

ESTADO DEL ARTE EN REDES DEFINIDAS POR SOFTWARE (SDM)

STATE OF THE ART IN SOFTWARE-DEFINED NETWORKING (SDM)

Miguel Barrera Pérez^{1*} Neider Serrato Losada^{2**} Elisa Rojas^{3***} Giovani Mancilla Gaona^{4****}

Resumen:

El crecimiento de las redes a nivel global es inevitable debido al aumento de usuarios, dispositivos y aplicaciones derivados de conceptos como pueden ser el Internet de las cosas (IoT, de inglés *Internet-of-Things*), el procesamiento y análisis de grandes cantidades de información (*Big Data*), o la transmisión de audio y video en vivo (*Streaming*), lo cual ha demandado de los sistemas mayores recursos de almacenamiento, ancho de banda y alta flexibilidad, entre otras características. Por lo anterior, han emergido paradigmas para la gestión centralizada de todos los componentes de una red mediante plataformas tecnológicas totalmente administrables, centralizadas y dinámicas; entre estas se encuentran SD-WAN (*Software Defined-Wide Área Network*) o SDR (*Software-Defined Radio*), ambas surgidas gracias al concepto de las Redes Definidas por Software o SDN (del inglés *Software-Defined Networking*). El presente documento, en consecuencia, establece un estado de arte a partir de una investigación

^{1*} Ing. (c) en Telecomunicaciones, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. correo: Mabarrerap@correo.udistrital.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1772-290X>

^{2**} Ing. (c) en Telecomunicaciones, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. correo: nyserratol@correo.udistrital.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2157-7365>

^{3***}PhD. En Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. Universidad de Alcalá (UAH), España. Correo: elisa.rojas@uah.es. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6385-2628>

^{4****} MSc. En Administración, Universidad de los Andes, Colombia. Esp. Sistemas gerenciales de Ingeniería, Universidad Pontificia Javeriana, Colombia. Docente e investigador grupo GIDENUTAS, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Correo: Gmancillag@udistrital.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2552-1836>

documental de tipo categorial para utilizarse como un marco de referencia de investigaciones en el área de *SDN* por el grupo de Investigación de Nuevas Tecnologías de Aplicación Social GIDENUTAS adscrito a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Esta se limita cronológicamente a una revisión, desde el año 2007 hasta hoy, enfocada en los países que han promovido el desarrollo e implementación de este nuevo paradigma, recurriendo a bases de datos como IEEE Xplore, Google Scholar, así como documentos de organizaciones de estandarización como la ONF y la ITU.

Palabras claves: Software-Defined Networking (SDN), IoT, Network Function Virtualization (NFV), ONF, OpenFlow

Abstract: The growth of networks at a global level is inevitable due to the increase of users, devices and applications, such as: Internet of Things (IoT), processing and analysis of large amounts of information (Big Data), or streaming audio and video, which has demanded from the systems, greater storage resources and bandwidth. To this purpose, diverse paradigms have emerged for the centralized management of all the components of a network through fully administrable, centralized and dynamic technological platforms; among these is *SDN* (Software-Defined Networks). This document, consequently, establishes the state-of-art from a documentary research of a categorial type to be used as a frame of reference for research in the area of *SDN* by the Research Group of New Technologies of Social Application GIDENUTAS ascribed to the University Francisco Jose de Caldas. This is chronologically limited to a review, from 2007 until today, focused on the countries that have promoted the development and implementation of this new paradigm,



using databases such as IEEE Xplore, Google Scholar, as well as documents from standardization organizations such as ONF and ITU.

Keywords: SDN, Controller, IoT, NFV, ONF, OpenFlow

1. Introducción

Desde el nacimiento de la internet en 1969, a partir del proyecto militar ARPANET, históricamente el crecimiento de esta red ha sido sostenido y continuo, de manera que contaba con cerca de 4 mil millones de conexiones al 2017 [1]. No es un secreto que, para los profesionales que administran la infraestructura de la misma en las diferentes empresas y organizaciones, es un reto mantener un óptimo funcionamiento en toda su infraestructura cuando esta va creciendo y se enfrenta con inconvenientes como el aumento de dispositivos, interoperabilidad, entre otros. De otro lado, también ha surgido la necesidad de mantener segura la infraestructura donde se almacena información clave y estratégica para las empresas y organizaciones, particularmente en modelos de negocio con sofisticadas bases de datos de clientes y proveedores. En este sentido, se ha dado la creación de paradigmas como la *Computación en la Nube*, que han permitido resguardar y almacenar esta información de manera remota contando con una alta disponibilidad, confidencialidad y autenticidad de la misma, y aprovechando al máximo los recursos de la infraestructura.

No obstante, frente a lo expuesto, en los últimos años han surgido alternativas como el proyecto *Ethane*, desarrollado en la Universidad de Stanford en el año 2006 - dirigido por Nick McKeown - el cual consistió en un controlador con 12 switches que gestionaban el tráfico de 300 hosts, proyecto en el que uno de los desarrolladores

de protocolo OpenFlow⁵ (y por tanto de las *SDN*), Martin Casado, participó siendo estudiante de Doctorado [2]. Posteriormente, Casado junto a McKeown y Scott Schenker crearon en 2007 [3] la compañía pionera en *SDN*: *Nicira Inc.* para dar solución a los retos mencionados previamente ilustrados en las investigaciones de virtualización de redes realizadas por Casado, [4].

Para el año 2008 se publica oficialmente la primera versión de *OpenFlow* como protocolo “de pruebas”, siguiendo la filosofía de virtualización de funciones (NFV) [5]. En 2011, *Nicira* lanzó al mercado una plataforma de virtualización de redes (NPV), un controlador de red que trabaja conjuntamente con herramientas de virtualización para computación en la nube, almacenamiento y gestión de imágenes. Para el año 2012 *Nicira Inc.* fue comprada por *VMware* en USD 1.260 millones [6], para implementar las soluciones de virtualización de redes en entornos corporativos mejorando su portafolio de servicios, [7]. Desde esta época a hoy, resulta interesante que la revisión bibliográfica del tema evidencie que tan solo 8 fuentes de las 64 referenciadas son de origen de los países de habla hispana, y de estas apenas 2 son colombianas, por lo que se justifica la presente investigación documental para demarcar una línea de base para investigaciones futuras en el área de *SDN*.

El documento se estructura de la siguiente manera: Inicialmente se establece la metodología de la investigación documental; posteriormente se mencionan los resultados de esta, donde se describen temas como, componentes de la arquitectura *SDN*, sus principales aplicaciones y controladores; luego se generaliza sobre la virtualización de redes, y las Organizaciones de Estandarización *SDN*; y finalmente se establecen las conclusiones.

2. Metodología

Para establecer las categorías y subcategorías que se desarrollan en la presente revisión se acude al método por índices [8]. Este método consiste en desarrollar, en

⁵ OpenFlow: Protocolo de red estándar abierto utilizado para gestionar el tráfico entre conmutadores



primer lugar, un índice global o general de SDN, e irlo afinando hasta que sea lo suficientemente específico en las diferentes categorías o subcategorías de estudio. En el anterior sentido metodológico se encuentra que en la última década se ha incrementado el desarrollo de investigaciones sobre SDN en las que han sobresalido categorías de estudio como: *Arquitectura, Controladores, NFV, Aplicaciones, y Normatividad*.

Desde la perspectiva expuesta, para Arquitectura de SDN se han consolidado subcategorías objeto de estudio como: *plano de control, plano de datos, y plano de aplicación*. En Controladores, subcategorías sobre *dispositivos de fuente abierta* – como ONOS y ODL –, y de *origen propietario* – como VMware NSX y Huawei Agile –. En cuanto a NFV, destacan como subcategorías los *componentes asociados*, así como la *relación de NFV con SDN*. En cuanto a las aplicaciones relacionadas con SDN, se han enfocado las subcategorías en desarrollos como: *IoT, Datacenter, 5G, y Big data*. Y en cuanto a Normatividad, se han establecido subcategorías reglamentarias sectoriales como: *ONF, IRTF e ITU*.

En consecuencia, se estructura un artículo de revisión basado en la búsqueda de fuentes de las bases de datos IEEE Xplore, Google Scholar, así como documentación de la ONF y la ITU; con búsqueda de palabras clave como *Arquitectura SDN, Controladores SDN, NFV para SDN, Aplicaciones SDN, y Normatividad para SDN*.

Para el análisis de los documentos de esta investigación, de carácter exploratorio y documental, se asumieron fuentes en cada una de las categorías y subcategorías, circunscribiéndose al continente Europeo y a Norteamérica, y limitada temporalmente a la última década, pues es en el espacio y tiempo donde se han desarrollado las mayores investigaciones y aplicaciones basadas en SDN. Como consecuencia se proporcionará un contexto para este paradigma de redes, enfocado a las tendencias tecnológicas actuales y su perspectiva. La categorización se observa en las figuras 1 y 2.

