

Software Defined Networks

Priscilla Piedra y Martín Flores
 Escuela de Ingeniería en Computación
 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica
 {ppiedra90, mfloresg}@gmail.com

Resumen—Las redes definidas por software (SDN) constituyen quizás el área de investigación y desarrollo más activo en el campo de las redes en los últimos 20 años aunque su auge se ha hecho más palpable en los últimos 5 años gracias a proyectos e iniciativas tanto comerciales como de código abierto que han logrado poner a disposición productos para la implementación de este tipo de redes. Si bien el concepto de definición y gestión de redes por medio de software resulta nuevo, es un concepto que ha sido inspirado por trabajo previo en sistemas distribuidos, virtualización y automatización en donde se propone una clara separación de responsabilidades con el fin de lograr mayor eficiencia en el sistema. Este reporte brinda una introducción a SDN y a sus conceptos principales. También hace una introducción a OPENFLOW, un protocolo para implementar SDN.

1. INTRODUCCIÓN

LAS Redes Definidas por Software (SDN por sus siglas en inglés) es una nueva arquitectura aplicada a las redes con el fin de aportar agilidad en redes que son estáticas o complejas para aplicar cambios que pueden estar dedicadas a brindar servicios individuales. El concepto de SDN busca la administración de diferentes servicios de forma dinámica aplicados en una infraestructura de hardware común. Por ejemplo, con una red SDN se podría controlar la red según la demanda que esta tenga y sacar provecho al optimizar las cargas de la red.

Algunas ventajas de las redes SDN se ven reflejadas en la disminución de gastos en recurso físico y la centralización, lo cual permite que se pueda analizar la red, creando rutas óptimas de forma determinista, atender de forma dinámica las peticiones de las aplicaciones, optimizar el uso de la red sin sacrificar la calidad del servicio y puede filtrar paquetes que viajan por la red añadiendo seguridad a la red pues se pueden redireccionar paquetes maliciosos.

Las redes SDN surgen de la necesidad de una nueva arquitectura de redes. Parte de las necesidades que se querían cubrir con un nuevo paradigma de red eran: cambiar el tráfico según patrones (definir redes públicas, privadas, etc), manejo de redes ubicadas en diferentes regiones, acceso a la red desde diferentes dispositivos, inicio de los servicios cloud y aumento en almacenamiento de grandes cantidades de datos son algunas de las principales razones para comenzar a ver cambios en la implementación de las redes.

Las redes tradicionales tienen ciertas limitaciones como la jerarquía en la que se basa su construcción, la complejidad en escalabilidad de dispositivos que requieren nueva programación y configuraciones, dependencia de proveedores, diferencias entre los requerimientos del mercado y las capacidades de las redes. Estas son solo algunas de las principales razones para buscar una solución que permitiera inyectar dinamismo en la red.

Este documento fue realizado durante el curso *Redes de Computadoras Avanzadas*, impartido por el profesor Luis Carlos Loaiza Canet. Programa de Maestría en Computación, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Segundo Semestre, 2017.

2. BREVE RESEÑA

Aunque el éxito de SDN se ha hecho más palpable recientemente, muchas de las ideas de la tecnología subyacente ha evolucionado por más de 20 años (o más). De algún modo, SDN retoma ideas de las primeras redes telefónicas, que tenían una clara separación de los planos de control y datos para simplificar la administración de la red y la agregación de nuevos servicios. Aún así, interfaces abiertas tal y como OPENFLOW permiten mayor innovación en las plataformas de controladores y aplicaciones que lo que se podía hacer en redes cerradas diseñadas para un limitado rango de servicios telefónicos. De igual forma, SDN parece retomar investigación pasada en *active networking* que introdujo conceptos de redes programables, aunque con un énfasis en planos de datos programables. SDN también se relaciona con otros trabajos previos en separación de los planos de control y datos en redes de computadoras.

La historia de SDN inició más de 20 años atrás, justo cuando Internet estaba despegando. Muchas de las innovaciones en el comunidad de investigación en redes fueron influenciadas de alguna forma u otra por el progreso de otras áreas tales como sistemas distribuidos, sistemas operativos y lenguajes de programación. Los esfuerzos para crear una infraestructura de red programable también estuvieron claramente relacionados con el trabajo en el soporte programable de procesamiento de paquetes a altas velocidades.

En [4] se divide la historia de SDN en tres etapas:

1. ***active networks*** mediados de los 90 a inicios del 2000: que introdujo funciones programables en la red, lo cual condujo a una mayor innovación.
2. **Separación de los planos de control y datos** alrededor del 2001 al 2007, en donde se desarrolló interfaces abiertas entre los planos de control y datos.
3. **El API de OPENFLOW y sistemas operativos de red** del 2007 al 2010, que representó el primera adopción generalizada de una interfaz abierta y desarrolló forma para hacer la separación de los planos de control y datos escalable.

La virtualización de redes también jugó un rol importante a través de la evolución histórica de SDN como uno de los primeros casos de uso significativos para SDN.

Este documento presneta: 3) Definición de SDN a traves de su arquitectura, características fundamentales y operativa; 4) introducción al protocolo OPENFLOW, sus principales características, beneficios y otros protocolos relacionados a SDN.

3. SOFTWARE DEFINED NETWORKS

El *Open Network Foundation* – la organización encargada de promover la implementación de redes SDN y estándares para las mismas - define SDN como la separación física del plano de control (*control plane*) de la red del plano de datos o reenvío (*forwarding plane*), en donde un plano de control controla varios dispositivos [2].

El objetivo de las redes SDN es brindar una interfaz abierta que pueda permitir el desarrollo de software para controlar la conectividad dentro de una red, el flujo y el tráfico. La idea central es desacoplar el control de la red del de datos y que además sea programable. Al tener una separación entre la parte lógica y la física se busca abstraer los servicios y las aplicaciones los cuales pueden tratar la red como una entidad lógica o virtual.

3.1. Arquitectura

Los dispositivos de red tradicionales, como un *switch*, tiene 3 planos: el plano de administración, el plano de control y el plano de datos. El plano de administración permite la configuración del dispositivo y el de control, que controla el enrutamiento del tráfico. La tabla de ruteo la llena el plano de control (por un algoritmo de enrutamiento) que a su vez determina cómo el tráfico debería ser enrutado por el hardware. Finalmente, la capa de datos se encarga de este enrutamiento. Uno de los problemas con las redes tradicionales, el cual SDN está intentando cambiar, es que cada dispositivo en la red tiene su propio plano de administración, control y de datos. Si la red tiene 100 *switches*, entonces se tienen 100 planos de administración, 100 de control y 100 de datos. Se tiene que administrar cada dispositivo por separado, cada uno ejecutando un algoritmo distribuido de enrutamiento como *Open Shortest Path first*(OSPF) que tiene que determinar la mejor ruta de un punto de la red al otro y que, con suerte tendrá conocimiento completo de la red o al menos uno bueno de la misma. OSPF y otros algoritmos distribuidos de enrutamiento son complejos y no necesariamente elijen la mejor ruta porque no tienen una vista del tamaño total de la red.

