

Uso de las redes definidas por software en el rendimiento integral de las telecomunicaciones como solución a la escalabilidad y la gestión de los recursos informáticos

Marco Antonio Calderón Ureña
Escuela de Ingeniería
ULACIT
San José, Costa Rica
mcalderonu888@ulacit.ed.cr

Alejandro Sandoval Gonzalez
Escuela de Ingeniería
ULACIT
San José, Costa Rica
asandovalg768@ulacit.ed.cr

Esteban Umaña Coto
Escuela de Ingeniería
ULACIT
San José, Costa Rica
eumanac833@ulacit.ed.cr

Julio Córdoba Retana
Escuela de Ingeniería
ULACIT
San José, Costa Rica
jcordobar022@ulacit.ed.cr

Resumen - La interconectividad de servicios y tecnologías es un aspecto que se vuelve indispensable hoy en día, tomando en cuenta el incremento a escala global de usuario, dispositivos y aplicaciones que constantemente utilizan la red, esto se debe en parte a las tendencias tecnológicas que están emergiendo, el internet de las cosas (IoT), el procesamiento y análisis de gran cantidad de información (Big Data) o la transmisión de audio y video (Streaming) o 5G, son solo algunas tecnologías que van tomando fuerza, pero estos aspectos han ocasionado que las arquitecturas de red actuales vayan quedando obsoletas. Es por la necesidad de mejora en aspectos de almacenamiento, ancho de banda y mayor flexibilidad que ha provocado que las redes definidas por software (SDN) se establezcan como el nuevo paradigma en el diseño de topologías de redes, ya que este ha venido a cambiar en cómo se diseñan y administran las redes de forma centralizada. Por ello, esta investigación tiene como objetivo dejar el concepto de redes definidas por software más claro, realizando una comparativa de las SDN frente a las redes tradicionales, para ver sus diferencias y similitudes en aspecto de funcionalidad y costo. Analizar cómo este nuevo paradigma en redes va de la mano con las nuevas tecnologías y sus beneficios al incluirla dentro de estas, y estudiar un caso de éxito en que se implementó esta topología para su estudio y comprensión de cuáles fueron las claves que permitieron que las SDN fueran viables en estas empresas, todo esto basado en la revisión bibliográfica de investigaciones similares y otras fuentes de información como artículos científicos. Esto con el fin de procurar responder algunas de las preguntas que se plantearon acerca de las SDN durante la investigación, como los beneficios de las redes definidas por software y su aporte a escala empresarial en temas de escalabilidad y administración.

Palabras clave - SDN, escalabilidad, administración, IoT, 5G

Abstract - The interconnectivity of services and technologies is an aspect that becomes essential today, taking into account the global increase in users, devices and applications that constantly use the network, this is due in part to the technological trends that are emerging, the internet of things (IoT), the processing and analysis of a large amount of information (Big Data) or the transmission of audio and video (Streaming) or 5G, are just some technologies that are gaining strength, these aspects have caused current network

architectures become obsolete. It is due to the need for improvement in aspects of storage, bandwidth and greater flexibility that has caused software-defined networks (SDN) to establish themselves as the new paradigm in the design of network topologies, since this has come to change how networks are designed and managed centrally. Therefore, this research aims to make the concept of software-defined networks clearer, making a comparison of SDN against traditional networks, to see their differences and similarities in terms of functionality and cost, Analyze how this new paradigm in Networks goes hand in hand with new technologies and their benefits by including it within these and studying a success case in which this topology was implemented for its study and compression of results were the keys that allowed SDN to be viable in these companies, all this based on the bibliographic review of similar research and other sources of information such as scientific articles. This in order to seek to answer some of the questions that were raised about SDN during the research, such as the benefits of software-defined networks and their contribution at the enterprise level in issues of scalability and administration.

Keywords - SDN, scalability, administration, IoT, 5G

I. INTRODUCCIÓN

Las redes definidas por software nacieron en el año 1990 cuando se empezaron a ofrecer funciones programables en la red, esta tecnología surge con el fin de mitigar varios problemas que existían en ese momento, y que aún persisten como lo pueden ser: que los centros de datos responden a patrones de tráfico predecibles, o que surjan problemas de demanda por el gran volumen de datos, así como la exigencia de procesamiento de datos a gran velocidad, la necesidad de escalar una red de manera oportuna y que esta no sea costosa, ni que exija mucho tiempo, y además permite hacer cambios en ella de manera mucho más rápida. [1]

Durante los últimos años se ha tenido un incremento en el tráfico de datos de Costa Rica, como lo manifiesta el informe estadístico de la SUTEL al cierre del año 2020, cuando se estimó que el tráfico de datos de redes móviles tendría un incremento del 39% respecto al año previo [2], además hay más tecnologías emergentes como el internet de las cosas, las redes 5G, los servicios en la nube, la inteligencia artificial y

el *Big Data*, por mencionar algunas, que requieren una red más dinámica y que llegan a generar problemas en la red si no se manipula de una forma correcta o no se monitorea constantemente.