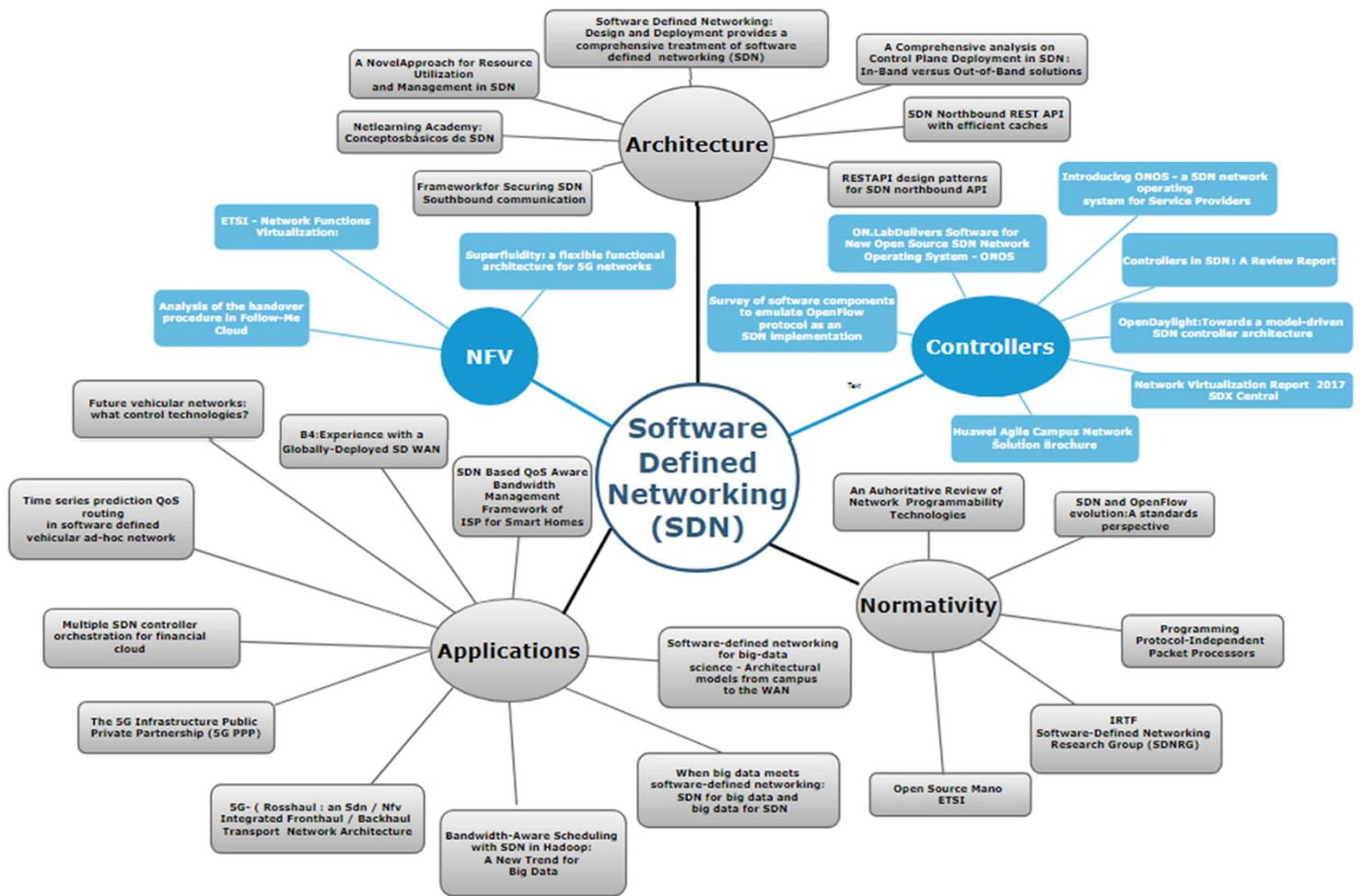


Figura 1. Modelo de investigación para el estado de arte desarrollado. Fuente: elaboración propia

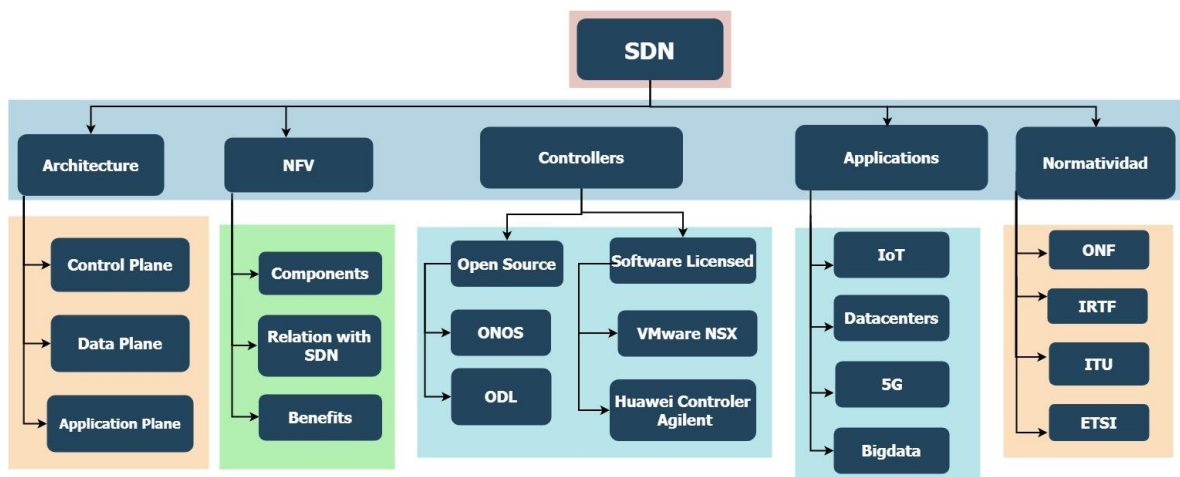


Figura 2. Subcategorización del modelo de investigación para el estado de arte desarrollado. Fuente: elaboración propia.



3. Arquitectura SDN

El concepto de las redes definidas por software (*SDN*) se fundamenta en un modelo compuesto por tres capas: plano de aplicación, plano de control y plano de datos, que reinventan y automatizan de manera óptima la infraestructura de las redes. Su arquitectura tiene por objeto desagregar los planos de control y datos en dispositivos de redes como switches y routers, [9]. El plano de control es el encargado de tomar decisiones respecto al tráfico que interactúa con cualquier dispositivo de la red, mientras que el plano de datos es el que ejecuta las tareas de transporte de paquetes de datos.

En la figura 3 se puede observar que la arquitectura de las redes definidas por software se compone conceptualmente de tres capas: infraestructura, control y aplicación [10]. También existen API's que comunican estas tres capas: API *Northbound* (sentido Norte) y API *Southbound* (sentido Sur), dependiendo de la dirección de comunicación teniendo como referencia al controlador *SDN*. Dentro del entorno de *SDN* se impulsa el desarrollo de API's de código abierto que le dan más flexibilidad y dinamismo a este novedoso paradigma.

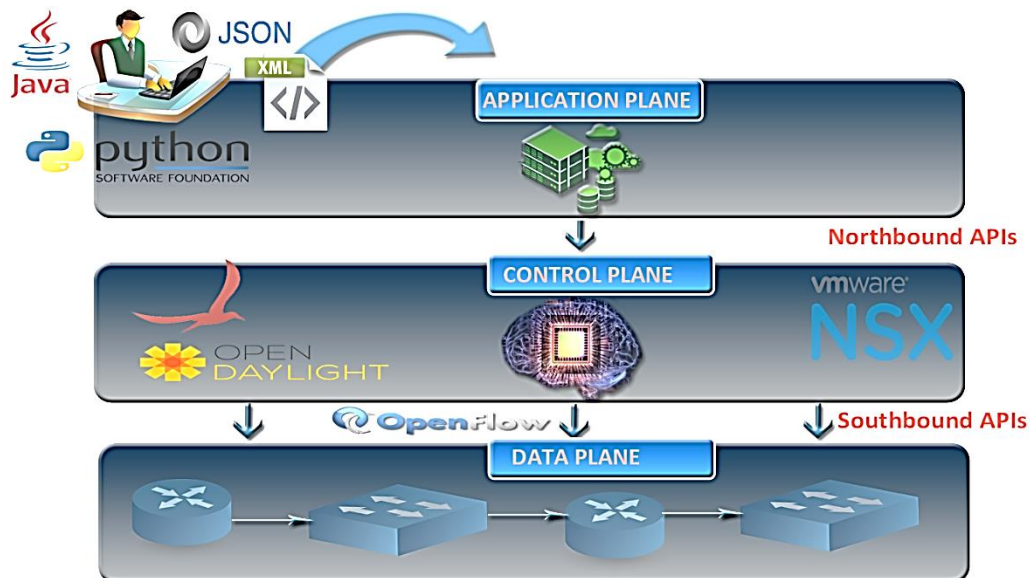


Figura 3. Elementos de la Arquitectura de las redes SDN. Fuente: elaboración propia.

3.1 Capa de Datos

La capa de datos (*Data Plane*) – o también denominada capa de infraestructura – se compone de todos los dispositivos de red, entre estos los switches, routers y access points encargados de transportar toda la información de los usuarios que circula por una red [11]. Estos dispositivos ya no poseen una funcionalidad predefinida y fija, sino que se caracterizan por un set de instrucciones dadas por el plano de control. Así pues, un mismo hardware podría funcionar como un router o como un firewall, según lo que haya definido el gestor de la red.

3.2 Capa de Control

La capa de control (*Control Plane*) es la encargada de centralizar el control de todo el flujo de información que circula por el *Data Plane*. Esta contiene las políticas de reenvío o desvío de datos, tablas de flujo, y posee una perspectiva general de toda la red hospedadas en un Controlador SDN [4]. Como pudo notarse en la figura 3, existen API's (Application Programmable Interface) *Southbound*, como el protocolo *OpenFlow*, que permiten a un controlador como Opendaylight ó NSX enviar el conjunto de políticas y configuraciones a todos los dispositivos que conforman el plano de datos. Estas API's son de crucial importancia para realizar de manera taxativa la separación de las funciones de los planos de datos y control [12], [13]. También existen APIs *Northbound* como API Restful [14] o SDMN API [15], que definen un lugar central en la infraestructura para mediar entre las políticas de aplicaciones globales y las políticas de red, permitiendo comunicar la capa de aplicación con la capa de control [16].

3.3 Capa de Aplicación

El último plano o capa, pero no menos importante, es el de aplicación (*Application Plane*). Es donde se realiza el desarrollo de diversas aplicaciones que permiten una comunicación e interacción con toda la arquitectura de manera rápida, junto con la apoyo de las API's Northbound que logran la comunicación de esta capa hacia las capas subyacentes. Esta parte de la arquitectura tiene la capacidad de obtener una perspectiva más abstracta de la red, sabiendo desde la cantidad y distribución de



los dispositivos conectados hasta la recolección de estadísticas de comportamiento de la red, y es donde se toman las decisiones sobre su administración. Por lo anterior, es necesario que el desarrollo de estas aplicaciones de alto nivel sean creadas e implementadas por comunidades que impulsen el desarrollo a través de plataformas de código abierto, aportando a la estandarización [3], y agregando características como codificación segura y portabilidad. En tal sentido, el desarrollo de aplicaciones con arquitectura *REST*⁶ ha ganado terreno en *SDN* aportando beneficios con aplicaciones orientadas a servicios sin importar el lenguaje de programación y ejecutables en diversas plataformas. Esta arquitectura de aplicaciones está soportada por nuevos lenguajes como: Javascript, JSON⁷ y Python [17],[18], que han permitido que la gestión y administración de las redes se pueda llevar a plataformas móviles.

4. Virtualización de Funciones de Red (NFV)

La Virtualización de Funciones de Red, del inglés *Network Functions Virtualization* (NFV), es un paradigma que complementa al concepto de las redes definidas por software (*SDN*). Como su nombre indica, NFV tiene como objetivo la virtualización de las funciones de red (ya sea un encaminador, servicio web o balanceador de carga), de manera que éstas no dependan del hardware en el que se despliegan, lo cual es habitual en redes tradicionales. *SDN* puede utilizarse a bajo nivel para conectar infraestructura virtualizada, o a alto nivel para ayudar a componer funciones virtualizadas de red en NFV, por ejemplo.

La figura 4 muestra la arquitectura de NFV tal y como la define ETSI, ente encargada de su estandarización, así como los documentos asociados. A grandes rasgos se distinguen tres niveles: infraestructura (NFVI), gestor de funciones de red (VNFM) y orquestador (NFVO).