Con SDN, la idea es remover el “cerebro” o la “inteligencia” del dispositivo de red y llevarlo a un dispositivo diferente como un **controlador**: un dispositivo que actúa como un punto de control estratégico – probablemente compuesto de varios servidores físicos- que controla varios dispositivos de red tanto físicos como virtuales y que tiene mejor conocimiento de la red porque es un único ente controlando la totalidad de red o una porción de la misma. Protocolos como OPENFLOW permiten al plano de control manipular el enrutamiento de tráfico a través de la red realizando mejores decisiones a la hora de calcular rutas y de gestionar de la red.

SDN define una arquitectura formada por tres capas distintas como se muestra en la figura 5:

Capa de infraestructura

Se ubica el equipo físico de transferencia (*routers*, *switches*, etc).

Capa de control

Se encuentran los **controladores** SDN y aplicaciones escritas por programadores que interactúan con el controlador utilizando lo que se conoce como la interfaz *northbound*. Para interactuar con los dispositivos de la red, el controlador usa la interfaz *softbound*. El controlador envía mensajes a los dispositivos usando varios protocolos – Uno de ellos es OPENFLOW - en la intefaz *softbound*. A diferencia de un *switch* o *router* tradicional, en un ambiente SDN puro el cerebro del dispositivo de red es removido del mismo y se coloca en la capa de control en un dispositivo por separado.

Capa de aplicación

Las aplicaciones en esta capa manipulan el flujo de tráfico a través de la red. SDN permite control sobre toda la red desde un solo punto lo cual simplifica el diseño y el mantenimiento de la red. También reduce el trabajo entre dispositivos de red pues solo necesitan recibir instrucciones de la capa de control en vez de entender y procesar distintos protocolos.

El trabajo de los operadores de red también se ve reducido a sólo mantener y configurar la capa de control, lo cual les da tiempo para aprovechar en la mejora de la red al implementar inteligencia para alterar el comportamiento de la misma de forma dinámica y responder a las necesidades de clientes.

La arquitectura SDN soporta un conjunto de intefases de programación (API) para incluir servicios como ruteo, seguridad, control de acceso, manejo de rutas, distribución de cargas, entre otros. SDN promueve el uso de estas APIs que pueden ser de código abierto, dejando de lado el soporte de proveedores. Si por ejemplo se quisiera implementar un nuevo algoritmo de enrutamiento y ponerlo a disposición en los *routers* de un cierto fabricante, este podría negarse a incluirlo. De la misma forma en la que el *Apple Store* o *Google Play* permiten a los programadores de aplicaciones a escribir sus propios programas al proveer interfaces de programación de alto nivel para tener acceso a los recursos de los teléfonos, una de las ideas de SDN es que un programador pueda escribir su propio programa y por medio de la interfaz *northbound* se pueda controlar el flujo del tráfico de la red. El controlador abstrae la complejidad detrás de la programación de la red y la interfaz abierta en los dispositivos de red permite que el programador controle, por medio del programa que escribió, el flujo del tráfico. Se podría utilizar un lenguaje de alto nivel como Python para programar los circuitos de los *switches* sin tener que enviar mensajes de bajo nivel a dispositivos individuales en la red y cambiarle la configuración. La complejidad de la red se le oculta al programador: se puede escribir una aplicación de alto nivel que manupule el flujo de los datos a través de la red utilizando un protocolo como OPENFLOW pero, la complejidad de OPENFLOW y la complejidad de los dispositivos de la red están ocultos o abstraídos. De esta forma el

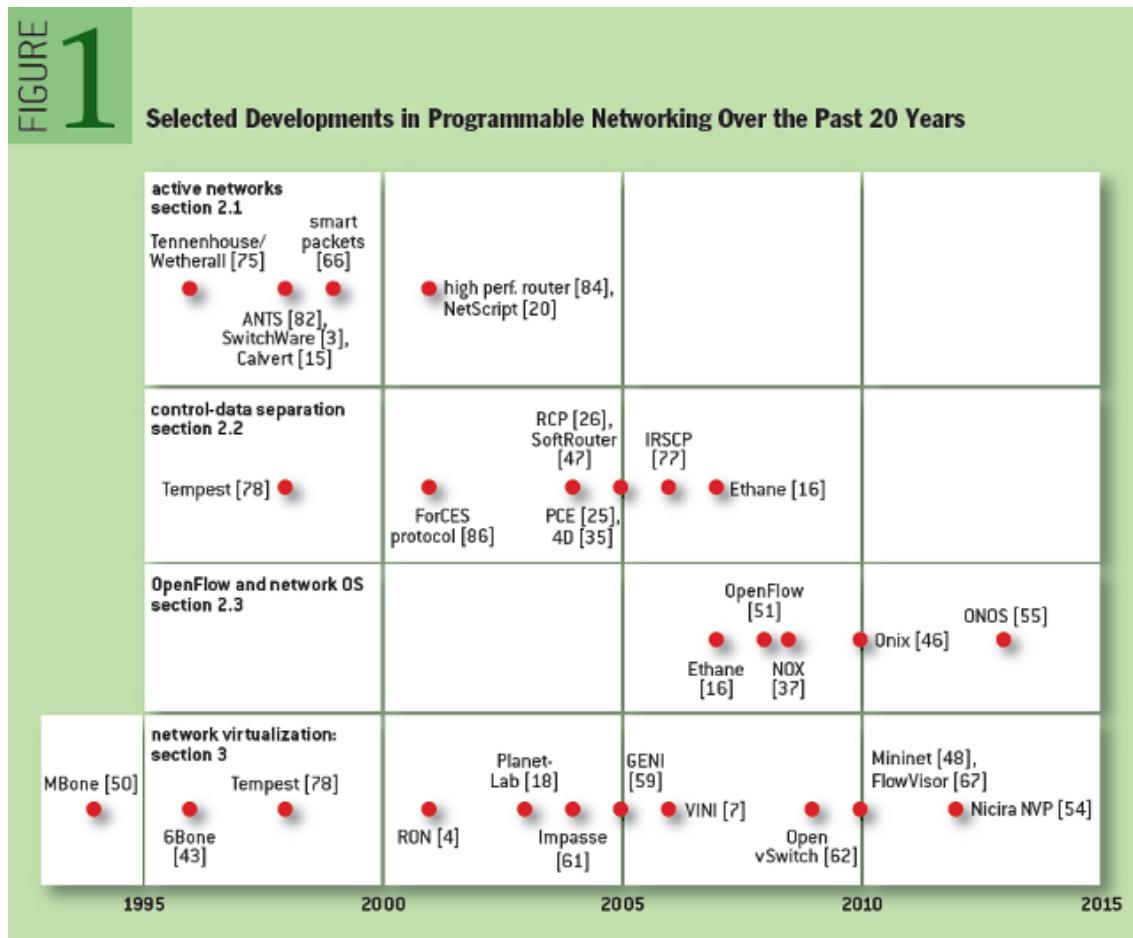


Figura 1. Desarrollos selectos en el campo de redes programables en los últimos 20 años. Tomado de *The Road to SDN* [4].