Un ejemplo de este aumento de los requerimientos es la forzosa necesidad para trabajar, estudiar e incluso reunirse en actividades sociales mediante plataformas virtuales a causa de la pandemia por Covid-19, y estas son algunas de las razones por las que hace reflexionar sobre la importancia de las arquitecturas de red basadas en software.

A raíz de la afectación que causó la pandemia, las empresas se vieron forzadas a cambiar sus estructuras en temas de flujo de trabajo, y esto conlleva a un aumento en el procesamiento de grandes cantidades de información (*Big Data*), y un alto tráfico de audio y video en tiempo real (*Streaming*), lo cual se traduce en mayor consumo de ancho de banda y mayor uso de recursos para almacenamiento. [3]

Es por esta razón y por la urgencia de mejorar la arquitectura de red, que las redes definidas por software han emergido como una solución a las limitantes que posee las redes tradicionales, en cuanto a poder cubrir las exigencias actuales de las empresas o usuarios[4], y se ha logrado llegar a establecerse como un estándar importante, siendo capaz de cubrir necesidades tales como la visibilidad, la escalabilidad, la calidad del servicio y la seguridad, entre otras, debido a su diseño centralizado y dinámico, lo cual promete llegar a causar una transformación total en la arquitectura.

Los bajos costos de operación, la integración con la nube y la gestión integral de la infraestructura son algunos de los factores que se esperan que ayuden a impulsar esta nueva tendencia, y que aumente el mercado de este tipo de redes que viene en un crecimiento exponencial, ya que según la investigación de mercado “Mercado de SDN por componentes, servicios, industria vertical TI y región – Global Forecast to 2027” publicado en *Valuates Reports*, se visualiza que alcance un valor de mercado de 72,630 millones de dólares solo en los Estados Unidos para el 2027 y con crecimiento de la tasa de crecimiento anual compuesto (CAGR) del 28,2% entre los años 2020 al 2027.[5]

Por lo anteriormente expuesto, esta investigación tiene la finalidad de ayudar a comprender cómo las empresas que presentaron problemas en temas de escalabilidad, y gestión de los recursos tecnológicos lograron solventarlos mediante una adecuada implementación de red definida por software y de cómo cumplieron sus objetivos con la utilización de este tipo de redes.

Además, se va a realizar y plasmar una comparación clara entre los pros y contras que existen en la utilización de una arquitectura de red tradicional y una red definida por software según las necesidades.

Por último, exponer un caso real donde se observe cómo la implementación de una red definida por software trajo consigo ventajas de poder desarrollar una topología de red más robusta.

II. MARCO TEÓRICO

Las redes definidas por software, también conocidas por sus siglas en inglés “SDN” hacen referencia a *Software Defined Network*, son un tipo de arquitectura de red que no es precisamente nueva, pero en los últimos años han tomado popularidad, por lo que es importante decir que se encuentran en constante evolución y prometen ser muy eficientes para labores de gestión y escalabilidad de redes de

telecomunicaciones, entre otras cualidades que se describen más adelante. [6]

La tecnología SDN surge de la idea de solucionar la problemática de las redes tradicionales que, a pesar de que han funcionado por muchos años fueron diseñadas varias décadas atrás con una óptica limitada con respecto al futuro, ya que no darán a basto con respecto a los requerimientos de las tecnologías emergentes, las cuales son cada vez más exigentes en cuestión de la cantidad de datos que viajan a través de la red, la velocidad en que se requiere que lo hagan y la velocidad con la que estas aumentan de tamaño.