⁶ Representational State Transfer: es un estilo de arquitectura software para sistemas hipermedia distribuidos como la World Wide Web

⁷JSON: formato basado en texto estándar para representar datos estructurados

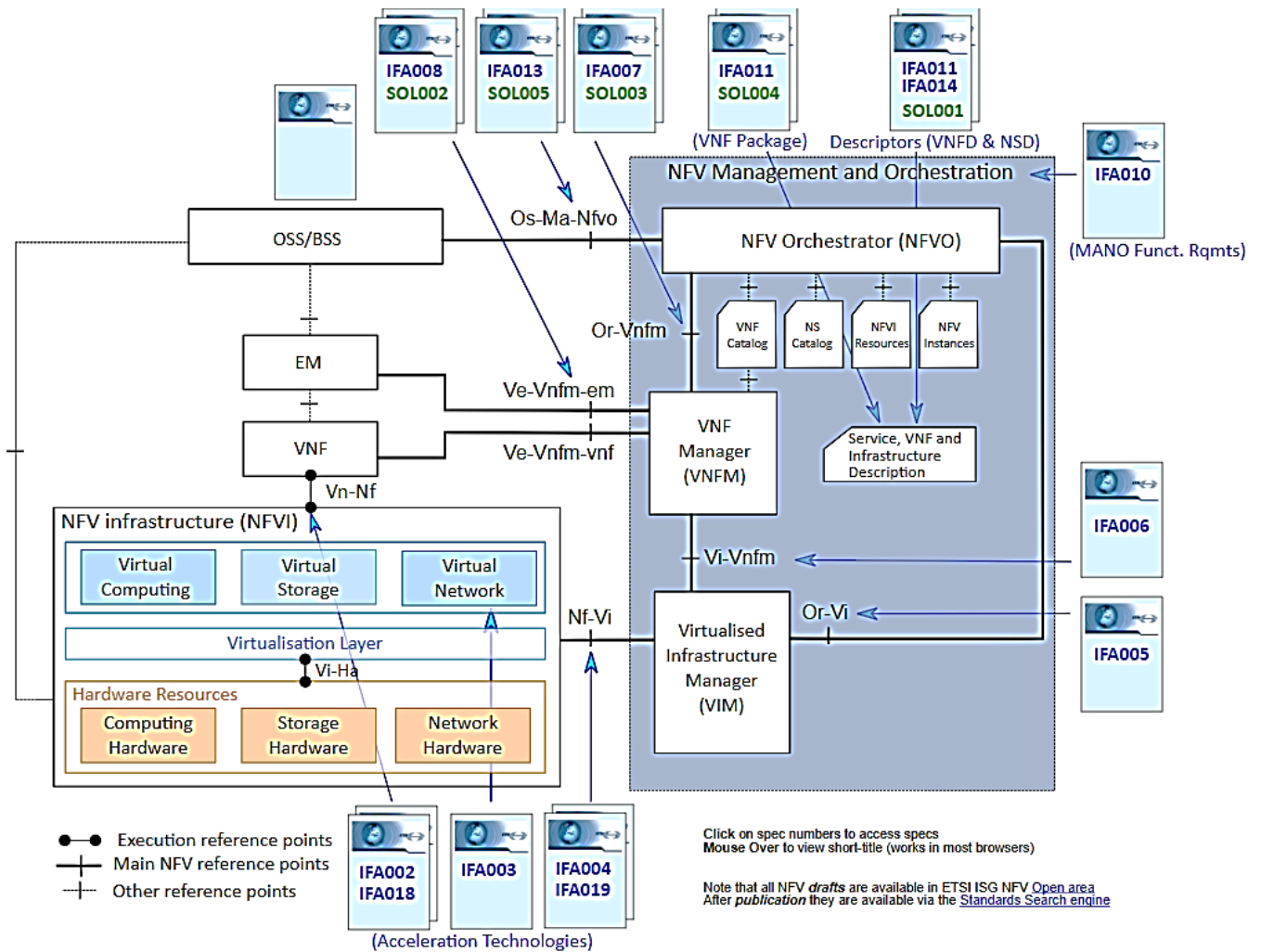


Figura 4. Arquitectura de NFV según ETSI, [19].

La diferencia entre NFV y SDN, es que SDN por definición separa el plano de control y de datos, generando la oportunidad de implementar nuevas abstracciones e interfaces que faciliten el control de la red, mientras que NFV se centra en reemplazar los dispositivos de red hardware por software ejecutado en hosts o servidores de propósito general (del inglés *Commercial off-the-shelf*, COTS), de manera que estos después pueden ser alojados en centros de datos, como ejemplo. Una de las principales ventajas de NFV es la reducción del precio y disponibilidad de los servidores, puesto que ya no existe la dependencia de un fabricante o proveedor de servicios concretos, sino que en cualquier servidor podría



potencialmente desplegarse cualquier servicio. Esto a su vez genera una segunda ventaja y es que ahora la funcionalidad de red puede ser alojada en cualquier lugar en base a su efectividad o bajo coste. Las redes 5G apoyan su evolución en NFV debido a esta ventaja: un servicio de red en 5G puede ser alojado en el core o en el edge, incluso en diferentes partes del edge dependiendo de la localización del usuario, adaptándose fácilmente. Como ejemplo, el proyecto Superfluidity [20] se apoya en esta ventaja. Un caso de uso serían los trenes de alta velocidad, donde habitualmente se pierde la cobertura debido a los cambios de estación de radio, pero gracias a la combinación de *SDN* y NFV, el servicio podría resituarse fácilmente siguiendo al usuario y de manera transparente a éste, [21].

Finalmente, otra de las características de NFV es que las funciones se pueden combinar entre ellas, desplegar y actualizar automáticamente, como un simple software más. Esto facilita la evolución y el diagnóstico de la red.

5. Controladores *SDN*

Se denomina controlador *SDN* a la implementación de la parte central de la arquitectura de las redes definidas por software; es decir, se trata del plano de control en el que se pueden instanciar diferentes aplicaciones del plano de aplicación. El controlador *SDN* se encarga de centralizar todas las políticas y directrices que se ejecutan desde las API's Northbound [22]. Su principal misión es el control inteligente de los recursos administrados para entregar una mejor calidad de los servicios ofertados en un entorno donde la demanda de recursos es variable, logrando una optimización de las redes en tiempo real [23]. A continuación, se presentan los controladores *SDN* más destacados en el mercado actual y una descripción de sus principales características.

5.1 ONOS (Open Network Operating System)

En 2014 el proyecto *ONOS* se unió como proyecto de colaboración en la Fundación de LINUX [24], su principal objetivo es proporcionar a los proveedores de servicios de red una alta disponibilidad, escalabilidad y rendimiento, para que de esta manera

los usuarios finales obtengan una mayor experiencia de servicio [24]. Utiliza un método de modularidad que permite adaptarse a los diferentes ambientes en los que se pueden desarrollar aplicaciones con *SDN*, a su vez proporciona API's *Northbound* que simplifican los procesos de configuración administración y control. Cuenta con soporte para protocolos como *OpenFlow*, *Netconf*⁸, *T11*⁹, *SNMP*¹⁰, *BGP*¹¹ entre otros. *ONOS* aporta portabilidad y dinamismo con sistemas REST API¹², interfaces de usuario extensibles y *CLI* en la Web. Su principal lenguaje de programación es *JAVA*, [25].

Cabe destacar que la plataforma *ONOS* actualmente está apoyada por la comunidad *ONF*, que a su vez se encarga de generar las recomendaciones y documentos de estandarización del paradigma *SDN*.

5.2 ODL (OpenDaylight)

Este proyecto colaborativo -bajo el liderazgo de la fundación *LINUX*- lanzado en 2013, y creado para incentivar *SDN* y *NFV*, proporciona soluciones de uso comercial que aborda ambientes de redes existentes. El núcleo de su plataforma está compuesta por una capa de abstracción del servicio que esta soportada por el modelo *MD-SAL* [26].

La arquitectura del proyecto *ODL* aplica las especificaciones *Open Service Gate initiative (OSGi)*, que permite la creación de plataformas para que los diferentes servicios que se ofrecen con este controlador tengan compatibilidad [27]. También soporta protocolos *Southbound* como: *BGP*, *OpenFlow* y *OVSDB*.

⁸ Es un protocolo de administración de red desarrollado y estandarizado por *IETF*

⁹ *Transaction Language 1 Protocolo Southbound* que comunica con la capa de transporte

¹⁰ Es un protocolo de la capa de aplicación que facilita el intercambio de información de administración entre dispositivos de red.

¹¹ El protocolo de puerta de enlace de frontera. es un protocolo mediante el cual se intercambia información de encaminamiento entre sistemas autónomos

¹² *Representational State Transfer*. Conjunto de restricciones con las que podemos crear un estilo de arquitectura software



ODL es el proyecto que lidera la implementación de *SDN* con plataformas de desarrollo libre, por lo que muchos miembros de la industria lo consideran como un estándar por defecto [28].

5.3. VMware NSX

En 2012, un año posterior a la compra de Nicira por VMware, esta compañía entregó al mercado su plataforma de virtualización denominada NSX con la que pretendían expandir las tecnologías referentes a la virtualización de redes. NSX decide estar un paso adelante con la virtualización adoptando características como: balanceo de carga, firewalls en el núcleo de dispositivos L4.-7 [29] distribuidos inclusive soporte a hipervisores de otros fabricantes, ofreciendo dinamismo e interoperabilidad de plataformas.

El uso de NSX es popular en soluciones integrales para Cloud Computing y SD-WAN, pues permite optimizar las operaciones de nubes públicas y privadas. También facilita la combinación de servicios de red y seguridad, beneficiando la automatización, simplificación y distribución de los servicios en los centros de datos [30].

5.4 Huawei Agile Controller

La multinacional tecnológica ha desarrollado este controlador para cubrir mercados de LAN, WAN, IoT, DCN, entidades Gubernamentales y financieras, ofreciendo una implementación automática, control inteligente y ajustes de ancho de banda por demanda, mejorando la optimización de recursos en la nube y mejorando la experiencia para el usuario final de la solución.

Este controlador es adaptable a ecosistemas de ONOS, ODL que son desarrollados con código abierto, dentro de los protocolos que soporta su plataforma *SDN* se encuentran los siguientes: *OpenFlow*, *BGP*, *IGP*, *OVSDB* y *CLI*. Sus principales códigos de programación están escritos en Python y JAVA [31]. Una característica destacable es que posee un algoritmo de conservación de paquetes para internet (*iPCA*), que detecta la ubicación de una falla en la calidad de servicio, permitiendo

a los administradores determinar si se ha causado una mala experiencia de servicio, [32].

6. Aplicaciones Articuladas con SDN

Esta categoría contiene un número considerable de investigaciones de distintas tendencias tecnológicas actuales que emplean tecnologías *SDN*.