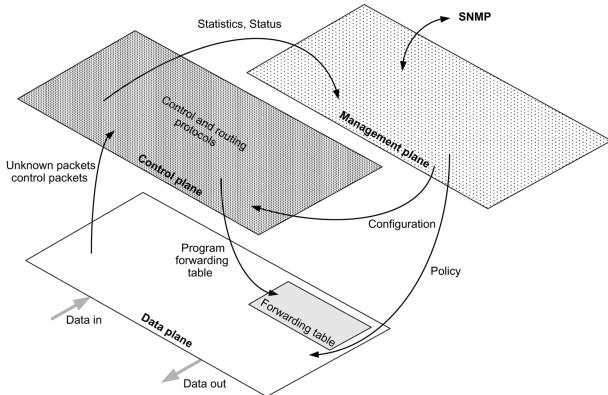


Figura 2. Arquitectura de un dispositivo tradicional. Fuente: *Software Defined Networks* [5].

programador solamente tiene que tener conocimiento una interfaz de alto nivel para escribir un programa manipule el envío de tráfico de un punto *a* a un punto *b*.

3.2. Características Fundamentales de SDN

3.2.1. Separación de planos

La primer característica fundamental de SDN es la separación de los planos de control y datos. Funcionalidades de reenvío (*forwarding*) incluyendo las tablas lógicas y las tablas

para escoger cómo lidiar con los paquetes entrantes, basados en características tales como una dirección MAC, dirección IP o una VLAN ID, residen en el plano de datos. Las acciones fundamentales realizadas por el plano de datos pueden ser descritas de acuerdo a cómo manejan los paquetes que llegan. Se puede hacer *forward*, *drop*, *consume* o *replicate* a un paquete entrante. También se puede transformar el paquete de alguna forma antes de tomar una acción posterior.

La lógica y los algoritmos que son usados para programar el plano de datos reside en el plano de control. Muchos de estos protocolos y algoritmos requieren conocimiento global de la red. El plano de control determina cómo las tablas de reenvío (*forwarding tables*) y la lógica en el plano de datos debería ser programada o configurada. En una red tradicional cada dispositivo tiene su propio plano de control (figura 2), la tarea primaria de ese plano de control es ejecutar protocolos de ruteo y *switching* de tal forma que todas las tablas de reenvío en los dispositivos en toda la red están sincronizadas.

3.2.2. Dispositivos simples y control centralizado

Los dispositivos son ahora controlados por un sistema centralizado ejecutando software de administración y control. En lugar de cientos o miles de líneas de complicado software de plano de control ejecutándose en el dispositivo y que le permite comportarse de forma autónoma, ese software es removido del dispositivo y puesto en un controlador

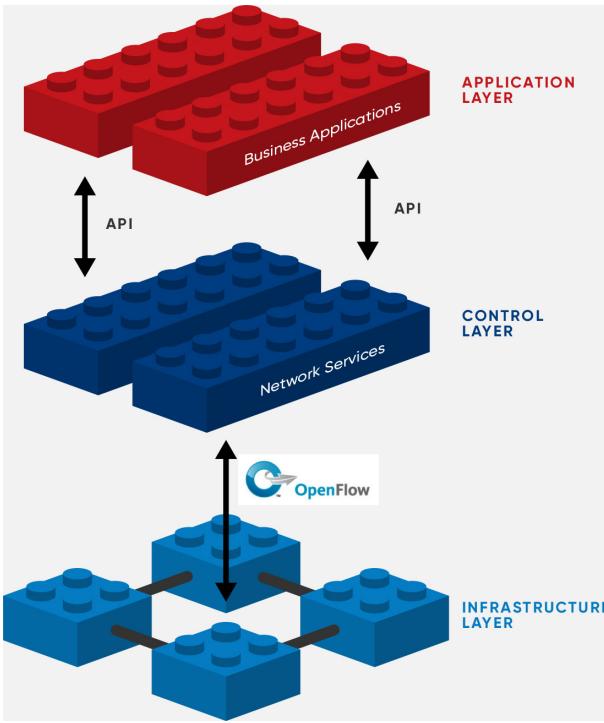


Figura 3. Arquitectura SDN. Fuente: *Open Networking Foundation*

centralizado. Este controlador basado en software puede entonces gestionar la red. El controlador provee instrucciones primitivas a los dispositivos simplificados cuando sea apropiado con el fin de permitirles hacer decisiones más rápidas acerca de cómo manejan los paquetes entrantes.

3.2.3. Automatización y virtualización de redes

El controlador basado en software en SDN provee una interfaz abierta en el mismo para permitir el control automático de la red. En el contexto de redes que siguen protocolos abiertos y estándar de SDN los términos *northbound* y *southbound* se usan frecuentemente para distinguir si la interfaz es para las aplicaciones o para los dispositivos. Estos términos se derivan del hecho que en la mayoría de los diagramas las aplicaciones se muestra arriba (al norte) del controlador mientras que los dispositivos se muestra en la parte de abajo (al sur) del controlador. El controlador ofrece una *northbound* API que permite que se pueda proporcionar algoritmos y protocolos que pueden hacer que la red trabaje eficientemente. La *northbound* API del controlador pretende brindar una abstracción de los dispositivos de red y la topología, de esta forma, las aplicaciones pueden ser desarrolladas para que trabajen sobre una amplia variedad equipos/fabricantes los cuales pueden diferir substancialmente en los detalles de su implementación.

Uno de los resultados de este nivel de abstracción es proveer la habilidad de virtualizar la red, desacoplar el servicio de la red de la red física subyacente. Esos servicios están aún presentes en los dispositivos *host* de tal forma que esos *hosts* no están conscientes que los recursos de la red que están usando son virtuales o no los físicos para los cuales fueron diseñados originalmente.