Antes de profundizar en las redes SDN, es importante reseñar sobre la historia y funcionamiento de las redes convencionales para comprender cuáles son sus principales diferencias. Las redes tradicionales están basadas en los modelos de referencia TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) desarrollado en la década de 1970 por la Agencia de Investigación de Programas Avanzados (ARPA), la misma organización que creó la primera red de comunicaciones conocida como ARPANET [7], y el modelo OSI (*Open Systems Interconnection*) fue desarrollado una década más tarde, en la de 1980, por la ISO (*International Organization for Standardization*). [8]

Casi todas las comunicaciones de redes de telecomunicaciones que han funcionado hasta la actualidad han usado estos modelos de referencia, y se basan en la utilización de capas con estructura vertical para las comunicaciones de redes. En ambos modelos el plano de control, y el plano de datos se encuentra correlacionado, y esto quiere decir que los mismos dispositivos de *hardware* son encargados de muchas funciones y esto provoca que para las redes del futuro sean susceptibles a congestiones y además sean más difíciles de administrar.

Para comprender de mejor manera, qué significa el plano de control y el de datos, se describirán algunas de las funciones principales. En el plano de datos ocurren las tareas de envío de mensajes, se les da formato por medio de las tramas, se desencapsulan y se vuelven a encapsular los paquetes, entre otras funciones. Mientras que el plano de control hace referencia a las acciones que controlan el plano de datos, como por ejemplo la revisión y gestión de los protocolos de red, mediante las tablas de enrutamiento y tablas MAC, entre otras. [9]

En las redes SDN, una de las principales ventajas es que se separa el plano de datos del plano de control, esto lo que quiere decir es que los dispositivos de *hardware* ya no se encargan de ambas funciones, sino que únicamente sea responsable de la entrega de datos de extremo a extremo y se incorpora un dispositivo conocido como controlador SDN que por medio de software permite gestionar el plano de datos, es decir, las funciones de enrutamiento y reenvío IP. A continuación, se elabora la figura 1 que hace referencia a una comparativa entre una topología de red convencional y una de tipo SDN. Las cuales son muy similares, pero en la topología de redes definidas por software se incorpora el controlador SDN.

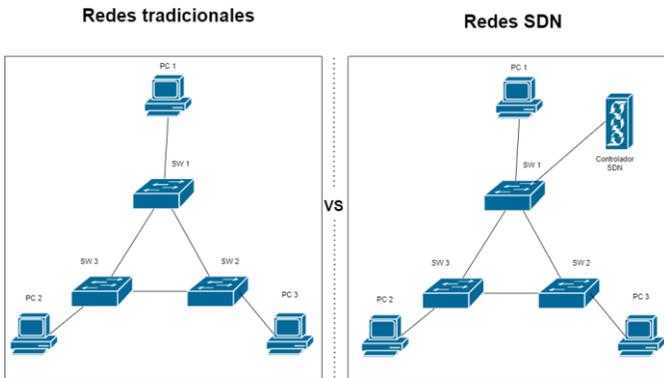


Figura 1: Comparativa de topología de red tradicional y SDN. [9].

La arquitectura SDN se compone principalmente de 3 capas, en el primer nivel se encuentra la capa de infraestructura, en la cual se localizan los dispositivos de red, por ejemplo, los conmutadores, también conocidos como switches, estos se encargan de interconectar dispositivos de red formando lo que se conoce como redes LAN (*Local Area Network*). En el segundo nivel se halla la capa de control, aquí se ubica el controlador SDN, que es el encargado de dirigir el tráfico de la red, por medio de software o APIs (*Application Programming Interfaces*). En el tercer nivel se ubica la capa de aplicación donde se alojan programas o servicios para gestionar la red, tales como los *Firewall*, que son dispositivos de seguridad los cuales sirven para permitir o bloquear tráfico de red, los *Load Balancer*, que es una tecnología para distribuir las cargas de trabajo y de esa manera optimizar el funcionamiento de la red, o por ejemplo los servicios de QoS (*Quality of service*), que son responsables de la calidad del servicio, que permiten priorizar cierto tráfico de datos. [10].

Para ilustrar lo mencionado anteriormente se confecciona la figura 2, donde se observa una comparación entre una arquitectura tradicional y una arquitectura SDN.