6.1 IoT

Inicialmente, en [33] se propone una arquitectura *SDN* para hogares inteligentes, como se puede observar en la figura 5, donde se optimiza la asignación de ancho de banda de los dispositivos y se controla el tráfico doméstico interno. Dicha arquitectura la componen *SDN Smart Home Cloud*, y *Massive SDN enable Smart Homes*, los cuales se interconectan con el protocolo *OpenFlow*. En el primero el controlador *SDN* se comunica con el módulo de configuración automática (*ACM*), con el módulo *Bandwidth Allocation (BAM)*, y bases de datos de dispositivos domésticos (*HDD*)¹³. El Módulo de configuración automática se puede usar para ayudar a cada dispositivo de *IoT* a registrar y actualizar la información del dispositivo. El *BAM* tiene un algoritmo de asignación para programar recursos de ancho de banda hasta para el tráfico doméstico interno.

El entorno de implementación de la arquitectura se desarrolló en un entorno virtual con *VMwre vCenter Server 6.0.0*, y el sistema operativo Linux Ubuntu 16.04 Kernel versión 4.4.0 se implementaron en un potente servidor de 48 núcleos. El controlador *Ryu*¹⁴ se instaló para administrar los swiches virtuales *SDN OpenFlow* creados por *Mininet*¹⁵. Los resultados de la implementación muestran que la arquitectura propuesta supera la arquitectura tradicional de asignación de ancho de banda del *ISP*¹⁶ al aumentar la relación de transferencia de datos al 30%, reduciendo el 60% de demora y el 90% de la inestabilidad.

¹³ Home device database

¹⁴ Es un controlador de red abierto (*SDN*) diseñado para aumentar la agilidad de la red al facilitar la administración y adaptación de la forma en que se maneja el tráfico.

¹⁵ Mininet: Herramienta que permite configurar un entorno de emulación de redes dentro de un mismo sistema.

¹⁶ ISP: Proveedor de servicios de Internet

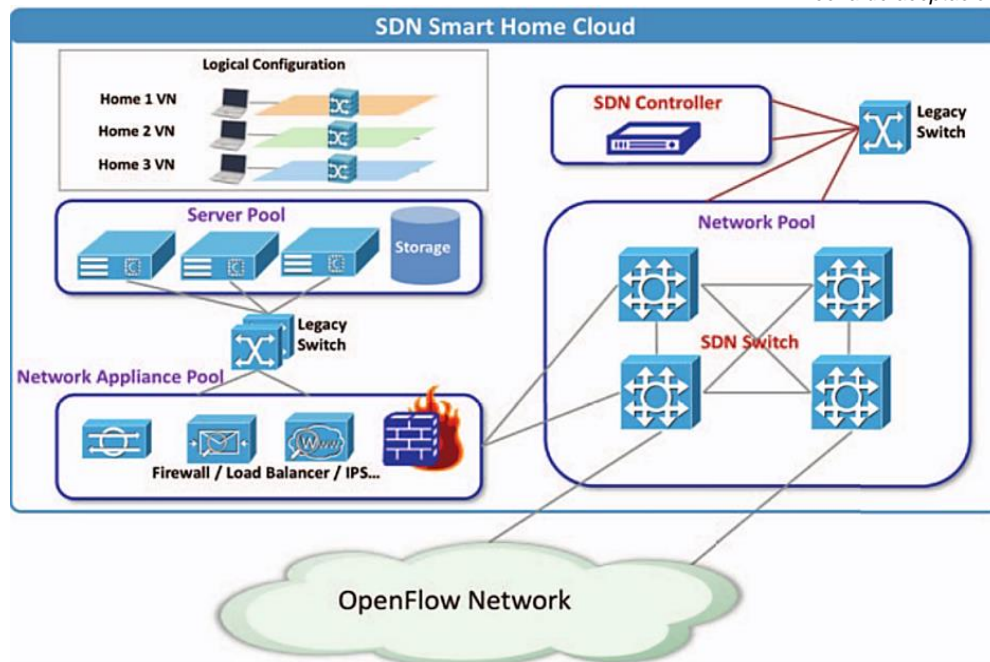


Figura 5. Arquitectura para un Hogar inteligente con SDN [33].

En esta misma línea, Jang et al. [34] propone un módulo de asignación de ancho de banda, donde este debe tener diferentes políticas de asignación de ancho de banda tanto para el tráfico doméstico interno como para el tráfico externo de Internet. El ancho de banda de la red interna se limita al ancho de banda de la red de área local y el ancho de banda de Internet externo se limita al ancho de banda suscrito con el ISP. La política se realiza mediante el módulo de asignación de ancho de banda y se lleva a cabo mediante el conmutador Home OpenFlow y el conmutador SDN ISP. De otro lado, en [35] se desarrolla una solución integrada de línea de alimentación inalámbrica (PLW), debido a la falta de conectividad continua al usar solo inalámbrico en la mayoría de los entornos domésticos. El enfoque dado busca dar respuesta al progreso de una infraestructura omnipresente y sostenible para nuevos servicios integrados con *IoT* y *SDN*. La razón de esta investigación es que para una casa verdaderamente inteligente los dispositivos como: luces, electrodomésticos y tomas de corriente deben tener una conectividad total dentro de una red de datos

rápida. Como estos están generalmente conectados al sistema de suministro de energía de la red eléctrica, tiene sentido usar *PLC*¹⁷ en lugar de otras tecnologías de red. El estándar de interfaz entre los sistemas es el IEEE 1905.1¹⁸ IEEE P1905.1. El artículo sugiere el desarrollo de dispositivos como routers inalámbricos embebidos con un sistema Power Line Wireless (PLW) que podría controlar toda la red del hogar inteligente, conectando dispositivos móviles y estáticos aumentando paralelamente las velocidades de datos.

Por otra parte, en [36] se describe el uso de tecnologías para la administración y soporte de los requerimientos del Internet de los Vehículos (*IoV*) desarrollado con *SDN*. El artículo menciona la importancia de realizar la gestión y control con tecnología *SDN* de redes Ad Hoc Vehiculares (*VANET*) para mitigar el número de muertes causadas por accidentes en el tráfico de las carreteras, que alcanzó la cifra de 1.25 Millones para 2010 según la Organización Mundial de la Salud. Se menciona que *SDN* proporciona una forma dinámica de configurar los dispositivos de cada uno de los nodos inalámbricos de la red (ver figura 6); adicionalmente el sistema responde mucho más rápido a los cambios en la topología de la red; también el controlador está en la capacidad de recolectar estadísticas del tráfico que permiten la toma de decisiones para el control del flujo de información y otros aspectos críticos de la red. Por último, se concluye que *SDN* por sí solo no puede atender los requerimientos de *VANET/IoV*¹⁹, se necesita complementar la solución con tecnologías como *Fog Computing* para mitigar el tiempo de latencia, factor indispensable para la seguridad de las aplicaciones en automóviles.

¹⁷ Programmable Logic Controller: Es un dispositivo electrónico que se programa para realizar acciones de control automáticamente.

¹⁸ IEEE 1905.1: estándar IEEE que define un habilitador de red para redes domésticas compatibles con tecnologías inalámbricas y alámbricas.

¹⁹ Internet de los Vehículos: Rama de Investigación de IoT aplicado a sistemas vehiculares

Igualmente en [37] se presenta una arquitectura con un protocolo de enrutamiento basado en técnicas de predicción que brindan un mejor desempeño y características a *SDN VANET*, como lo indica la figura 6.

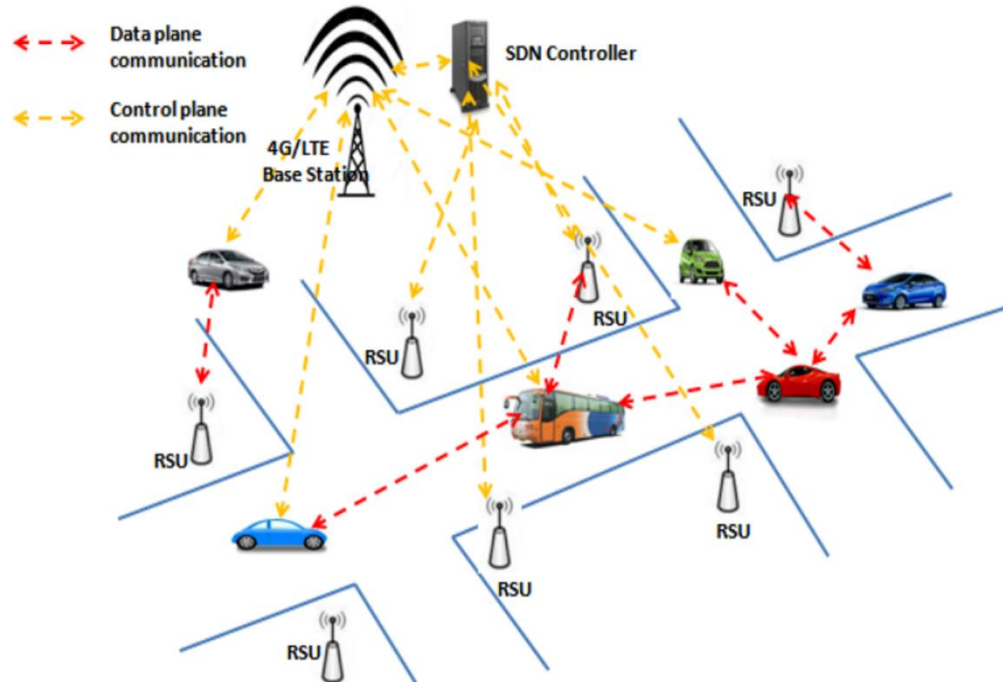


Figura 6. Comunicación *SDN-VANET*, [37].

En otro sentido, en [38] se muestra el desarrollo de *SDN* para *WSN*²⁰ (Wireless Sensors Network), con la implementación de nuevos protocolos basados en la misma lógica de control centralizado para ajustar dinámicamente las necesidades de un sistema de sensores inalámbricos, elementos clave en el paradigma de *IoT*. La investigación muestra el análisis y evaluación de la operación de *WSN* usando el protocolo *CORAL-SDN*²¹.

De igual forma, en relación con lo expuesto, algo inherente en *WSN* es el ahorro de energía y la movilidad de nodos de sensores. A lo que [39] asume tomando un modelo para comparar el consumo de energía de las redes tradicionales *WSN*, junto a *Mininet* y al controlador *Floodlight*²² los cuales le permiten proponer una

²⁰ Wireless sensor networks, red de sensores y actuadores inalámbrica

²¹ Protocolo utilizado para centralizar el control de las *WSN*

²² Es un controlador *SDN* abierto, de clase empresarial con licencia apache y basada en java.

arquitectura más dinámica y que disminuye el consumo de energía al procesar un paquete de datos en una red *SDN* ya que los nodos solo hacen el transporte de información.