3.2.4. Apertura

Una característica de las redes SDN basadas en OPENFLOW es que las interfaces deberían de permanecer estándar, bien documentadas y no ser propietarias. Las APIs que son definidas deberían dar al software el suficiente control de varios planos de control. La premisa es que al mantener las interfaces *northbound* y *southbound* abiertas en el controlador SDN se permitirá la investigación de nuevos e innovadores métodos para operar una red.

3.3. Operativa de SDN

A nivel conceptual, el comportamiento y operación de una red SDN es sencillo. En la figura 4 se proporciona una representación gráfica de la operación de los componentes básicos de SDN: los dispositivos SDN, el controlador y las aplicaciones. La forma más fácil de entender la operación es mirándola de abajo hacia arriba, iniciando por los dispositivos. Los dispositivos SDN contienen funcionalidad de reenvío (*forwarding*) para decidir qué hacer con cada paquete entrante. Los dispositivos también contienen los datos para tomar esas decisiones de reenvío. Los datos como tal son representados por los flujos definidos por el controlador, como se muestra en la parte superior izquierda de cada dispositivo.

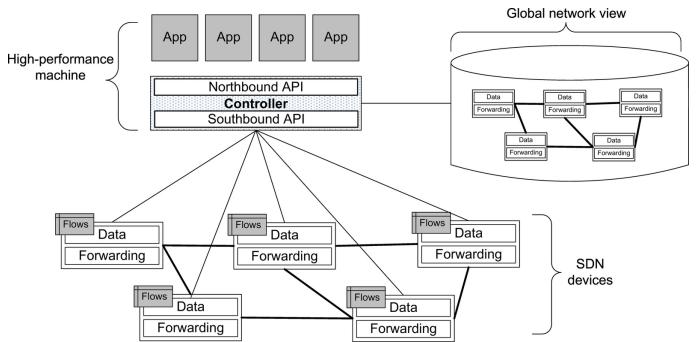


Figura 4. Visión general de la operativa SDN. Fuente: *Open Networking Foundation*

Un flujo describe un conjunto de paquetes transferidos desde un punto final de la red (*network endpoint*) hacia otro punto final de la red (o conjunto de puntos). Un conjunto de reglas describe las acciones que el dispositivo debería tomar para todos los paquetes que le pertenecen a ese flujo. Un flujo (*flow*) es unidireccional en los paquetes que fluyen entre los mismos dos *endpoints*, en la dirección opuesta podrían constituir cada uno un flujo separado. Los flujos se representan en un dispositivo como una entrada de flujo (*flow entry*).

Una tabla de flujos reside en el dispositivo de red y consiste de una serie de entradas de flujo y las acciones a realizar cuando un paquete entrante coincide con un flujo. Cuando el dispositivo SDN recibe un paquete, consulta su tabla de flujos en busca de una coincidencia. Estas tablas de flujos se han construido previamente cuando el controlador descargó las reglas de flujo apropiadas al dispositivo. Si el dispositivo SDN encuentra una coincidencia entonces realiza la acción configurada apropiada que usualmente implica reenviar un paquete. Si no encuentra una coincidencia, el dispositivo puede soltar (*drop*) el paquete o pasarlo al

controlador, dependiendo de la versión el protocolo y la configuración que tenga. La definición de un flujo es una expresión de programación relativamente simple de lo que puede ser un cálculo de plano de control muy complejo realizado previamente por el controlador.

El controlador SDN es responsable de abstraer la red de los dispositivos SDN que controla y presentar una abstracción de estos recursos de red a las aplicaciones SDN ejecutándose por encima de él. El controlador le permite a las aplicaciones SDN a definir flujos en los dispositivos y ayudar a la aplicación a responder a paquetes que fueron reenviados al controlador por los dispositivos SDN. En la figura 4 se puede ver en la parte derecha del controlador que se mantiene una vista de la totalidad de la red que controla. Esto permite calcular soluciones de reenvío óptimas de una forma determinística y predecible. Debido a que un controlador puede control un gran número de dispositivos, estos cálculos son normalmente realizados en un equipo de alto rendimiento el cual posee mejor CPU y memoria que los que vienen típicamente en los dispositivos de red.

Las aplicaciones SDN están construidas por encima del controlador. Estas aplicaciones no deberían de confundirse con la capa de aplicación definida en el modelo OSI de siete capas para redes de computadoras. Las aplicaciones SDN se interconectan con el controlador usando un conjunto de flujos proactivos (*proactive flows*) en los dispositivos y para recibir paquetes que han sido enviados al controlador. Los flujos proactivos los establece la aplicación: típicamente la aplicación va a configurar estos flujos cuando la aplicación inicia. Los flujos van a persistir hasta que algún cambio en la configuración se haga. Esta clase de flujo se conoce como flujo estático. Otro tipo de flujo proactivo es cuando el controlador decide modificar un flujo basado en la carga del tráfico que se está dando actualmente a través del dispositivo de red.

Además de los flujos definidos proactivamente por la aplicación, algunos flujos son definidos para responder a un paquete enviado al controlador. Al recibir los paquetes entrantes que han sido reenviados al controlador, la aplicación SDN dará instrucciones al controlador para darle a conocer cómo responder al paquete y, si es apropiado, establecerá nuevos flujos en el dispositivo con el fin de permitir que el dispositivo responda localmente la próxima vez que vea un paquete que le pertenezca a ese flujo. Tales flujos se llaman flujos reactivos. De esta forma, ahora es posible escribir aplicaciones de software que implementan envío, ruteo, superposición (*overlay*), *multipath*, funciones de control de acceso, entre otros.

3.3.1. Dispositivos SDN

Un dispositivo SDN está compuesto por un API para comunicación con el controlador, una capa de abstracción y una función de procesamiento de paquetes. En el caso de un *switch* físico, la función de procesamiento de paquetes está contenida en el hardware para procesamiento lógico de paquetes.

