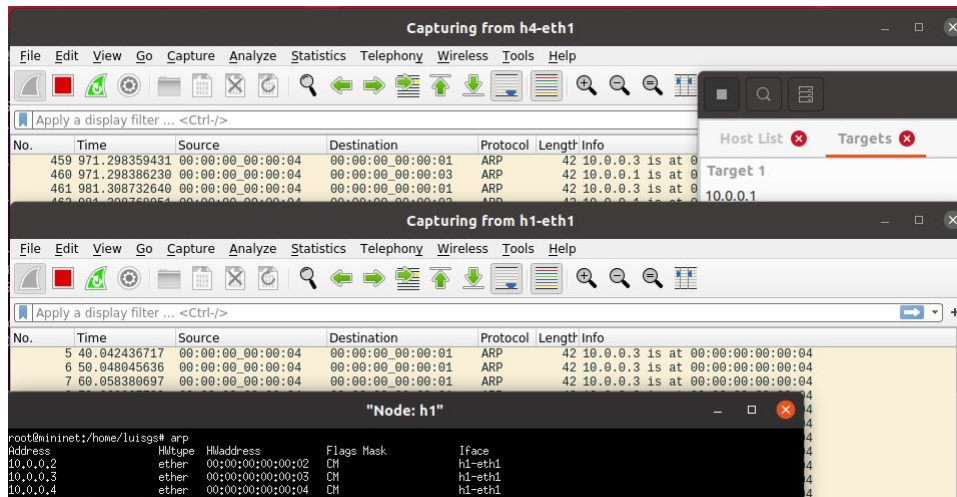


Figura 4.5: Tabla ARP - Entradas estáticas en WireShark

Por tanto podemos concluir que este pequeño método es válido para mitigar un ataque ARP Spoofing como el mencionado en 4.1.1. Sin embargo tiene ciertas limitaciones y desventajas que debemos plantearnos y tener en cuenta. Algunas de ellas serían:

- Deben ser introducidas manualmente lo que requiere de trabajo extra por parte de los administradores
- Se debe mantener una lista actualizada con estos elementos.

Si tenemos en cuenta estas desventajas, podemos comprender porque en redes con cientos de dispositivos es inviable. Más información en [50] [51].

4.1.2.2. Puertos confiables para mitigar ARP Spoofing

Paquetes ARP recibidos en los puestos confiables no son revisados mientras que los paquetes ARP de los puertos no confiables son revisados contra la tabla IP-MAC.

Un primer intento de bloquear tráfico ARP proveniente de puertos no confiables podría ser:

```
mininet > sh ovs-ofctl add-flow s2 in_port=3,\
dl_type=0x806 ,dl_dst=00:00:00:00:01 ,actions=drop
```

Este *flow* se lanza y se inserta en el switch 2 de nuestra topología, figura 4.3. Con ello *tiramos* todo el tráfico de tipo ARP, *dl type=0x806*, con destino nuestra máquina *h1* y que entre en el puerto donde nuestro atacante está conectado. Hemos roto la redirección

y el ataque *MiTM*.

Una propuesta más refinada sería enviar a nuestra controladora todos los paquetes ARP que provienen de estos puertos no confiables para que ésta los revise y responda adecuadamente.

Para ello tenemos que redirigir el tráfico ARP del puerto no confiable a nuestra controladora:

```
mininet > sh ovs-ofctl add-flow s2 in_port=3,
dl_type=0x806, actions=controller
```

4.1.3. Escenario Proxy ARP Spoofing para SDN

En este escenario usaremos la controladora *POX* como *Proxy ARP* [1] [2].

Nuestra controladora como *Proxy ARP* responderá a las peticiones de ARP de manera centralizada y pedirá la información en caso de carecer de ella. La controladora será por tanto la garante que los *hosts* tengan su tabla ARP correcta.

Usando nuestra controladora como *Proxy ARP* ofrece sencillez en el mantenimiento de nuestra red y evita tráfico innecesario. Sin embargo, si la tabla ARP de la controladora se ve alterada, toda la red que ésta controla está comprometida.