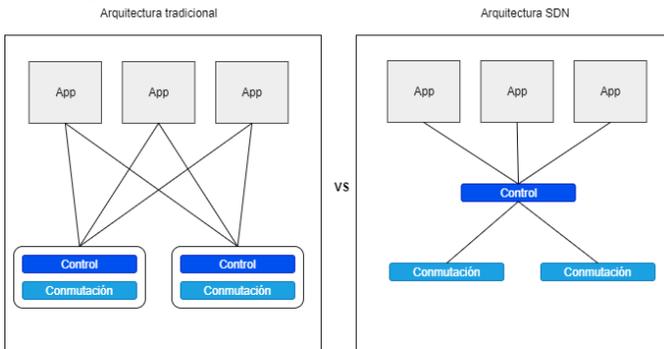


Figura 2: Comparativa de arquitectura de red tradicional y SDN. [11]

La implementación de una red en una empresa no es una tarea sencilla, ya que conlleva distintos puntos por tomar en cuenta, ya sea esta una instalación tradicional o mediante definidas por software, por ejemplo, siempre se va a utilizar *hardware* tradicional de telecomunicaciones como lo son: *Switches*, *Routers*, cableado y las computadoras donde monitorea la red, pero además de lo que normalmente se utiliza también se debe tomar en cuenta la parte de software, donde regularmente se usa un sistema operativo, ya sea Windows o Linux, además del software de trabajo que puede ser: *OpenDaylight*, *VirtualBox*, *Elastix* u otros [12].

Es importante tomar en cuenta las personas a cargo de la administración de la red, ellos le dan el mantenimiento debido a la red y si surge algún problema con ella son los que la solucionan, ellos al ser un servicio de subcontratación tendrán un costo extra por el mantenimiento, hablando de \$50 la hora cada especialista de redes SDN [13]. Otro aspecto importante es el hecho del servicio de internet ya que este tiene diferentes planes con distintos precios, pero para tener una buena conexión a internet y no encarecer tanta implementación se escogió un plan intermedio de 100 megas en fibra óptica, la empresa escogida es Kólbi con sus planes especializados para PYMES, este tiene un costo mensual de \$62,57 [14].

Una de las partes más importantes de una red, ya sea tradicional o SDN es el *hardware* que se utilizará para la creación de esta, empezando por los diferentes tipos de *switches* y *routers* necesarios, como mínimo es necesario uno de cada uno, por lo cual se escogió el modelo DGS-1210 Series de D-Link a un precio de \$290 [15], y se seleccionó un *router TP-Link Archer A7*, con un valor de \$80 [16].

Por último, se menciona la licencia que se necesita para poder utilizar los programas y lograr administrar las redes mediante este software, la mayoría son de código abierto como lo es *OpenDaylight* y *VirtualBox* de Oracle, por lo cual no habría un costo alguno en esta área.

Realizando la comparación entre el costo de la implementación tradicional y SDN, se puede decir que es más económica la puesta en marcha de la SDN, aunque prácticamente en la instalación de ambos elementos se utilicen los mismos recursos, realizar el monitoreo de las redes virtualmente es sumamente más sencillo y económico que realizarlas físicamente, ya que conlleva menos tiempo, es automatizable, pero no es necesario tener contratado a un especialista en el área para monitorear 24/7 las redes, sino que se contrata la persona cuando se necesite, ya que todo se puede ver y configurar desde los diferentes softwares especiales que se implementaron en la red SDN. La puesta en marcha tradicional suele ser más cara, ya que conlleva más tiempo de implementación, por lo cual se deberán pagar más salarios en subcontrataciones, además que si ocurre alguna falla en la red no existe programa como en la red SDN que nos indique qué es ese error y cómo puede ser solucionado, por lo cual será necesario subcontratar a algún experto, pero esto genera mucho gasto a largo plazo.

Cuando se habla de escalabilidad en redes, se referimos normalmente a cómo puede adaptarse la red a ciertos casos a medida que los usuarios incrementan dentro de esta, es uno de los conceptos más importantes dentro de la creación de redes empresariales. En una red SDN existe mejor escalabilidad, ya que se permite el uso del modelo *OpenFlow* y este separa diferentes acciones de los *routers*, como puede ser el procesamiento del protocolo de puerta de enlace frontera o BGP, y los termina asignando al controlador, el cual ayuda a manejar sobrecargas de usuarios, y problemas que pueden tener algunos dispositivos por falta de recursos [15].

La administración de las redes comparada a como es tradicionalmente en redes definidas por software suele ser más sencilla e intuitiva, gracias al modelo de capas que utiliza la arquitectura SDN, pues en la primera es importante la administración de la red y esta sería la capa de control, que es donde se encuentra el controlador de la red y este se comunica con los dispositivos, y así envía paquetes con las acciones que desee hacer con la red [16].

El cambio a una infraestructura de redes definidas por software va a contribuir a que otras tecnologías que van surgiendo como el internet

de las cosas (IoT) o la quinta generación de redes inalámbricas (5G) se vean favorecidas debido a su arquitectura de red que tiene dentro de sus características la flexibilidad y programabilidad, pero esto facilita la adaptación a cualquier tecnología compatible [17].