La capa de abstracción incorpora una o más tablas de flujos. La lógica de procesamiento de paquetes consiste de mecanismos para tomar acciones basado en los resultados de la evaluación de los paquetes entrantes y de buscar

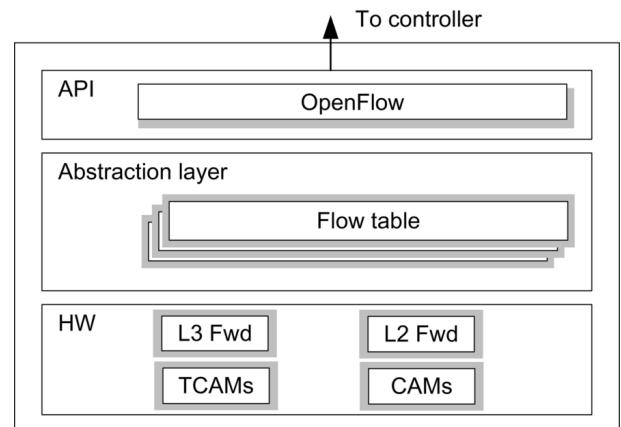


Figura 5. Anatomía del hardware un *switch* SDN. Fuente: *Open Networking Foundation*

la coincidencia de prioridad más alta. Cuando una coincidencia se encuentra, los paquetes entrantes son procesados localmente, a menos que explícitamente se use una regla para enviar al controlador. Cuando no se encuentra una coincidencia, el paquete puede ser copiado al controlador para procesamiento posterior. En el caso de un *switch* de hardware, estos mecanismos son implementados por hardware especializado. En el caso de un *switch* de software, estas mismas funciones son hechas por software.

3.3.1.1. Tablas de flujos: son estructuras de datos fundamentales en un dispositivo SDN. Estas tablas de flujos permiten al dispositivo evaluar paquetes entrantes y llevar a cabo una acción apropiada basada en los contenidos del paquete que se acaba de recibir. Los paquetes han sido tradicionalmente recibidos por dispositivos de red y evaluados en función de ciertos campos. Dependiendo de la evaluación, se realiza una acción. Las acciones que se pueden tomar fueron anteriormente comentadas en la sección 3.3. Un dispositivo SDN no es fundamentalmente diferente, excepto que esta operación básica se ha vuelto más genérica y más programable a través de las tablas de flujo y su lógica asociada.

Las tablas de flujos consisten de un número de entradas de flujos con prioridades asociados, cada una de las cuales consiste típicamente de dos componentes: *match fields* y *match actions*. Los *match fields* son usados para compararlo contra los paquetes entrantes. Un paquete entrada se compara contra un *match field* en orden prioritario y la primera coincidencia completa se selecciona. Las acciones son las instrucciones que el dispositivo de red debería de realizar si un paquete entrante coincide con los *match fields* especificados para una entrada de flujo.

3.3.1.2. Switches SDN en software: La implementación de dispositivos SDN en software es la forma más simple de crear un dispositivo SDN debido que las tablas de flujos, entradas y los *match fields* involucrados son fácilmente mapeado a estructuras de software, tales como arreglos ordenados y tablas de *hash*. Consecuentemente, es más probable que dos dispositivos SDN en software producidos por dos equipos de desarrollo distintos se van a comportar de forma más consistente que en el caso de dos implementaciones en hardware diferentes. Por otro

lado, las implementaciones en software tienden a ser más lentas y menos eficientes que aquellas implementadas en hardware ya que no se benefician de ninguna aceleración de hardware. Dispositivos de red que tengan que trabajar a altas velocidades, como 100Gbs, solamente dispositivos de hardware son factibles con la tecnología actual.

3.3.1.3. Dispositivos SDN de hardware: Las implementaciones de dispositivos SDN en hardware mantienen la promesa de operar mucho más rápido que su contraparte de software y, por lo tanto, son más apropiados para entornos sensibles al rendimiento tal y como centros de datos y núcleos de red (*network cores*)

3.3.1.4. Implementaciones de dispositivos SDN existentes: Hay una serie de dispositivos SDN disponibles hoy en día tanto comerciales como de código abierto. Los dispositivos SDN en software son predominantemente de código abierto. Actualmente, dos alternativas principales están disponibles: *Open vSwitch*¹ y *Indigo*². Fabricantes como Cisco, HP, NEC, IBM, Juniper y Extreme han añadido soporte a OPENFLOW en algunos de sus *switches*. Generalmente, estos *switches* pueden operar en modo *legacy* también como en modo OPENFLOW.

3.3.2. Controlador SDN

Se ha mencionado que el controlador mantiene una vista del total de la red, implementando políticas de decisión, controlando todos los dispositivos SDN que componen la infraestructura de la red y proporcionando una API *northbound* para las aplicaciones. Cuando se dice que el controlador implementa políticas de decisión respecto al ruteo, envío, redirección, balanceo de carga y similares, se refiere tanto al controlador como a las aplicaciones que hacen uso de ese controlador. Los controladores usualmente vienen con su propio conjunto de módulos de aplicaciones comunes tales como un *switch* de aprendizaje, un ruteador, un *firewall* básico y un balanceador de carga simple. Estos son realmente aplicaciones SDN pero por lo general vienen empaquetados con el controlador.

La figura 6 presenta la anatomía de un controlador SDN. La figura muestra los módulos que proporcionan la funcionalidad principal del controlador: los APIs *northbound* y *southbound* y algunas aplicaciones de ejemplo que podría usar el controlador. Como se mencionó anteriormente, el API *southbound* se usa para interconexión con los dispositivos SDN. Este API es OPENFLOW en el caso de una red que utilicen estándares abiertos SDN. Cabe mencionar que en algunos productos OPENFLOW y otras alternativas coexisten en el mismo controlador. El trabajo previo en el API *southbound* ha dado como resultado mayor madurez con respecto a su definición y estandarización. OPENFLOW es un buen ejemplo de esto.

Actualmente, el *Open Source SDN*³ está proponiendo un estándar para la contraparte *northbound* del controlador tal y como OPENFLOW lo es para el *southbound*. Mientras que la falta de un estándar para la interfaz controlador-aplicación es considerada como una deficiencia en SDN, organizaciones como el *Open Source SDN* están desarrollando

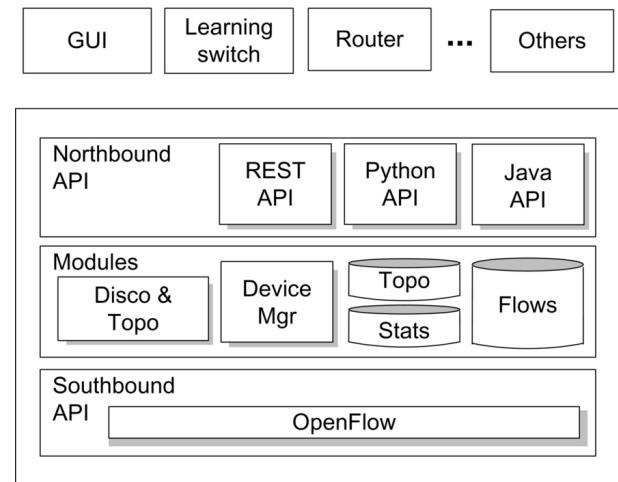


Figura 6. Anatomía de un controlador SDN. Fuente: *Open Networking Foundation*

propuestas para estandarizar esto. Debido a la ausencia de un estándar, varios otros han sido implementados de forma dispar.