Este es nuestro nuevo escenario:

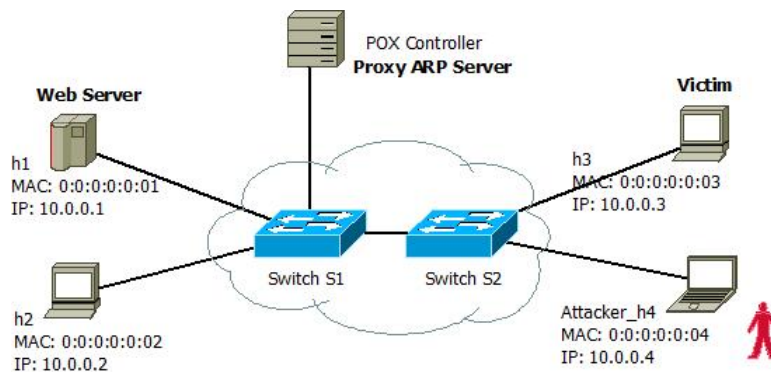


Figura 4.6: Escenario ataque Proxy ARP Spoofing

Lanzamos nuestra topología en un terminal:

```
$ python2 mininetSlice.py
```

Lanzamos nuestra controladora POX en otra terminal pero haciendo que trabaje como Proxy ARP (véase sección 3.4.3):

```
$ pox.py proto.arp_responder forwarding.l2_learning
```

Dentro de *Mininet* ejecutamos el siguiente comando:

```
mininet> xterm h1 h3 h4 s1
```

Tenemos que revisar el tráfico que viaja a nuestra controladora a través del switch *s1*.

Dentro del *Xterm* de nuestro *h4* ejecutamos la aplicación *WireShark* y *Ettercap* (??)

```
$ wireshark &
$ ettercap -G &
```

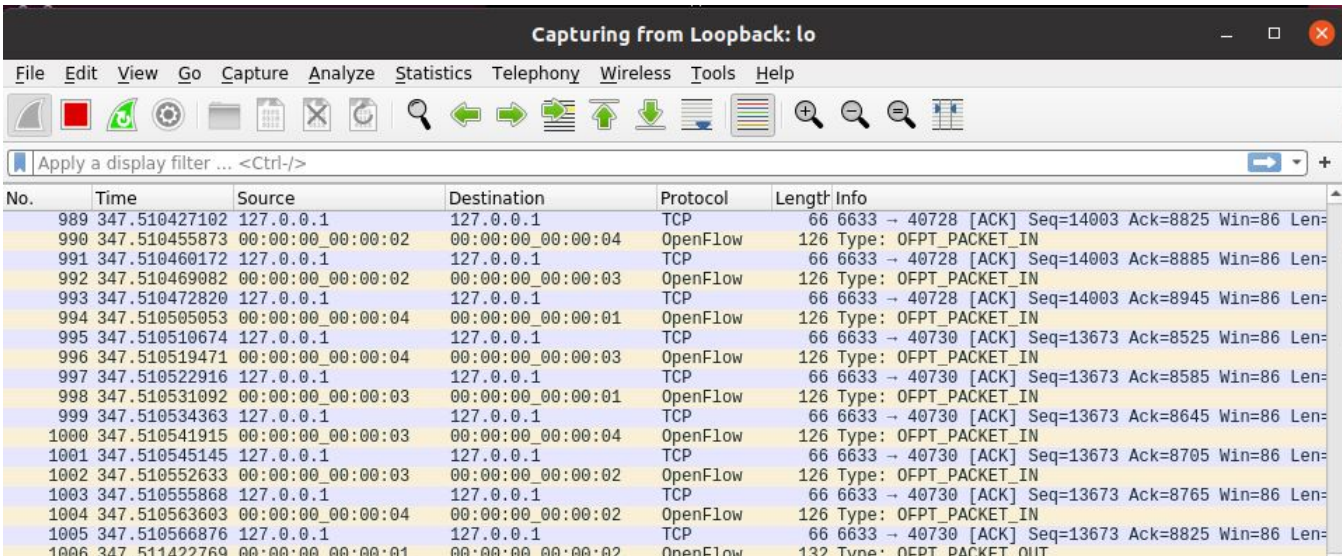
En *Wireshark* debemos elegir la interfaz *h4-eth1* para poder revisar el tráfico. En *Ettercap* debemos elegir la misma interfaz y añadir el *h1* y *h3* como *target* 1 y 2 respectivamente.