Por último, en [40] sus autores describen un nuevo servicio de salud *IoT* para la detección de un ataque cardiaco en tiempo real cuando se va conduciendo un vehículo, usando dos modelos: control de voz y gestos con relojes inteligentes. En el primero mediante el uso de comandos de voz se activa el mecanismo de emergencia que incluye envió de las coordenadas del vehículo a los hospitales más cercanos y mensajes a los vehículos vecinos para que despejen un carril. En caso de que las coordenadas del vehículo con el del reloj inteligente no coincidan, el sistema comprenderá que el comando de voz esta fuera de contexto y disminuirá los casos de falsa emergencia. En el modelo de la figura 7, se puede ver el control de gestos que se lleva a cabo con la lectura de gestos de la muñeca, pulso cardiaco, y en caso de que ocurra un ataque cardiaco fuera del vehículo y dentro de una red vehicular inteligente se notifica a la ambulancia, vehículos y hospitales más cercanos, y de esta forma disminuir el tiempo de repuesta a la emergencia presentada.

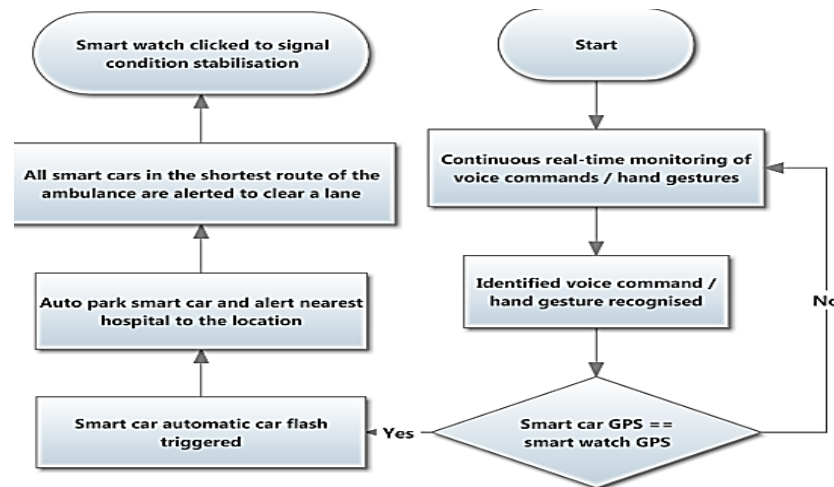


Figura 7. Modelo de control de voz y gestos, [40]

6.2 Datacenters

Uno de los proyectos más ambiciosos utilizando *SDN* es el que se describe en [41]. Allí se presenta la descripción del diseño, implementación y evaluación de *B4*, una



WAN privada que conecta los centros de datos de Google alrededor del mundo. *B4* tiene una serie de características únicas: i) requerimientos masivos de ancho de banda desplegados en varios lugares a nivel global, ii) demanda elástica de tráfico que busca maximizar el ancho de banda promedio, y iii) control total sobre los servidores periféricos y la red, que permite limitar la velocidad y medir la demanda de los servidores de borde.

Debido a lo anterior, se produce una coordinación y una orquestación simplificadas para configuraciones, aprovisionamiento o actualizaciones de red planificados y no planificados. *SDN* permitió aprovechar homogéneamente los recursos de infraestructura independientemente del hardware utilizado.

De otro lado, [42] presenta la descripción de modelos de conectividad entre Datacenters (*DC*), bajo la operación de una arquitectura basada en *ABNO*²³, en vista del uso ineficiente de los recursos en una conectividad estática. Los operadores de *DC* no solamente se ocupan de tareas para optimizar el consumo de energía, también deben proporcionar soluciones para el uso eficiente de recursos para el aprovisionamiento de servicios.

Por lo anterior, el modelo denominado *impulsado por red* hace uso de un operador *SDN* en donde las aplicaciones solicitan transferencia de datos en vez de conectividad con otro *DC*. El *DC* de origen hace la solicitud de transferencia al operador *SDN*, especificando destino, volumen de información y tiempo máximo para la transferencia. Posteriormente el operador *SDN* solicita a *ABNO* el canal con mayor disponibilidad de ancho de espectro disponible, sin despreciar políticas locales y acuerdos de nivel de servicio (*SLA*), por último se envía la respuesta al *DC* de origen realizando la conexión por el canal respectivo.

De la manera descrita anteriormente, los proveedores de servicios de Cloud se pueden beneficiar de la interconexión entre sus *DC*, lo cual no solo da soluciones de equilibrio de carga sino que también aumenta sus ingresos por el uso de recursos

²³ Application based network operations: Arquitectura modular que proporciona funcionalidades de red avanzadas , tales como virtualización de servicios de red , coordinación y optimización entre aplicaciones y recursos de red

de *TI*. Migrando máquinas virtuales (MV), y sincronizando bases de datos de acuerdo al ancho de banda disponible en los diferentes enlaces de conectividad, el uso del modelo *impulsado por red* disminuye el tiempo de transferencia alrededor de 60% respecto con una conectividad estática.

De igual forma, en [43] se mencionan los beneficios que los operadores proporcionan a los usuarios de recursos y almacenamiento informático distribuidos en micro centros de datos, de la misma manera que los operadores de red optimizan la utilización de recursos de redes físicas dispersas como un solo recurso virtual, reduciendo costos de administración.

Por otra parte, [44] propone una solución al problema de orquestación de múltiples controladores *SDN* en una infraestructura de Cloud financiero regional, usando *OpenStack* 'Region'. Concluyendo que el modelo propuesto se ajusta únicamente cuando hay pocas modificaciones en la implementación de *OpenStack* lo relevante de esta investigación es el trabajo con redes interregionales.

En otro sentido, un factor importante en redes *SDN* es la seguridad. Es así como [45] describe que en las redes de *DC* soportados por controladores *SDN*, a la hora de mitigar y reaccionar a cualquier tipo de ciberataque, los tiempos de respuesta son lentos debido a que la administración de la seguridad está a cargo de operadores humanos. Por lo anterior se proporciona una virtualización de las funciones de red con *FPGA*²⁴ (ver figura 8) que mejora sustancialmente las tasas de conmutación, mejorando la precisión y velocidad en la detección de problemas de seguridad y otras anomalías del tráfico al controlador *SDN*.

²⁴ Field Programmable Gate Array, son dispositivos que nos permiten describir un circuito digital usando un lenguaje específico (VHDL y Verilog).

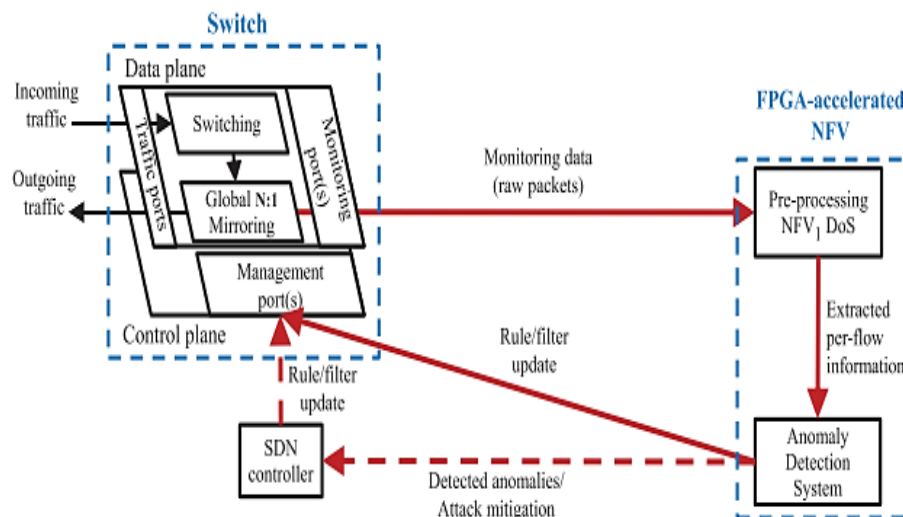


Figura 8. Diseño de Seguridad de red en tiempo real basado en FPGA, [45].

De otro lado, la difusión de servicios basados en la nube que utiliza tecnologías de virtualización ha aumentado significativamente la complejidad de la administración de centros de datos, por lo que ha hecho que se planeen nuevas soluciones a los problemas de rendimiento para la red intra-DC. Es por eso que en [46] se muestra un caso de uso de para la implementación de algoritmos para la gestión de máquinas virtuales (MV)²⁵ y, de esta forma, mejorar características como la escalabilidad, estabilidad de la red, y crecimiento de hosts, por último se plantea añadir otras características como migración y almacenamiento de MV .

En [47], Majdoub et al. proponen un esquema que mejora la eficacia de sobrecarga del ancho de banda utilizado en la comunicación entre switches, para ello se divide la red en varias secciones. Estas solo se requieren de una sola etiqueta $MPLS$ ²⁶, luego se seleccionan nodos de intercambio específicos dentro de cada sección. El nodo de intercambio funciona como un nodo intermedio que divide la ruta completa

²⁵ software que simula un sistema de computación y puede ejecutar programas como si fuese una computadora real.

²⁶ conmutación de etiquetas multiprotocolo, diseñado para unificar el servicio de transporte de datos para las redes basadas en circuitos y las basadas en paquetes

en subrutas y limita el número de etiquetas a utilizar. Sin embargo, esta selección de nodos depende en gran medida de la topología de red.

6.3 5G

En [48], Elgendi et al. trasladan el concepto de *SDN* al control y gestión de infraestructura de redes celulares e inalámbricas, facilitando que una *BS*²⁷ (Base Station) realice funciones de transporte de paquetes bajo el comando de aplicaciones que se ejecutan desde un controlador lógicamente centralizado. También se argumenta que, debido al crecimiento de la demanda de mayor capacidad y cobertura por parte de los usuarios de redes móviles, se propone una arquitectura DenseNets que incrementa el número de femto-celdas en los lugares donde la cantidad de suscriptores es alta, posibilitando la interoperabilidad significativa con dispositivos heterogéneos, logrando así la convergencia a redes como 5G.

En [49] Demestichas, Panagiotis et al. puntualizan cómo los operadores de redes inalámbricas están tratando de satisfacer la creciente demanda de tráfico [50] mediante el despliegue de celdas de varios tamaños (en su mayoría celdas pequeñas), tal y como se muestra en la figura 9, en lugar de utilizar solo estaciones de macrobases básicas (*BS*). En particular, se investiga la introducción de la heterogeneidad y la red de acceso de la nube (RAN), mediante la elaboración de tecnologías inteligentes basadas en conceptos recientes como lo son *SDN* y *NFV*.

²⁷ Estación terrestre conectada a una antena (o varias antenas) que recibe y transmite las señales en la red celular.