El internet de las cosas es una tecnología donde millones de dispositivos tienen conectividad de manera remota a la red con lo cual se puede obtener datos para brindar un servicio inteligente, con lo cual para poder desplegar esta tecnología tiene que contar con una infraestructura de red adecuada para este fin. Este requerimiento sea ha vuelto un dificultad por que las red tradicionales han ido dejando de ser óptimas para desplegar IoT, los protocolos es uno de los problemas de estas redes tradicionales, y es debido a que los protocolos de manejo de datos se basan en tiempos de espera con lo cual no pueden manejar los requisitos que necesita la IoT de forma eficiente y escalable, aspecto que en las SDN sí cubre de manera adecuada aportando además a los usuarios de estos dispositivos la posibilidad de acceder a ellos y controlarlos de forma remota.[18]

Sin embargo, podrían surgir varios problemas o desafíos a la hora de querer hacer una implementación de las redes definidas por software para IoT, aspectos como la arquitectura en la que se están creando las aplicaciones SDN o la confiabilidad de la red son algunos de los factores por tomar en cuenta.[19]

El sector industrial es donde se visualiza un mayor aprovechamiento de esta topología, ya que se espera que las fábricas sean cada vez más “inteligentes”, con lo cual reflejan mejoras en temas de calidad y efectividad de los procesos que realizan, actividades como el monitoreo de procesos, de objetos y maquinaria se podrían realizar de manera más sencilla y eficaz, con este aspecto se pretende que la industria mejore en términos de calidad, productividad y eficiencia del producto [20].

Las redes de quinta generación o 5G es otra de las tecnologías que se beneficiará por la migración de redes tradicionales a redes SDN y que de igual forma que el IoT, aportará mejoras en aspectos como el tráfico de datos de alta velocidad, conectividad, etc. El incorporar las SDN en el 5G, brindará una mejor escalabilidad a esta tecnología, logrando que aspectos como el continuo aumento de usuario o el crecimiento del tráfico de datos en esta red no sea un obstáculo para la expansión de esta tecnología.

Esto hace que se necesite una infraestructura de red capaz de cubrir estas demandas, que cuente con características específicas, como ser topologías flexibles y dinámicas [19], aspectos que se cumplen en las redes SDN y que se podrían aprovechar para impulsar la próxima generación de redes celulares 5G. Sin embargo, si bien es cierto que este tipo de topología es la mejor opción para las redes inalámbricas de la siguiente generación, existen varios problemas que han impedido la implementación de las SDN en las redes 5G, y algunos de los inconvenientes que han surgido es lograr la implementación de esta infraestructura en un entorno que evoluciona muy rápidamente o el de poder proveer de una conectividad inalámbrica que esté al alcance de todo el mundo, ya que esto supondría la necesidad de dispositivos de red con mayor complejidad lo que repercutirá en aspectos de costos [21].

Ya que se ha visto las diferentes tecnologías compatibles con SDN, Se debe de ver los pasos para la implementación de esta arquitectura, y es por eso que se hay que tener claro los elementos que conforman una arquitectura SDN, los protocolos que van a estar definidos mediante software, el equipo de cómputo que va a realizar las funciones de controlador, un lenguaje de programación de alto nivel

que contribuya al establecimiento de las políticas de comunicación, equipos de *switching* y *routing* que soporten protocolos SDN[22].

Para estas tareas se tiene disponible varias herramientas para la implementación. *OpenFlow* es el protocolo principal para las implementaciones de redes SDN; sin embargo existen otras opciones que se podrían tomar en cuenta como lo son: *ForCES*, *SoftRouter*, *LISP*, *PCEP*, *OpFlex*, entre otras.

En aspectos de los lenguajes de programación las SDN tienen el requisito de utilizar estos lenguajes para cumplir dos funciones, la primera de esta para lo que sería software del equipo controlador o NOS (*Net Operative System*), estos están desarrollados en múltiples lenguajes. Están los diseñados en Java como el *ONOS*, *OpenDaylight*, *Beacom* o el Maestro. Este último se está desarrollando para soportar el protocolo de los *switches*(*OpenFlow*). En la definición de políticas es donde aparece otro lenguaje, y que para este propósito encontramos que se ha desarrollado Python como el *Frenetic* que cuentan con dos módulos que funcionan para monitoreo y asignación de políticas, o el Procera, por sus características principales en la asignación de políticas en flujo y enrutamiento basados en hora del día, datos transmitidos, tipo de tráfico, etc. [23].