Dentro del terminal para *s1* ejecutamos la aplicación *WireShark* y seleccionamos la interfaz *loopback* que es la interfaz donde la controladora se comunica con los switches y podremos encontrar tráfico del tipo OpenFlow (??):

```
$ wireshark &
```

Esta sería una pequeña captura de pantalla del tráfico capturado tras lanzar este comando en *Mininet*:

```
mininet> pingall
```



No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
989	347.510427102	127.0.0.1	127.0.0.1	TCP	66	6633 → 40728 [ACK] Seq=14003 Ack=8825 Win=86 Len=
990	347.510455873	00:00:00_00:00:02	00:00:00_00:00:04	OpenFlow	126	Type: OFPT_PACKET_IN
991	347.510460172	127.0.0.1	127.0.0.1	TCP	66	6633 → 40728 [ACK] Seq=14003 Ack=8885 Win=86 Len=
992	347.510469082	00:00:00_00:00:02	00:00:00_00:00:03	OpenFlow	126	Type: OFPT_PACKET_IN
993	347.510472820	127.0.0.1	127.0.0.1	TCP	66	6633 → 40728 [ACK] Seq=14003 Ack=8945 Win=86 Len=
994	347.510505053	00:00:00_00:00:04	00:00:00_00:00:01	OpenFlow	126	Type: OFPT_PACKET_IN
995	347.510510674	127.0.0.1	127.0.0.1	TCP	66	6633 → 40730 [ACK] Seq=13673 Ack=8525 Win=86 Len=
996	347.510519471	00:00:00_00:00:04	00:00:00_00:00:03	OpenFlow	126	Type: OFPT_PACKET_IN
997	347.510522916	127.0.0.1	127.0.0.1	TCP	66	6633 → 40730 [ACK] Seq=13673 Ack=8585 Win=86 Len=
998	347.510531092	00:00:00_00:00:03	00:00:00_00:00:01	OpenFlow	126	Type: OFPT_PACKET_IN
999	347.510534363	127.0.0.1	127.0.0.1	TCP	66	6633 → 40730 [ACK] Seq=13673 Ack=8645 Win=86 Len=
1000	347.510541915	00:00:00_00:00:03	00:00:00_00:00:04	OpenFlow	126	Type: OFPT_PACKET_IN
1001	347.510545145	127.0.0.1	127.0.0.1	TCP	66	6633 → 40730 [ACK] Seq=13673 Ack=8705 Win=86 Len=
1002	347.510552633	00:00:00_00:00:03	00:00:00_00:00:02	OpenFlow	126	Type: OFPT_PACKET_IN
1003	347.510555868	127.0.0.1	127.0.0.1	TCP	66	6633 → 40730 [ACK] Seq=13673 Ack=8765 Win=86 Len=
1004	347.510563603	00:00:00_00:00:04	00:00:00_00:00:02	OpenFlow	126	Type: OFPT_PACKET_IN
1005	347.510566876	127.0.0.1	127.0.0.1	TCP	66	6633 → 40730 [ACK] Seq=13673 Ack=8825 Win=86 Len=
1006	347.511422769	00:00:00_00:00:01	00:00:00_00:00:02	OpenFlow	132	Type: OFPT_PACKET_OUT

Figura 4.7: WireShark - Openflow

También podemos confirmar que los paquetes se envían a la controladora gracias a las instrucciones, *flows*, instaladas en los switches:

```
mininet> dpctl dump-flows
```

Dentro del *Mininet* ejecutamos el servidor web para nuestro *h1*:

```
mininet> h1 python -m SimpleHTTPServer 80 &
```

Ahora tenemos nuestro escenario preparado para el ataque. Si revisamos la tabla de ARP de nuestro *h1* justo antes de lanzar el mismo, veremos lo siguiente:

Address	HWtype	HWAddresses	Flags	Mask	Iface
10.0.0.4	ether	00:00:00:00:00:04	C		h1-eth1
10.0.0.3	ether	00:00:00:00:00:03	C		h1-eth1
10.0.0.2	ether	00:00:00:00:00:02	C		h1-eth1

Cuadro 4.4: Tabla ARP - Antes del ataque Proxy ARP Spoofing

Con nuestro escenario desplegado y las herramientas preparados podemos lanzar el ataque con *Etttercap*. Actualizamos la tabla ARP de *h1* veremos estos cambios:

Address	HWtype	HWAddresses	Flags	Mask	Iface
10.0.0.4	ether	00:00:00:00:00:04	C		h1-eth1
10.0.0.3	ether	00:00:00:00:00:04	C		h1-eth1
10.0.0.2	ether	00:00:00:00:00:02	C		h1-eth1