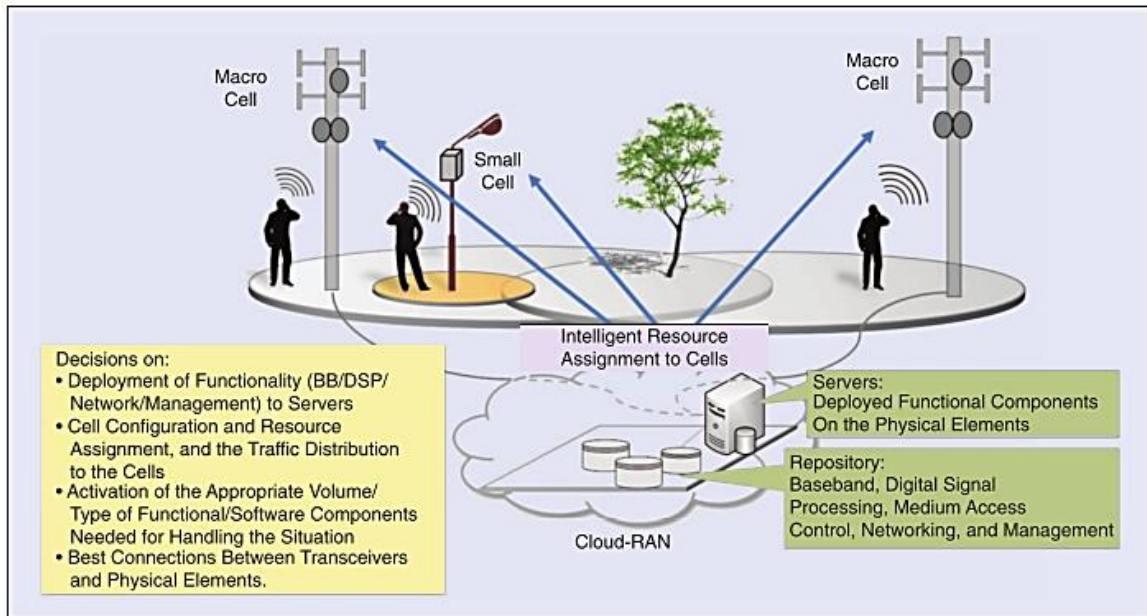


Figura 9. Introducción de la heterogeneidad y la red de acceso de la nube (RAN), [49].

Por otro lado en [51] se describe el proyecto 5G-Crosshaul, que tiene como objetivo la integración de interfaces y tecnologías de *fronthaul* y *backhaul*, aplicando los principios de gestión y orquestación de *SDN* (*OpenDaylight* y *ONOS*) y *NFV* (*ETSI*). En [52], los mismos autores, en un trabajo previo, justifican *backhaul* y *fronthaul* unificadas como un precursor que tiene los requisitos más estrictos no solo en términos de velocidad de datos sino también en latencia, jitter y tasa de errores de bit y que además está en línea con las actividades de investigación llevadas a cabo en la Next Generation Fronthaul Interface Alliance (NGFI), IEEE 1914, y IEEE 802.1, donde se prevé una versión paquetizada del tráfico fronthaul, compatible con las implementaciones backhaul existentes.

En contraste con lo anterior, en [53] se menciona una arquitectura de red *E2E* de *Cloud-Native* que proporciona a empresas y personas una experiencia única en tiempo real con servicios diversificados *KPI*²⁸, y dispuestos a la coexistencia de múltiples estándares (5G, LTE Y Wi-Fi), incorporando tecnologías de conectividad múltiple y la nueva interface aérea 5G. La arquitectura de red 5G se diseñará en

²⁸ Key Performance Indicator Medidores de Desempeño.

función de los sitios de acceso y los DC de la nube de tres capas y en su red de transporte serán participes los controladores *SDN*, quienes generaran una serie de rutas de reenvío de datos específicas basadas en la topología de la red y los requisitos del servicio.

6.4 Big data

Cuando se emplean las buenas características de *SDN* en un entorno de Big data, se espera el poder beneficiar sus aplicaciones en varios aspectos visibles tal y como los mostrados en la figura 10, incluyendo: (1) el procesamiento de Big data en Cloud DCs, (2) mejora en la entrega de datos, (3) programación en tiempo de ejecución para optimización de las aplicaciones, (4) arquitecturas científicas de Big data y (5) programación en Hadoop²⁹ [54],

En este sentido [55],[56], [57], [58], [59], incluyen los beneficios proporcionados por características de *SDN* para las aplicaciones Big data.

Como se explica en [55], en donde se estudia un *Cloud DC* basado en *SDN* para aplicaciones de Big data, se establece un modelo basado en *SDN/OpenFlow*, con switches (CICQ)³⁰ y un App-RA³¹, que permite una asignación de recursos eficiente y una reducción en los consumos de energía para cada aplicación dentro de los DC.

²⁹Es un sistema de código abierto que se utiliza para almacenar, procesar y analizar grandes volúmenes de datos

³⁰ (CICQ) Es switch de entrada combinada y en cola de cruce. Se facilitan para ser programados por diferentes aplicaciones que trabajen en capa de red.

³¹ Application-aware resource prediction: Esquema encargado de la predicción y asignación de recursos para aplicaciones.

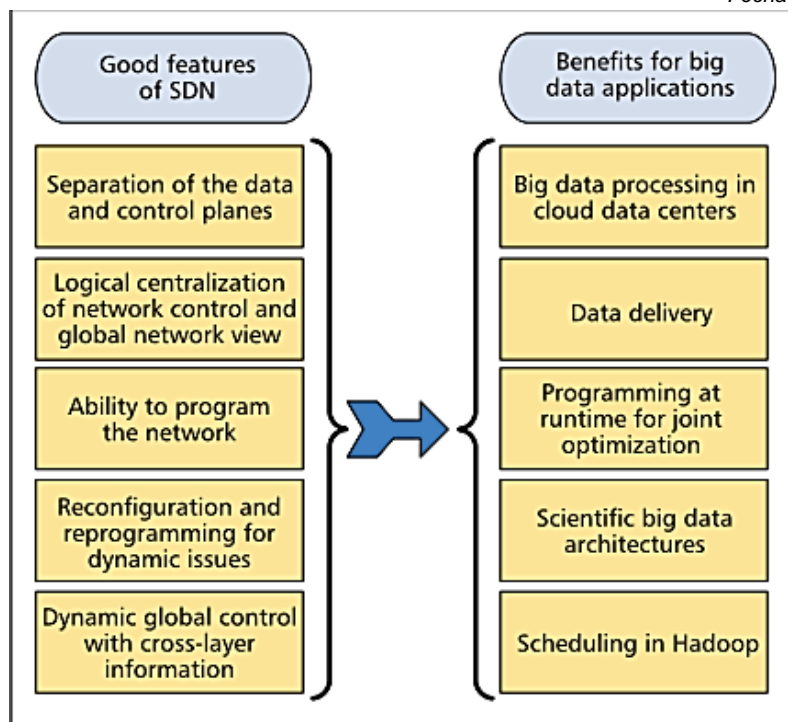


Figura 10. Características de SDN que pueden beneficiar las aplicaciones Big data, [54].

En cuanto a la entrega de datos, en [56] los autores proponen un enfoque híbrido (óptico y eléctrico) que aprovecha la óptica de la capa física con un conmutador remitente de espacio óptico (OSS), y el control que proveen tres conmutadores receptores Top-of-Rack (ToR)³² de una red de conmutación de paquetes eléctricos, para acelerar la entrega de cada patrón de tráfico. Los conmutadores ToR fueron administrados por la aplicación *JGroups*³³ compatible con el controlador *OpenFlow* de SDN, que permite la configuración flexible y dinámica en tiempo de ejecución de los dispositivos fotónicos para admitir patrones de tráfico complejos.

También en [57] Heller et al, se presentan los DC basados en SDN con una composición topológica óptima y con equilibrio de carga del tráfico, implementando

³² Conmutadores top-of-rack utilizados en centros de datos de alta densidad,

³³ Protocolo capaz de comparar el rendimiento de extremo a extremo de una arquitectura de red, mediante la implementación de una aplicación de multidifusión confiable en los hosts finales.

un sistema dinámico en ingeniería de tráfico (TE) con tres componentes: una red Datacenter (DCN), un controlador *SDN* y un administrador de TE, especificados en la figura 11.

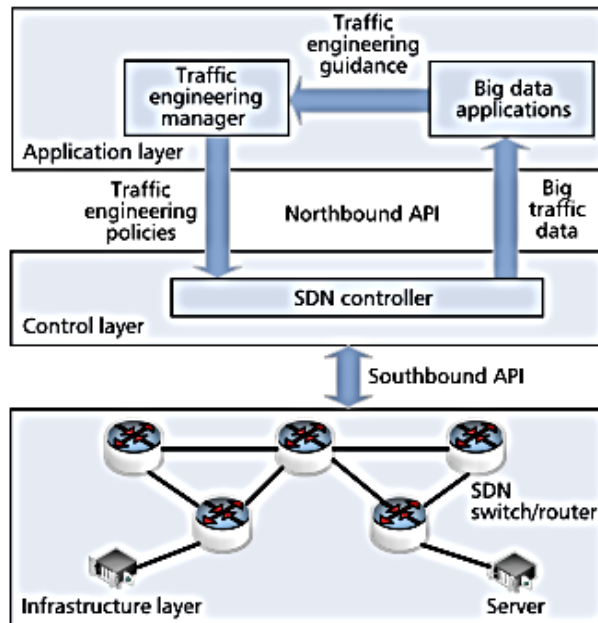


Figura 11. Arquitectura de sistema de ingeniería de tráfico dinámico con *SDN* y Big data Comunicación *SDN-VANET*, [54].

La conexión de ElasticTree³⁴ como depara potenciar la red y permitir un ajuste dinámico en los switches y enlaces, arrojó óptimos resultados como, reducción de consumo de energía del 41% con una topología básica, y un 60% menos de desaprovechamiento de enlaces activos, en comparación con el esquema estático del *DC*.

Por otro lado, en [58] Inder Monga, Eric Pouyoul y Chin Guok, introducen los beneficios de *SDN* a modelos científicos de arquitectura de Big data. Especificando una arquitectura de red dependiente de las capas cruzadas y llamada *OSCARS*³⁵, que se trabajaría en ambientes donde es necesario el traslado continuo de grandes cantidades de información para colaboración científica. Este nuevo modelo de red

³⁴ Que cambia dinámicamente la topología DCN y ajusta enlaces y conmutadores para ahorrar energía.

³⁵ Circuito que se puede usar para proporcionar conectividad de capa 2 a través de la WAN



híbrida logra monitorear las reservas de ancho de banda multidominio, y el rendimiento de la conectividad extremo a extremo.

Finalmente en [59], se presenta *SDN* y su alto impacto en el rendimiento de los sistemas Hadoop. La tendencia creciente es considerar *Hadoop* como plataforma para ayudar a las empresas a construir *DC* más manejables donde el procesamiento de Big Data surge como una parte importante de las aplicaciones. Sin embargo, este carece de una visión global para el tratamiento de datos y la asignación correcta y dinámica del ancho de banda, por lo que el modelo *SDN* en *Hadoop* (*BASS*) adopta la combinación de *SDN* y *Hadoop* para la correcta programación de trabajos de procesamiento Big data.