Si bien se mencionó características y herramientas que brindan ayuda en el tema de las SDN, son solo algunas de varias que existen; sin embargo, se podría utilizar otra aparte de las anteriormente mencionadas. Esto con el fin de explicar un poco el desarrollo e implementación de este nuevo paradigma que marcará el futuro de la arquitectura de las redes de datos.

Otro aspecto que se podría ampliar en futuras investigaciones son los desafíos que se presentan en temas de implementación y entendimiento alrededor de este tipo de redes y la manera en cómo se deben abordadas por parte de los ingenieros y encargados de desarrollo de redes SDN, esto con el fin de simplificar y agilizar la creación de estas redes.

III. METODOLOGÍA

En esta sección se describe el método que se utiliza para el desarrollo de la investigación, que tiene como fin comprender de qué manera las redes distribuidas por software permiten facilitar la implementación y gestión de los recursos informáticos, como también llevar a la práctica por medio de un ejemplo la implementación de una red definida por software, para de esta forma introducir y orientar a las personas con conocimientos básicos en redes sobre el funcionamiento y el alcance de las redes definidas por software, como una solución para hacerles frente a los retos que conllevan las tecnologías disruptivas.

La metodología de investigación se guía con los principios del libro de texto *Metodología de la Investigación*, de Hernández Sampieri *et ál.* [25]. En él se decide utilizar un enfoque cualitativo, y un diseño de investigación de tipo descriptivo, que tiene como objetivo detallar ampliamente cada uno de los elementos de una red definida por software, así como desarrollar cuestionarios para obtener sus ventajas y desventajas con respecto a una arquitectura de red tradicional, y teniendo en cuenta factores de interés como el costo, el nivel de dificultad para la puesta en marcha de esta infraestructura de red, y la relación e importancia con tecnologías emergentes como el *Big Data*, el Internet de las Cosas, las redes de quinta generación móvil, entre otras.

La recolección, el muestreo y el análisis de los datos son procedimientos recurrentes durante toda la investigación, y se plantea seleccionar información de bases de datos académicas como EBSCO y *Google Scholar*, en el idioma inglés y español, con el fin de que toda la información sea amplia y de directorios de ámbito científico. Como criterio de selección se determina utilizar únicamente archivos completos para preservar la integridad de la información que puede ser de diversos tipos como: artículos, revistas, noticias, publicaciones académicas y profesionales, con una fecha de publicación entre los años 2018 y 2021, para salvaguardar que la información obtenida no se encuentre desactualizada. Para el análisis de la información, se exploran los datos y se organizan para describir conceptos, temas, y modelos de manera amplia y detallada, asimismo se elabora un cuestionario para obtener datos puntuales mediante una entrevista, con la finalidad de que la comprensión sea mayor para su interpretación, desarrollo y exposición.

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para la primera parte del análisis de resultados se estudió el caso de éxito en la implementación de tecnología SDN, en la Universidad Estatal de Montana, que se ubica en occidente de los Estados Unidos y cuenta con un total de 16.841 estudiantes. [26]

Los desafíos que presentaba la Universidad Estatal de Montana antes de la implementación SDN, corresponden a tres principales requerimientos que tienen como objetivo mantener la excelencia académica, y brindar mejor experiencia a sus estudiantes. Uno de los principales retos era el de transmitir grandes cantidades de datos de forma segura y rápida, sin afectar a otros usuarios o al rendimiento de la red. El segundo desafío era que independientemente de la ubicación del campus, los estudiantes tuvieran una experiencia constante que cumpliera con los requisitos de investigación. Y, por último, el equipo de TI (Tecnologías de Información), necesitaba simplificar la administración, las actualizaciones y el mejoramiento y modernización de la infraestructura de red, sin agregar más personal técnico. [27]

La solución escogida por los expertos se le conoce como *Cisco Software Defined Access*, construido sobre la red digital de *Cisco*. Es una tecnología que se adapta a los cambios tecnológicos y sus requerimientos, ayuda a los encargados de TI a mantenerse al día con las crecientes demandas de la red como lo es la expansión del negocio; en redes e informática a esto se le conoce con el término de escalabilidad, la cual es una propiedad idónea en todo sistema, red, o proceso, la cual tiene la habilidad de reaccionar y adaptarse al crecimiento continuo que se demanda sin perder la calidad, pero esto es posible con la solución de *Cisco*, segmentando la red para un mayor control de seguridad informática, y centralizando la gestión de las políticas de acceso a la red. [28]