Cuadro 4.5: Tabla ARP - Después del ataque Proxy ARP Spoofing

La situación actual de nuestra topología sería la siguiente:

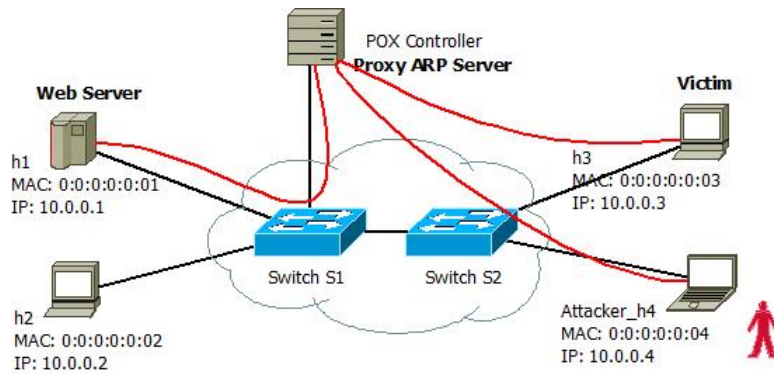


Figura 4.8: Ataque MiTM - Proxy ARP Spoofing

Podemos comprobar como todo el tráfico sigue funcionando entre *h3* y *h1* y que éste pasa a través de *h4* gracias a *WireShark*. Por ejemplo el tráfico hacia y desde el servidor Web pasará por *h4*. Para comprobarlo y desde el terminal *Mininet* ejecutamos el siguiente comando con el hacemos una petición al servidor web:

```
mininet> h3 wget -O h1
```

Esto es lo que vemos en *WireShark* de *h4*:

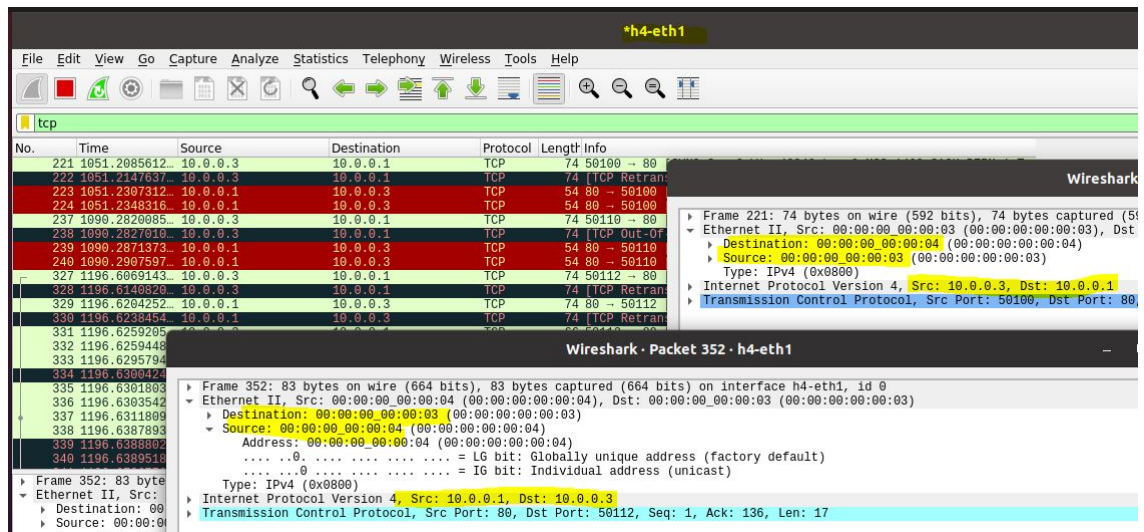


Figura 4.9: Ataque MiTM - WireShark

Podemos por tanto dar por confirmado que ataques del tipo *MiTM* [1] [2] usando ARP Spoofing es posible en redes SDN.