3.3.2.1. Módulos principales de controlador SDN: Las principales características en el controlador involucran:

- Descubrimiento de dispositivos de usuario final: descubrimiento de dispositivos de usuario final tal y como computadoras personales, impresoras, dispositivos móviles, etc.
- Descubrimiento de dispositivos de red: descubrimiento de dispositivos de red que comprenden la infraestructura de la red tal y como *switches*, enruteadores y puntos de acceso inalámbricos.
- Gestión de la topología de los dispositivos de red: mantener informado acerca de los detalles de interconexión de los dispositivos de red entre sí y sobre los dispositivos de usuario final a los que están directamente conectados.
- Gestión de flujos: mantener una base de datos de los flujos mantenidos por el controlador y realizar toda la coordinación necesaria con los dispositivos para asegurar la sincronización de las entradas de los flujos de los dispositivos con la base de datos.

Las funciones principales del controlador son descubrimiento y rastreo de dispositivos y topología, gestión de flujos, gestión de dispositivos y estadísticas de rastreo. Todas estas funciones son implementadas por un conjunto de módulos internos del controlador. Como se muestra en la figura 6 estos módulos mantienen bases de datos locales que contienen la topología actual y estadísticas. El controlador rastrea la topología al aprender de la existencia de *switches* (dispositivos SDN) y dispositivos de usuario final y rastrea la conectividad entre ellos. Mantiene un caché de flujos que refleja las tablas de flujos en los diferentes *switches* que controla. El controlador mantiene localmente estadísticas por flujo que son obtenidas de sus *switches*. El controlador puede ser diseñado de tal forma que sus funciones sean implementadas a través de módulos de tal forma que el conjunto de características del controlador pueda adaptarse a los requerimientos individuales de una red.

1. de Nicira, hoy VMWare

2. de Big Switch

3. <http://www.opensourcesdn.org>

3.3.2.2. interfaces de un controlador SDN: Para las aplicaciones SDN, una función clave proporcionada por el controlador SDN es el API para acceder a la red. En algunos casos, esta API *northbound* es una interfaz de bajo nivel, proporcionando acceso a los dispositivos de red en una forma común y consistente. En otros casos el controlador puede proporcionar interfaces de alto nivel que proveen una abstracción de la red como tal, de esta forma un desarrollador de aplicaciones no necesita estar preocupado de dispositivos individuales sino de la red como un todo.

En la figura 7 se muestra de cerca cómo el controlador se interconecta con las aplicaciones. El controlador informa a la aplicación de los eventos que han ocurrido en la red. Los eventos son comunicados desde el controlador a la aplicación. Los eventos pueden pertenecer a un paquete individual que ha sido recibido por el controlador o ser algún tipo de cambio en la topología de la red tal y como la caída de un enlace. Las aplicaciones usan diferentes métodos para afectar la operación de la red. Tales métodos pueden ser invocados en respuesta a un evento recibido y puede resultar en un paquete recibido que se cae (*dropped*), se modifica y/o se envía, o bien, la agregación, borrado o modificación de un flujo. Las aplicaciones también puede invocar métodos independientemente sin la necesidad del estímulo de un evento del controlador.

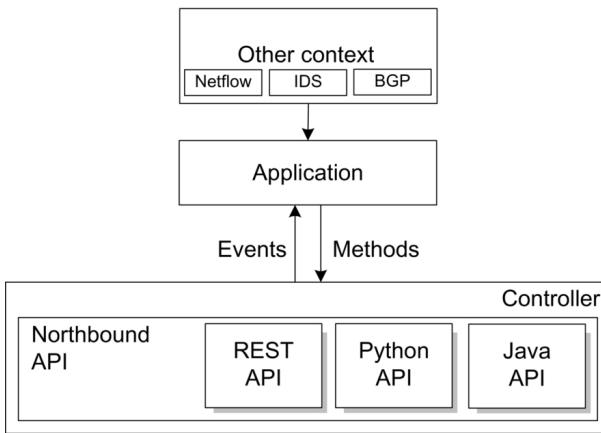


Figura 7. API *northbound* de un controlador SDN. Fuente: Open Networking Foundation

3.3.2.3. Implementaciones de controladores SDN existentes: Existe una serie de implementaciones de controladores SDN disponibles en la actualidad que incluyen soluciones comerciales y de código abierto. Los controladores de código abierto vienen en varias formas, desde controladores hechos en lenguaje C como NOX, a versiones en Java como *Beacon* y *Floodlight*. Las interfaces a estos controladores pueden ser ofrecidas en el lenguaje en el que está escrito el controlador o en otras alternativas como REST o Python. El controlador *OpenDayLight* ha sido construido por un consorcio de fabricantes. Otro importante controlador de código abierto, *Open Network Operating System* está ganando atención en el mercado. Otros fabricante ofrecen sus propias versiones comerciales de controlador SDN. Fabricantes como NEC, IBM y HP ofrecen sus propios controladores que son en principalmente implementaciones de OPENFLOW. La mayoría de fabricantes ofrecen controladores SDN específicos y propietarios que incluyen algún nivel de soporte de OPENFLOW.

3.3.3. Aplicaciones SDN

Las aplicaciones SDN que corren por encima del controlador SDN se interconectan con la red a través de API *northbound* del controlador. Las aplicaciones SDN son responsables en última instancia de administrar las entradas de flujos que son programadas en los dispositivos de red usando el API del controlador de gestión de flujos. A través de este API las aplicaciones están en la capacidad de: (1) configurar los flujos para enrutar los paquetes por al mejor ruta entre dos puntos, (2) balancear la carga de tráfico a través de rutas múltiples o destinarlas a un conjunto de *endpoints*, (3) reaccionar a cambios en la topología de red como fallos en los enlaces y la agregación de nuevos dispositivos y rutas y (4) redireccionar tráfico para propósitos de inspección, autenticación, segregación y otros tareas similares de seguridad.

En la figura 6 se muestra algunas de las aplicaciones comunes como la interfaz gráfica para gestionar el controlador, un *switch* de aprendizaje y una aplicación de ruteo. Cabe mencionar que incluso la funcionalidad básica de un *switch* de aprendizaje de dos capas no se obtiene simplemente emparejando un dispositivo SDN con un controlador SDN. Lógica adicional es necesaria para reaccionar a la nueva dirección MAC vista y actualizar las tablas de envío en los dispositivos SDN que son controlados para que se proporcione conectividad a esta nueva dirección MAC en toda la red. Una de las fortalezas que se percibe de la arquitectura SDN es el hecho que las decisiones de *switching* pueden ser controladas una familia de aplicaciones más enriquecida aún que para gestionar el controlador. De esta forma, se nota que el poder de esta arquitectura es que es altamente expansible. Otras aplicaciones como平衡adores de carga y firewalls son buenos candidatos para esta arquitectura.