7. Organizaciones de Estandarización

7.1 ONF

Con el objetivo de impulsar *SDN*, la ONF (Open Networking Foundation) fue fundada en 2011 [3], con una participación actual de 150 miembros como: empresas de informática, software, fabricación de equipos de red, proveedores de servicio, entre los que se destacan empresas como Google, Microsoft, Juniper, Cisco, Verizon, entre otros. Esta organización sin ánimo de lucro participó en la estandarización del protocolo *OpenFlow*, que nació como un proyecto de investigación de la Universidad de Stanford y del cual Martin Casado también hizo parte, abordando los requerimientos de una diversa gama de dispositivos adaptándolos a especificaciones de código abierto, [16]. En 2017 termina su fusión con ON.Lab, encargada del desarrollo de la plataforma *SDN ONOS*, así como del caso de uso *SDN/NFV* más desplegado en redes de operadoras denominado CORD (Central Office Re-architected as a Datacenter). Finalmente, en 2018 la comunidad

P4 [60], [61], surgida en Stanford como mejora de *OpenFlow* para programabilidad del plano de datos se une también a ONF.

7.2 IRTF e ITU

El grupo Software-Defined Networking Research Group (*SDNRG*) del IRTF [62], también se encargó de trabajar los fundamentos y especificaciones de *SDN*, hasta 2017, cuando la actividad del grupo cesó. En la RFC 7426 definen la arquitectura *SDN* con pocas diferencias respecto a la definida por ONF actualmente.

De manera similar, ITU también dispone de un grupo de trabajo respecto a *SDN* [63], aunque con poca actividad en comparación con la ONF.

7.3. ETSI

Por su parte, ETSI lleva el peso principal en la estandarización de NFV, aunque gran parte de sus documentos son recomendaciones. Su actividad comenzó en 2012, con el Industry Specification Group (ISG), fundado por siete operadoras de redes de telecomunicación internacionales. Además, de manera similar a ONF con ONOS, ETSI es la encargada principal del desarrollo y evolución de la plataforma principal NFV de código abierto, denominada Open Source Mano (OSM) [64] y en la que participan más de 100 organizaciones, incluyendo operadoras, fabricantes, pequeñas empresas, institutos de investigación y universidades.

8. Conclusiones

En este artículo se ha realizado una revisión de las categorías más relevantes del paradigma *SDN*, creando un marco de referencia para futuras investigaciones. Para ello, se realizó la descripción de los componentes de arquitectura, contextualizando al lector de la importancia y funcionalidad de cada uno de estos. Los diversos casos de uso de *SDN* en tendencias tecnológicas como: IoT, 5G, Big data, y modernización de la gestión de centros de datos fueron también documentados. Así mismo, mostramos algunos de los controladores que más renombre poseen en el mercado, puntualizando en su desarrollo, características principales, aporte para *SDN*, y grado de compatibilidad con otros protocolos. Adicionalmente, se incluyó de



manera general el concepto de NFV y cómo, mediante su contribución de virtualización, complementa el paradigma *SDN*, permitiendo reducción de costos y mayor despliegue que en las redes tradicionales.

Por último se eligieron y mencionaron las principales instituciones de estandarización como lo son ONF, IRTF, ITU y ETSI y que han trabajado en el despliegue, desarrollo y estandarización de *SDN*.

Resulta interesante que la revisión bibliográfica del tema evidencia escasez de literatura en países de habla hispana, por lo tanto hay oportunidad de seguir explorando investigaciones que evidencien la adopción de redes *SDN* y todos los retos que esta conlleva.

Como trabajos futuros en el tema aparece la oportunidad para el mercado *SDN*, motivado por el incremento de recursos demandados por las diversas tendencias tecnológicas, en las que se incluyen BYOD (“Traiga Su Propia Dispositivo”, del inglés *Bring Your Own Device*), que enmarca nuevos retos para lograr mayor seguridad [65], desarrollando soluciones que permitan el despliegue de *SDN* aportando movilidad, gestión, y monitoreo de los dispositivos que poseen información imprescindible de las organizaciones, [66].

De otra parte, *SDN* tiene una gran oportunidad para lograr un cambio trascendente en la administración de las redes actuales, que comienza desde el buen aprovisionamiento de sus APIs, [67], para una mayor simplicidad en su control y procede con la reducción de infraestructura física para mayor visibilidad y aprovechamiento de costos.

Es importante mencionar que en organizaciones como la ITU, ITRF y ETSI, no se encuentra información con desarrollos en la categoría de normatividad de relevancia, debido a que la ONF ha liderado desde un inicio el proceso de normatividad de *SDN*. Por otro lado, cerca del 42% de las referencias son de aplicaciones y casos de uso del paradigma *SDN*, por lo que es claro que existe

evidencia de la aplicabilidad y beneficios de SDN en varios entornos del mercado de las redes de comunicaciones.

9. Referencias

- [1] International Telecommunications Union ITU, "Facts and figures," in *Itu*, 2013, p. 14–16, Doi:10.1787/9789264202085–5–en.
- [2] Stanford University, "Ethane: una arquitectura de protección para redes empresariales." [Online]. Available: <http://yuba.stanford.edu/ethane/>. [Accessed: 02-Sep-2018].
- [3] T. Nadeau and K. Gray, *An Authoritative Review of Network Programmability Technologies*. 2013.
- [4] D. Maldonado, "Diseño e implementación de una aplicación bajo una Arquitectura SDN," *Pontif. Univ. Javeriana-Bogota*, pp. 1–80, 2014.
- [5] N. McKeown, T. Anderson, H. Balakrishnan, G. Parulkar, L. Peterson, J. Rexford, S. Shenker, and J. Turner, "OpenFlow," *ACM SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 38, no. 2, p. 69, Doi:10.1145/1355734.1355746, Mar. 2008.
- [6] W. Haisang, "From Clean Slate to SDN," *Huawei Corp*, 2012. [Online]. Available: <http://carrier.huawei.com/en/success-stories/softcom/cleanslatetosdn>. [Accessed: 21-Jul-2018].
- [7] Radius Stories at the Edge, "Network Virtualization & SDN," 2018. [Online]. Available: <https://www.vmware.com/radius/history-nsx-future-network-virtualization/>. [Accessed: 20-Jul-2018].
- [8] R. Hernandez Sampieri, C. Fernandez Collado, and M. D. P. Baptista Lucio, *Metodología de la investigación*. 2010.
- [9] Open Networking Foundation, "Arquitectura de las redes definidas por software (SDN)," 2014. [Online]. Available: www.opennetworking.org. [Accessed: 20-Jul-2018].
- [10] B. Valencia, S. Santacruz, and L. Y. B. J. J. Padilla, "Mininet : una herramienta versátil para emulación y prototipado de Redes Definidas por Software 1 Mininet : a versatile tool for emulation and prototyping of Software Defined Networking," no. 17, pp. 62–70, 2015.
- [11] M. I. Hamed, B. M. Elhalawany, M. M. Fouda, and A. S. T. Eldien, "A Novel Approach for Resource Utilization and Management in SDN," pp. 337–342, 2017.
- [12] B. Pandya, "Framework for Securing SDN Southbound communication," 2017.
- [13] A. Jalili, H. Nazari, S. Namvarasl, and M. Keshtgari, "A Comprehensive analysis on Control Plane Deployment in SDN : In-Band versus Out-of-Band solutions," *Urmia Univ. , Iran*, pp. 1025–1031, 2017.



- [14] L. Richardson and S. Ruby, *RESTful Web Services*, vol. 39, no. 5. 2008.
- [15] K. Pentikousis, Y. Wang, and W. Hu, "MobileFlow:Toward Software-Defined Mobile Networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, no. 3, pp. 44–53, 2013.
- [16] J. Tourrilhes, P. Sharma, S. Banerjee, and J. Pettit, "SDN and OpenFlow Evolution: A Standards Perspective," *Computer (Long. Beach. Calif.)*, vol. 47, no. 11, p. 22–29, Doi:10.1109/MC.2014.326, Nov. 2014.
- [17] W. Zhou, L. Li, and W. Chou, "SDN Northbound REST API with Efficient Caches," in *2014 IEEE International Conference on Web Services*, 2014, p. 257–264, Doi:10.1109/ICWS.2014.46.
- [18] W. Zhou, L. Li, M. Luo, and W. Chou, "REST API Design Patterns for SDN Northbound API," in *2014 28th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops*, 2014, p. 358–365, Doi:10.1109/WAINA.2014.153.
- [19] "ETSI - Network Functions Virtualization:" [Online]. Available: <https://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/nfv>. [Accessed: 10-Sep-2018].
- [20] G. Bianchi, E. Biton, N. Blefari-Melazzi, I. Borges, L. Chiaraviglio, P. de la Cruz Ramos, P. Eardley, F. Fontes, M. J. McGrath, L. Natarianni, D. Niculescu, C. Parada, M. Popovici, V. Riccobene, S. Salsano, B. Sayadi, J. Thomson, C. Tselios, and G. Tsolis, "Superfluidity: a flexible functional architecture for 5G networks," *Trans. Emerg. Telecommun. Technol.*, vol. 27, p. 1178–1186, Doi:10.1002/ett.3082, Sep. 2016.
- [21] R. Bifulco and R. Canonico, "Analysis of the handover procedure in Follow-Me Cloud," *2012 1st IEEE Int. Conf. Cloud Networking, CLOUDNET 2012 - Proc.*, p. 185–187, Doi:10.1109/CloudNet.2012.6483683, 2012.
- [22] M. B. Al-Somaidai, "Survey of Software Components to Emulate OpenFlow Protocol as an SDN Implementation," *Am. J. Softw. Eng. Appl.*, vol. 3, no. 6, p. 74, Doi:10.11648/j.ajsea.20140306.12, 2014.
- [23] Networking Open Foundation, "SDN Architecture," no. 1.1, pp. 1–59, 2016.
- [24] Open Networking Lab (ON.Lab), "ON.Lab Delivers Software for New Open Source SDN Network Operating System - ONOS," 2017. [Online]. Available: <https://www.prnewswire.com/news-releases/onlab-delivers-software-for-new-open-source-sdn-network-operating-system--onos-300004797.html>. [Accessed: 28-Jul-2018].
- [25] ON.LAB, "Introducing ONOS - a SDN network operating system for Service Providers," vol. 1, p. 14, 2014.
- [26] M. Paliwal, D. Shrimankar, and O. Tembhurne, "Controllers in SDN: A Review Report," *IEEE Access*, vol. 6, p. 36256–36270, Doi:10.1109/ACCESS.2018.2846236, 2018.