4.1.4. Mitigar Proxy ARP Spoofing para SDN

4.2. DDoS

4.3. DNS Spoofing

Bibliografía

- [1] *Wikipedia ES*, <http://es.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Portada>
- [2] *Wikipedia EN*, http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page
- [3] *Redes activas*, <http://arxiv.org/pdf/cs/0203014.pdf>
- [4] *Proyecto ANTS*, http://www.cse.wustl.edu/~jain/cis788-97/ftp/active_nets/
- [5] *Proyecto SwitchWare*, <http://www.cis.upenn.edu/~switchware/papers/switchware.ps>
- [6] *Crecimiento de Internet*, <https://purplesec.us/resources/cyber-security-statistics/>
- [7] *Crecimiento de ataques en Internet*, <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>
- [8] *Gartner*, <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/is-the-cloud-secure/>
- [9] *ITU releases 2014 ICT figures*, http://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Documents/statistics/2014/ITU_Key_2005-2014_ICT_data.xls
- [10] *Estándares IEEE*, <https://tools.ietf.org/>
- [11] *SDN: Software Defined Networks*. Thomas D. Nadeau & Ken Gray. Primera Edición. O'Really, 2013. 384 páginas. ISBN: 978-1-449-34230-2
- [12] *Cloud Computing en Inglés*, <http://www8.hp.com/hpnext/tags/cloud-computing#.VQgHvY7F9P0>
- [13] *Apache CloudStack Cloud Computing*. Navin Sabharwal Ravi Shankar. SBN 978-1-78216-010-6
- [14] *Helion en inglés*, <http://www8.hp.com/us/en/cloud/helion-overview.html>
- [15] *OpenStack en inglés*, <https://www.openstack.org/>

- [16] *rfcorg*. <https://www.ietf.org/standards/rfcs/>
- [17] *802.1D-2004 Spanning Tree Protocol*, <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.1D-2004.pdf>
- [18] *Definición de ARP*. https://support.hpe.com/hpesc/public/docDisplay?docId=emr_na-c00686597
- [19] *IETF de ARP*. <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc826>
- [20] *ARP Spoofing*. https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/switches/lan/catalyst_pon/software/configuration_guide/sec/b-gpon-config-security/preventing_arf_spoofing_and_flood_attack.html
- [21] *DHCP Snooping*. <https://community.arubanetworks.com/blogs/esupport1/2020/04/30/how-to-configure-dhcp-snooping>
- [22] *Software Defined Networks A Comprehensive Approach*. Paul Göransson y Chuck Black. Kaitlin Herbert. 333 páginas. ISBN: 978-0-12-416675-2
- [23] *Preguntas frecuentes acerca de OF por HP en inglés*, http://h20195.www2.hp.com/V2/GetPDF.aspx/4AA4-4714ENW.pdf?jumpid=em_r1165_ww/en/large/eg/RelatedLink/Virtual_Application_Networks_Overview_FAQs/resourcefinder/Jan_2013
- [24] *Documentación de Standorfs University acerca de Openflow y SDN*, http://archive.openflow.org/wk/index.php/OpenFlow_Releases
- [25] *Visión de HP para SDI*, <http://h20195.www2.hp.com/v2/GetPDF.aspx/4AA5-5770ENW.pdf>
- [26] *WebSprocket - Soft Switch*, https://s3-us-west-2.amazonaws.com/sdnarchive/vmf_technicalreference12.pdf
- [27] *Aplicación Geoplex*, <http://www.cerias.purdue.edu/>
- [28] *Definición de OpenFlow* <https://www.opennetworking.org/sdn-resources/openflow/57-sdn-resources/onf-specifications/openflow?layout=blog>
- [29] *Portal oficial de Openflow* <http://archive.openflow.org/documents/openflow-wp-latest.pdf>
- [30] *Información sobre OpenFlow 1.5* <https://opennetworking.org/wp-content/uploads/2014/10/openflow-switch-v1.5.1.pdf>
- [31] *Documentación de OpenFlow 1.4* <https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/onf-specifications/openflow/openflow-spec-v1.4.0.pdf>