Según Gregory Hess, quien es administrador de red de la Universidad Estatal de Montana, tres de los principales resultados que se obtuvieron son la capacidad de integrar las diversas arquitecturas físicas, y esto fue clave para la institución porque la tecnología SDN escogida, es capaz de trabajar con la infraestructura existente, pero no fue necesario cambiar los equipos con los que disponían antes de la implementación, pues también se logró que los usuarios por medio de roles definidos consiguieran el rendimiento de red necesario para acceder a la red, independientemente del lugar desde donde se ingrese al campus, y por último que por medio de un punto de control único se le permitiera al personal de TI una visibilidad completa y un mayor control de la experiencia del usuario, ofreciendo además opciones de escalabilidad a futuro.

Para la solución se adquirieron productos de la marca de *Cisco*, de la familia Catalyst 9000, con controladores DNA (*Digital Network Architecture*), para el mantenimiento, la resolución de problemas y la generación de reportes. Es importante mencionar que la documentación obtenida tiene todos los derechos reservados de *Cisco* y sus afiliados, por lo que se analizó la información expresamente habilitada en el caso de estudio y no se pudo tener acceso a datos de arquitecturas, topologías, parámetros de red, y resultados de pruebas que son de índole privada y confidencial.

Según la información analizada del caso de estudio de la Universidad de Montana, se sintetiza que es básico identificar las principales problemáticas de una arquitectura de red antes de realizar una implementación SDN, y es esencial abarcar cada desafío de manera individual para obtener una solución que cumpla con todos los requerimientos.

También, es fundamental seleccionar un aliado estratégico o proveedor de tecnología robusto que pueda cumplir con las altas exigencias de escalabilidad que supone la expansión de las industrias. Asimismo se destaca lo valioso de una implementación SDN que solventa la problemática en el aumento en el uso de los datos, la transferencia de estos, y la incorporación de cada vez más usuarios a las redes de telecomunicaciones. Para realizar una implementación de una SDN se necesita condiciones mínimas para ejecutar el desarrollo de estas redes, por esta razón y con el fin de emular un ambiente óptimo, se va a utilizar el programa Mininet, que nos va a permitir crear un SDN para observar sus características y cómo se comporta en diferentes pruebas de uso.

Además del programa para esta demostración, también existen más opciones de software que asimismo permiten crear una red emulada. Se escogió Mininet por ser unos programas más conocidos, además por ser de código abierto (*open source*), rápido y que permite crear diferentes topologías de red. [29]

Emuladores de SDN	
Nombre	Descripción
Mininet	Diseñado para permitir la automatización de la red, apoya las interfaces de gestión y protocolos como Netflow, Sflow, SPAN, entre otros. Este código es abierto y gratuito.
OpenFlowJ	Desarrollado por Java, solo contiene una versión del OpenFlow hasta la fecha
Oflib-node	Es una biblioteca de protocolo OpenFlow para el nodo. Convierte los mensajes del protocolo OpenFlow en objetos de JavaScript.
Índigo	Implementación de OpenFlow con código abierto el cual funciona con características similares a Mininet.

Tabla 1: Comparativa de emuladores SDN [Fuente: Elaboración propia]

Al iniciar el Mininet es necesario hacer las configuraciones de los constructores, estos se encargan en crear los parámetros por defecto de

la emulación, y es importante mencionar que la mayoría de las configuraciones de este programa se realizan mediante línea de comandos o CMD, si cuenta con un interfaz para hacerlo, pero es muy básica, así que lo más recomendable es realizar todo el proceso por la línea de comando.

En Mininet existe varios tipos de topologías disponibles para emularlas en las que se encuentran están: lineal, árbol, sencilla o personalizada. Dependiendo de cada una varía la cantidad de *host*, así como sus *switches* y los enlaces en cada uno de ellos.