3.3.3.1. Responsabilidades de las aplicaciones SDN:

La responsabilidad general de una aplicación SDN es la de realizar cualesquiera función para la cual fue diseñada, puede ser balanceo de carga, bloqueo de accesos no autorizados o cualquier otra operación. Una vez que el controlador ha finalizado la inicialización de los dispositivos y ha reportado la topología de la red a la aplicación, la aplicación invierte la mayoría de su tiempo de procesamiento en eventos. Mientras que la funcionalidad principal de la aplicación va a variar de una aplicación a la otra, el comportamiento de la aplicación es conducido por los eventos que vienen desde el controlador así como entradas externas. Las entradas externas podrían incluir sistemas de monitoreo de la red tales como NetFlow, sistemas de monitoreo de intrusos o BGP⁴. La aplicación afecta a la red al responder a los eventos tal y como se muestra en la figura 7. La aplicación SDN se registra como oyente para ciertos eventos y el controlador invocará un método de aplicación cuando un evento ocurra. Esta invocación vendrá acompañada por los detalles apropiados relacionados con el evento. Algunos ejemplos de eventos manejados por una aplicación SDN son: descubrimiento de dispositivos de usuario final, descubrimiento de dispositivos de red y paquetes entrantes. En los primeros dos casos,

los eventos son enviados a la aplicación SDN al descubrir un nuevo dispositivo de usuario final (por ejemplo, una dirección MAC) o un dispositivo de red (por ejemplo, un *switch*, un enrutador, o un punto de acceso inalámbrico) respectivamente. Los paquetes entrantes son enviados a la aplicación SDN cuando un paquete es recibido desde un dispositivo SDN ya sea debido a una entrada de flujo que instruye al dispositivo SDN para reenviar el paquete al controlador, o porque no hay entrada de flujo coincidente en el dispositivo SDN. Cuando no hay una entrada de flujo que coincida, la acción predeterminada suele ser reenviar el paquete al controlador, aunque también podría ser eliminar el paquete, dependiendo de la naturaleza de las aplicaciones.

Existen muchas formas en las cuales una aplicación SDN puede responder a los eventos que ha recibido de un controlador SDN. Existen respuestas simples, tal y como descargar un conjunto de entradas de flujo predeterminadas a un nuevo dispositivo descubierto. Estos flujos estáticos o predeterminados típicamente son las mismas para cada clase de dispositivo de red descubierto y, por ende, muy poco procesamiento es requerido por la aplicación. También hay respuestas más complejas que pueden requerir información de estado obtenida de alguna otra fuente aparte del controlador.

4. EL PROTOCOLO OPENFLOW

OPENFLOW es el primer protocolo que permite acceder directamente y manipular el redireccionamiento de dispositivos de red físicos o virtuales mediante una interfaz estándar.

Fue originalmente implementado por la Universidad de Stanford con el fin de permitir la creación de protocolos experimentales en las redes dentro del campus que pudieran ser usados para la investigación debido a que los estudiantes tenían que crear sus propios ambientes de redes desde cero.

En 2011 un consorcio sin fines de lucro crea la ONF (*Open Networking Foundation*). Este grupo formado por proveedores de servicios busca estandarizar, comercializar y promover el uso de Open Flow en las redes.

Los componentes del modelo de OpenFlow son:

1. Separación del plano de control y de datos en los dispositivos de red.
2. Usar un protocolo estandarizado entre el controlador y el dispositivo de red para manejar el comportamiento del mismo.
3. A través del controlador se busca proveer programabilidad a la red.

OPENFLOW busca que el controlador que conecta a todos los dispositivos interactúe con un programa de aplicación que ejecute instrucciones para manejar los flujos de la red. Así se busca el controlador sea el que determine el flujo de la red, gestionando la red como un todo y no individualmente según cada dispositivo, logrando que la red pueda ser programada de forma independiente al equipo.

El protocolo especifica primitivas básicas que pueden ser usadas por aplicaciones externas para programar los dispositivos de red. Por ejemplo, un programa que se cree

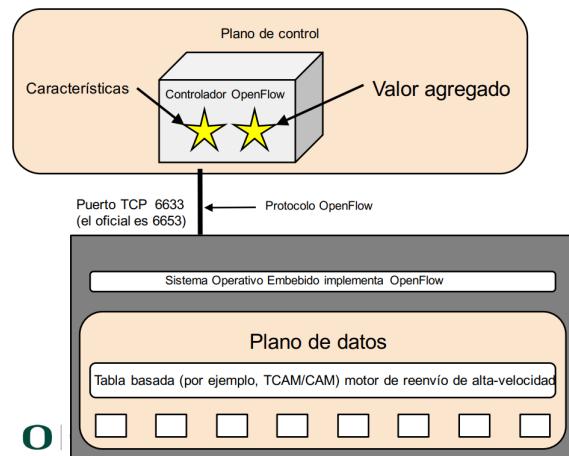


Figura 8. Arquitectura OPENFLOW. Fuente: NSRC, *Introducción a OpenFlow*.

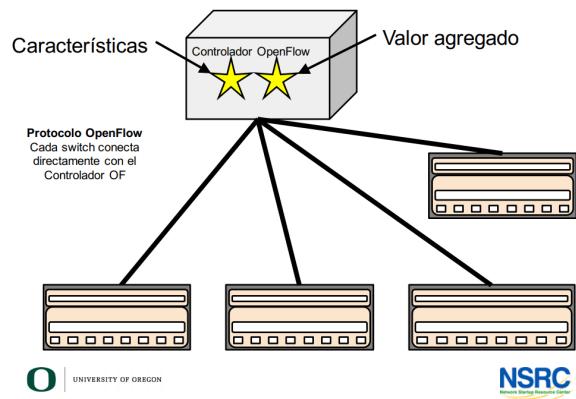


Figura 9. Representación del controlador OPENFLOW enlazado con los dispositivos de red. Fuente: NSRC, *Introducción a OpenFlow*.

para controlar la carga de red puede implementar OpenFlow para crear la comunicación entre los dispositivos de la red y el software, similar a las instrucciones de CPU que interactúan entre el sistema operativo y el hardware.

OPENFLOW permite también definir el tráfico de la red en base a parámetros como patrones de uso, aplicaciones y recursos de la nube. Provee un control granular que permite a la red responder a cambios en tiempo real a nivel de aplicación, usuario y sesión.