- [32] *HP VAN SDN Controller*, <http://h17007.www1.hp.com/docs/networking/solutions/sdn/4AA4-8807ENW.PDF>
- [33] *Controladora NOX*, <http://www.noxrepo.org/>
- [34] *Controladora POX*, <https://openflow.stanford.edu/display/ONL/POX+Wiki>
- [35] *Controladora POX*, <http://www.noxrepo.org/pox/about-pox/>
- [36] *Página principal de Python*, <https://www.python.org/>
- [37] *OpenDayLight*. <https://www.opendaylight.org/getting-started>
- [38] *Página principal de Mininet*, <http://mininet.org/overview/>
- [39] *Introducción a Mininet*, <https://github.com/mininet/mininet/wiki/Introduction-to-Mininet#what>
- [40] *Aplicación WireShark*, <https://www.wireshark.org/>
- [41] *Aplicación Ostinato*, <https://code.google.com/p/ostinato/>
- [42] *Lista Gartner empresas de redes*. <https://www.gartner.com/reviews/market/wired-wireless-lan-access-infrastructure>
- [43] *Sistema Operativo ArubaOS*. https://www.arubanetworks.com/assets/ds/DS_ArubaOS.pdf
- [44] *Sistema monolítico vs microkernel*. <https://www.8bitavenue.com/2012/11/monolithic-vs-microkernel-os-architectures>
- [45] *Lista de tecnologías ArubaOS*. https://support.hpe.com/hpesc/public/docDisplay?docId=a00038733en_us
- [46] *Lista amenazas SDN* <https://www.routerfreak.com/9-types-software-defined-network-attacks-protect/>
- [47] *Lista amenazas SDN2* <https://www.blackhat.com/docs/us-16/materials/us-16-Yoon-Attacking-SDN-Infrastructure-Are-We-Ready-For-TPdf>
- [48] *Repositorio GitHub* <https://github.com/luisgs/ThreadMySDN>
- [49] *Dynamic ARP Protection en ArubaOS* https://techhub.hpe.com/eginfolib/networking/docs/switches/WB/15-18/5998-8152_wb_2920_asg/content/ch11s04.html
- [50] *Huawei ARP Guide* <https://support.huawei.com/enterprise/en/doc/EDOC1100055041/ec75616e/static-arp>
- [51] *TCP Guide* http://www.tcpiipguide.com/free/t_ARPCaching.htm

- [52] *Aplicación VIM*, <http://www.vim.org/>
- [53] *Gartner, Inc. (NYSE: IT)*, <http://www.gartner.com/technology/home.jsp>
- [54] *Predicciones tecnológicas Gartner para el 2014* <http://www.networkworld.com/article/2170665/data-center/gartner--the-top-10-it-altering-predictions-for-2014.html>
- [55] *Reporte Gartner acerca de SDN*. <https://www.gartner.com/doc/2807621>
- [56] *Gartner - Curva de vida para nuevas tecnologías*. <http://www.gartner.com/technology/research/methodologies/hype-cycle.jsp>
- [57] *SDX Central - SDN reporte*. <https://www.sdxcentral.com/wp-content/uploads/2015/02/sdn-market-sizing-report-0413-4.pdf>
- [58] *Gartner - Previsión futura para 2015*. <http://www.telco.com/blog/gartner-sees-software-defined-applications-as-a-top-technology-trend-for#.VRf2sfmUdP1>
- [59] *SDX Central*. <https://www.sdxcentral.com/>

Índice de figuras

3.1. Modelo Cliente-Servidor	6
3.2. Modelo TCP/IP y OSI	8
3.3. Modelo computacion en la nube	10
3.4. Arquitectura Computación en la nube	11
3.5. Tipos de Cloud	12
3.6. Pila de protocolo TLS	16
3.7. Mensaje ARP	17
3.8. Paquete ARP	17
3.9. Escenario mensaje ARP	18
3.10. Modelo SDN y actual	19
3.11. Esquema Switch Controladora en Openflow	22
3.12. Flowchart	23
3.13. Logotipo POX	23
3.14. Topología MiniEdit	26
3.15. Diagrama de Aruba OS	28
3.16. Centro de datos	29
4.1. Escenario mensaje ARP	32
4.2. Escenario ataque ARP Spoofing	33
4.3. Ataque MiTM - ARP Spoofing	35
4.4. Ataque MiTM - WireShark	35
4.5. Tabla ARP - Entradas estáticas en WireShark	37
4.6. Escenario ataque Proxy ARP Spoofing	38
4.7. WireShark - Openflow	39
4.8. Ataque MiTM - Proxy ARP Spoofing	40
4.9. Ataque MiTM - WireShark	41

Índice de cuadros

3.1.	Tabla de usuarios usando Internet	7
3.2.	Tabla comparativa - Evolución de <i>Openflow</i>	21
3.3.	Tabla comparativa de controladoras SDN	25
4.1.	Tabla ARP - Antes del ataque ARP Spoofing	34
4.2.	Tabla ARP - Después del ataque ARP Spoofing	34
4.3.	Tabla ARP - Entradas estáticas	36
4.4.	Tabla ARP - Antes del ataque Proxy ARP Spoofing	40
4.5.	Tabla ARP - Después del ataque Proxy ARP Spoofing	40