- [27] J. L. G. Rodriguez Farfán, "Integración de redes IP utilizando SDN," *Inst. Tecnológico Buenos Aires*, 2017.
- [28] J. Medve, R. Varga, and A. Tkacik, "OpenDaylight: Towards a model-driven SDN controller architecture," *roc. IEEE 15th Int. Symp. World Wireless, Mob. Multimed. Netw.*, pp. 1–6, 2014.
- [29] SDX Central, "What is VMware NSX and VMware SDN Network Virtualization?," 2012. [Online]. Available: <https://www.sdxcentral.com/vmware/definitions/what-is-vmware-nsx/>. [Accessed: 28-Jul-2018].
- [30] P. Morreale and J. Anderson, "Software Defined Networking," *Univ. Politec. Catalunya*, p. 1–67, Doi:10.1201/b17708, Nov. 2014.
- [31] SdxCentral LLC, "Network Virtualization Report," *Ind. Rep.*, no. 1, pp. 1–44, 2017.
- [32] Huawei Technologies Inc, "Huawei Agile Campus Network Solution Brochure," 2018. [Online]. Available: http://e.huawei.com/en/related-page/solutions/technical/agile-networking/agile-campus-solutions/agile-campus/brochure/Solutions_Campus_network. [Accessed: 29-Jul-2018].
- [33] H. Jang and J. Lin, "SDN Based QoS Aware Bandwidth Management Framework of ISP for Smart Homes," *2017 IEEE SmartWorld, Ubiquitous Intell. Comput. Adv. Trust. Comput. Scalable Comput. Commun. Cloud Big Data Comput. Internet People Smart City Innov.*, pp. 1–6, 2017.
- [34] H. C. Jang, C. W. Huang, and F. K. Yeh, "Design a bandwidth allocation framework for SDN based smart home," *7th IEEE Annu. Inf. Technol. Electron. Mob. Commun. Conf. IEEE IEMCON 2016*, p. Doi:10.1109/IEMCON.2016.7746320, 2016.
- [35] A. Mckeown, H. Rashvand, T. Wilcox, and P. Thomas, "Priority SDN Controlled Integrated Wireless and Powerline Wired for Smart-Home Internet of Things," in *2015 IEEE 12th Intl Conf on Ubiquitous Intelligence and Computing and 2015 IEEE 12th Intl Conf on Autonomic and Trusted Computing and 2015 IEEE 15th Intl Conf on Scalable Computing and Communications and Its Associated Workshops (UIC-ATC-ScalCom)*, 2015, no. c, p. 1825–1830, Doi:10.1109/UIC-ATC-ScalCom-CBDCom-IoP.
- [36] S. A. Lazar and C. E. Stefan, "Future vehicular networks: what control technologies?," *Commun. (COMM), 2016 Int. Conf.*, pp. 337–340, 2016.
- [37] A. U. Khan and B. K. Ratha, "Time series prediction QoS routing in software defined vehicular ad-hoc network," in *2015 International Conference on Man and Machine Interfacing (MAMI)*, 2015, p. 1–6, Doi:10.1109/MAMI.2015.7456576.
- [38] T. Theodorou and L. Mamas, "CORAL-SDN: A software-defined networking solution for the Internet of Things," in *2017 IEEE Conference on Network Function Virtualization and Software Defined Networks (NFV-SDN)*, 2017, p. 1–2, Doi:10.1109/NFV-SDN.2017.8169870.



- [39] P. Jayashree and F. I. Princy, "Leveraging SDN to Conserve Ener in WSN An Analysis," *2015 3rd Int. Conf. Signal Process. Commun. Netw.*, 2015.
- [40] S. Ali and M. Ghazal, "Real-time Heart Attack Mobile Detection Service (RHAMDS): An IoT use case for Software Defined Networks," in *2017 IEEE 30th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, 2017, p. 1–6, Doi:10.1109/CCECE.2017.7946780.
- [41] S. Jain, M. Zhu, J. Zolla, U. Hölzle, S. Stuart, A. Vahdat, A. Kumar, S. Mandal, J. Ong, L. Poutievski, A. Singh, S. Venkata, J. Wanderer, and J. Zhou, "B4," in *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2013 conference on SIGCOMM - SIGCOMM '13*, 2013, p. 3, Doi:10.1145/2486001.2486019.
- [42] A. Asensio, L. Gifre, M. Ruiz, and L. Velasco, "Carrier SDN for flexgrid-based inter-datacenter connectivity," in *2014 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2014, p. 1–4, Doi:10.1109/ICTON.2014.6876337.
- [43] B. Y. Yoon and J.-H. Lee, "Transport SDN Architecture for Distributed Cloud Services," pp. 14–15, 2014.
- [44] Z. Yongkai, Y. Hang, Z. Lijun, L. Guobao, and L. Ge, "Multiple SDN controller orchestration for financial cloud," *2016 Int. Conf. Cyber Secur. Smart Cities, Ind. Control Syst. Commun. SSIC 2016 - Proc.*, p. 0–5, Doi:10.1109/SSIC.2016.7571809, 2016.
- [45] P. Varga, G. Kathareios, A. Mate, R. Clauberg, A. Anghel, P. Orosz, B. Nagy, T. Tothfalusi, L. Kovacs, and M. Gusat, "Real-time security services for SDN-based datacenters," in *2017 13th International Conference on Network and Service Management (CNSM)*, 2017, p. 1–9, Doi:10.23919/CNSM.2017.8256030.
- [46] J. Teixeira, G. Antichi, A. Del Chiaro, S. Giordano, and A. Santos, "Datacenter in a Box: Test Your SDN Cloud-Datacenter Controller at Home," in *2013 Second European Workshop on Software Defined Networks*, 2013, p. 99–104, Doi:10.1109/EWSDN.2013.23.
- [47] E. K. Ali, M. Manel, and Y. Habib, "An Efficient MPLS-Based Source Routing Scheme in Software-Defined Wide Area Networks (SD-WAN)," in *2017 IEEE/ACS 14th International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA)*, 2017, p. 1205–1211, Doi:10.1109/AICCSA.2017.165.
- [48] I. Elgendi, K. S. Munasinghe, and A. Jamalipour, "A three-tier SDN architecture for DenseNets," in *2015 9th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS)*, 2015, vol. 1, p. 1–7, Doi:10.1109/icspcs.2015.7391793.
- [49] P. Demestichas, A. Georgakopoulos, D. Karvounas, K. Tsagkaris, V. Stavroulaki, J. Lu, C. Xiong, and J. Yao, "5G on the Horizon: Key Challenges for the Radio-Access Network," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 8, p. 47–53,

Doi:10.1109/MVT.2013.2269187, Sep. 2013.

- [50] "Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016–2021 White Paper - Cisco." [Online]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>. [Accessed: 26-Sep-2018].
- [51] X. Costa Perez, A. Garcia Saavedra, L. XI, T. Deiss, and O. De La Antonio, "5G- (Rosshaul : an Sdn / Nfv Integrated Fronthaul / Backhaul Transport Network Architecture," vol. 24, no. February, pp. 38–45, 2017.
- [52] A. De La Oliva, X. C. Perez, A. Azcorra, A. Di Giglio, F. Cavaliere, D. Tiegelbekkers, J. Lessmann, T. Haustein, A. Mourad, and P. Iovanna, "Xhaul: toward an integrated fronthaul/backhaul architecture in 5G networks," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 22, no. 5, p. 32–40, Doi:10.1109/MWC.2015.7306535, Oct. 2015.
- [53] A. Sutton, "5G network architecture," *J. Inst. Telecommun. Prof.*, vol. 12, pp. 8–15, 2018.
- [54] L. Cui, F. R. Yu, and Q. Yan, "When big data meets software-defined networking: SDN for big data and big data for SDN," *IEEE Netw.*, vol. 30, no. 1, p. 58–65, Doi:10.1109/MNET.2016.7389832, Jan. 2016.
- [55] W. Hong, K. Wang, and Y.-H. Hsu, "Application-Aware Resource Allocation for SDN-based Cloud Datacenters," in *2013 International Conference on Cloud Computing and Big Data*, 2013, p. 106–110, Doi:10.1109/CLOUDCOM-ASIA.2013.44.
- [56] P. Samadi, D. Calhoun, H. Wang, and K. Bergman, "Accelerating Cast Traffic Delivery in Data Centers Leveraging Physical Layer Optics and SDN," *IFIP Int. Conf. Opt. Netw. Des. Model.*, pp. 73–77, 2014.
- [57] Y. Han, S. s. Seo, J. Li, J. Hyun, J. H. Yoo, and J. W. K. Hong, "Software defined networking-based traffic engineering for data center networks," *Netw. Oper. Manag. Symp. (APNOMS), 2014 16th Asia-Pacific*, p. 1–6, Doi:10.1109/APNOMS.2014.6996601, 2014.
- [58] I. Monga, E. Pouyoul, and C. Guok, "Software-Defined Networking for Big-Data Science - Architectural Models from Campus to the WAN," in *2012 SC Companion: High Performance Computing, Networking Storage and Analysis*, 2012, p. 1629–1635, Doi:10.1109/SC.Companion.2012.341.
- [59] P. Qin, B. Dai, B. Huang, and G. Xu, "Bandwidth-Aware Scheduling With SDN in Hadoop: A New Trend for Big Data," *IEEE Syst. J.*, vol. 11, no. 4, p. 2337–2344, Doi:10.1109/JSYST.2015.2496368, Dec. 2017.
- [60] "P4 Language Consortium." [Online]. Available: <https://p4.org/>. [Accessed: 10-Sep-2018].
- [61] P. Bosshart, D. Daly, M. Izzard, N. McKeown, J. Rexford, C. Schlesinger, D. Talayco, A. Vahdat, G. Varghese, and D. Walker, "Programming Protocol-Independent Packet Processors," vol. 44, no. 3, p. 88–95,



Doi:10.1145/2656877.2656890, 2013.

- [62] “IRTF Software-Defined Networking Research Group (SDNRG).” [Online]. Available: <https://irtf.org/concluded/sdnrg>. [Accessed: 10-Sep-2018].
- [63] “ITU- Software-defined Networking (SDN).” [Online]. Available: <https://www.itu.int/en/ITU-T/sdn/Pages/default.aspx>. [Accessed: 10-Sep-2018].
- [64] “Open Source Mano – ETSI.” [Online]. Available: <https://osm.etsi.org/>. [Accessed: 10-Sep-2018].
- [65] T. Ninikrishna, S. Sarkar, R. Tengshe, M. K. Jha, L. Sharma, V. K. Daliya, and S. K. Routray, “Software defined IoT: Issues and challenges,” *Proc. Int. Conf. Comput. Methodol. Commun. ICCMC 2017*, vol. 2018–Janua, no. Iccmc, p. 723–726, Doi:10.1109/ICCMC.2017.8282560, 2018.
- [66] M. Ketel, “Enhancing BYOD Security through SDN,” *SoutheastCon 2018*, pp. 1–2.
- [67] E. Rojas, “From Software-Defined to Human-Defined Networking: Challenges and Opportunities,” *IEEE Netw.*, vol. 32, no. 1, p. 179–185, Doi:10.1109/MNET.2017.1700070, Jan. 2018.