4.0.1. Switch OpenFlow

Un switch que soporte OPENFLOW contiene:

1. Tabla de flujos, donde se relaciona una acción con una entrada de la tabla indicando al dispositivo como se debe procesar el flujo de red. Cada tabla en el switch contiene un conjunto de entradas de flujo donde cada entrada consiste en campos de coincidencia, contadores y un conjunto de instrucciones para aplicar a los paquetes.
2. Canal seguro, el mismo conecta al dispositivo con el controlador permitiendo el paso de comandos y paquetes usando el protocolo OpenFlow.

3. Controlador, que administra la tabla de flujos para permitir cambios en el dispositivo. El controlador puede agregar y eliminar entradas de flujos en las tablas.

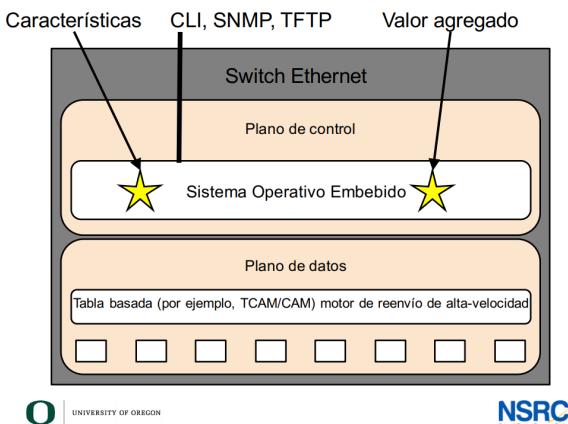


Figura 10. Switch OPENFLOW. Fuente: NSRC, *Introducción a OpenFlow*.

Para inicializar un switch nuevo requiere de configuración mínima (como establecer la dirección IP, el gateway y definir el controlador OPENFLOW), se debe conectar al controlador el cual inicia una serie de peticiones al dispositivo mediante funciones, como por ejemplo determinar la ubicación del dispositivo.

Hay dos formas de poblar una tabla de flujos: de forma proactiva o reactiva. Proactivamente las reglas son estáticas y el controlador coloca las reglas en el switch antes de que estas sean requeridas mientras que de forma reactiva las reglas son dinámicas. De forma reactiva los paquetes son enviados al controlador donde este crea la regla apropiada enviando el paquete de vuelta al switch para definir la regla.

4.0.2. Beneficios

Parte de los beneficios de usar este protocolo está la centralización del control de ambientes de diferentes proveedores de dispositivos físicos/virtuales, reducir la complejidad del mantenimiento de la red mediante la automatización de procesos, innovación al permitir al programador crear aplicaciones según las necesidades del negocio, aumenta la seguridad de la red pues permite una configuración de alto nivel de políticas de seguridad, configuraciones dinámicas aplicables en pocas horas que reducen el "time-to-market" del negocio, control granular de la red al aplicar políticas o configuraciones según diferentes niveles de distribución y carga.

4.1. Otros protocolos e iniciativas

Existen otros protocolos SDN diferentes a OpenFlow, por ejemplo:

1. Border Gateway protocol: Utilizado para el intercambio de información de rutas entre host de gateways en una red. Es considerado un protocolo de gateway exterior donde cada host tiene su propio router, la tabla de enrutamiento tiene una lista de

- routers conocidos, las direcciones visibles y una métrica de costo asociada a cada ruta.
- 2. NETCONF: Este protocolo busca proporcionar una red segura basado en el procedimiento remoto RPC.
- 3. XMPP: El protocolo de presencia y mensajería extensible se basa en el Extensible Markup Language para el uso de mensajería instantánea funcionando entre los servidores, brindando una operación en tiempo real. Es utilizado en redes SDN híbridas, siendo utilizado por el controlador para distribuir información de plano de control como de gestión del plano a los puntos finales del servidor.
- 4. OVSDB: Es un protocolo de configuración de OpenFlow destinado a administrar las implementaciones de Open vSwitch el cual es un conmutador virtual que permite la automatización de la red y el soporte de interfaces como NetFlow.
- 5. MPLS-TP: Es un tipo de técnica para el manejo de datos para redes de alto rendimiento. Direcciona datos de un nodo de red al mas proximo basado en etiquetas de recorrido lo cual elimina la complejidad de buscar en tablas de ruteo. Las etiquetas identifican links virtuales entre nodos distantes. El protocolo puede encapsular paquetes de diferentes protocolos de red.

5. CONCLUSION

SDN propone una arquitectura que permite trabajar las redes de forma ágil, programable y centralizada donde el manejo de la red puede ser configurado mediante programación. Al ser un ambiente programado los administradores de red tienen la libertad para asegurar, optimizar y automatizar los recursos de la red creando programas escritos por ellos mismos pues SDN está basado en estándares abiertos y neutrales donde no se depende de un software propietario. La arquitectura busca simplificar la operación y el diseño de la red, dejando atrás la forma tradicional de trabajo de redes.

REFERENCIAS

- [1] D. Bombal. *Software Defined Networking(SDN)*. Infinite Skills. ISBN: 9781491976593. Febrero, 2017.
- [2] Open Networking Foundation. <https://www.opennetworking.org/sdn-definition/>
- [3] Open Networking Foundation. *Software-Defined Networking: The new Norm for Networks*. White Paper. Abril, 2012.
- [4] N. Feamster, J. Rexford, and E. Zegura. 2013. *The Road to SDN*. Queue 11, 12. December 2013.
- [5] P. Goransson and C. Black. *Software Defined Networks: A Comprehensive Approach*. Elsevier Science. 2016.
- [6] T. Slattery. *An Introduction to Software Defined Networking (SDN) LiveLessons—Networking Talks*. Pearson IT Certification. ISBN: 0133987337. Junio, 2014.
- [7] Network Startup Resource Center. *Introducción a OpenFlow*. Disponible en <https://nsrc.org/workshops/2015/walc/routing/raw-attachment/wiki/Agenda/15-Introducción%2B3n-SDN-Openflow.pdf>
- [8] M. McNickle. *Cinco protocolos SDN que no son OpenFlow*. TechTarget.



Priscilla Piedra es Ingeniera de Computación del Tecnológico de Costa Rica. Actualmente es estudiante del programa de Maestría en Ciencias de la Computación en la misma universidad. Sus principales intereses son: *cloud computing* y automatización.



Martín Flores es Ingeniero en Informática de la Universidad Nacional. Actualmente, realiza sus estudios de Maestría en Ciencias de la Computación del Tecnológico de Costa Rica. Sus principales intereses son: lenguajes de programación, ingeniería de software y *DevOps*.