`sudo mn --topo tree,depth=3,fanout=2`

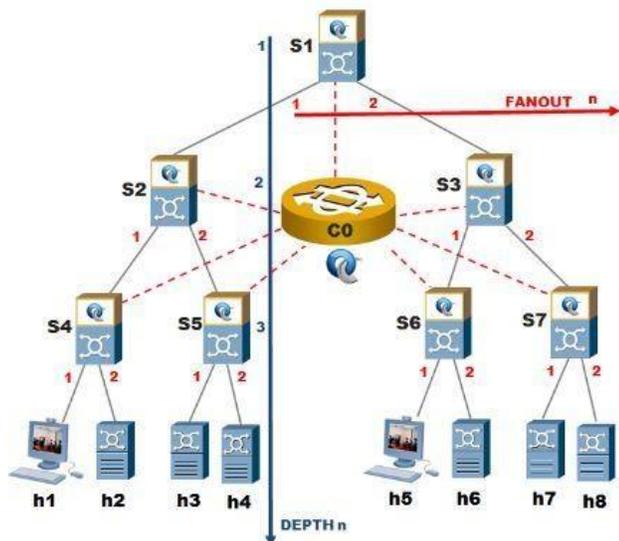


Figura 3: Arquitectura tipo árbol creada en Mininet [29]

Para este caso se va a utilizar una topología de árbol (*Tree*), en el caso de esta estructura de red el programa crear 8 *host* y un total de 7 *switches*. Los comandos para en el programa de emulación este tipo de red serían los siguiente:

```
Mininet> net
H1 h1-eth0: S3-eth1
H2 h2-eth0: s3-eth2
H3 h3-eth0: s4-eth1
H4 h4-eth0: s4-eth2
H5 h5-eth0: s6-eth1
H6 h6-eth0: s6-eth2
H7 h7-eth0: s7-eth1
H8 h8-eth0: s7-eth2
S1 lo: s1-eth1: s2-eth3 s1-eth2: s5-eth3
S2 lo: s2-eth1: s3-eth3 s2-eth2: s4-eth3 s2-eth3: s1-eth1
S3 lo: s3-eth1: h1-eth0 s3-eth2: h2-eth0 s3-eth3: s2-eth1
S4 lo: s4-eth1: h3-eth0 s4-eth2: h4-eth0 s4-eth3: s2-eth2
S5 lo: s5-eth1: s6-eth3 s5-eth2: s7-eth3 s5-eth3: s1-eth2
S6 lo: s6-eth1: h5-eth0 s6-eth2: h6-eth0 s6-eth3: s5-eth1
S7 lo: s7-eth1: h7-eth0 s7-eth2: h8-eth0 s7-eth3: s5-eth2
```

Mininet también posee otra serie de comandos o instrucciones que nos ayuda a la administración y control de la arquitectura de las SDN en este ambiente de prueba, ejemplos de algunas instrucciones podemos mencionar el comando "*switch*" que nos permite visualizar el estado en que se encuentran estos dispositivos, con la instrucción "*link*" de vamos tener la capacidad de comprobar en qué estado se encuentran las interconexiones entre todos los dispositivos asociados a la red y por último el comando "*custom*" que da la posibilidad de

acceder a los archivos de configuración para poder realizar cambios dentro de nuestra red.

Nombre	Descripción
EOF	Finaliza la emulación.
exit	Finaliza la emulación.
quit	Finaliza la emulación.
help	Muestra información.
dump	Información detallada de la red.
net	Información de enlaces.
intfs	Información de interfaces.
nodes	Nodos usados

Tabla 2: Comandos Mininet [Elaboración propia]

Aparte de estos comandos Mininet permite ejecutar otras instrucciones para iniciar la simulación y abrir terminales independientes para cada dispositivo.

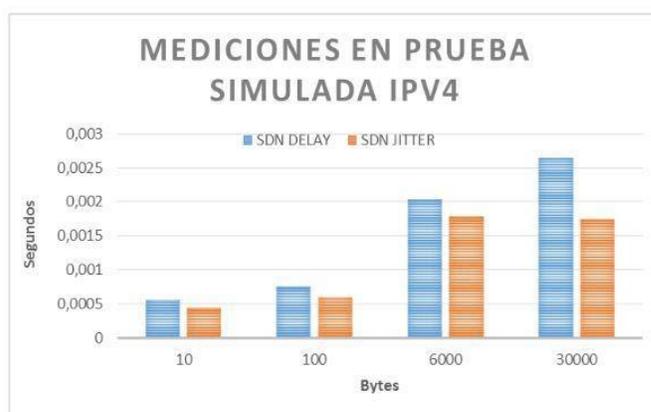


Ilustración 2: Pruebas de *delay* y *jitter* [29]

Dentro de las pruebas que se pueden realizar para comprobar cómo se comportan las SDN en relación con una red tradicional están las mediciones para comprobar la demora (*delay*) y la fluctuación (*jitter*).

En la ilustración #2 se puede observar valores bajos en los dos criterios que se analizaron mediante varias pruebas que se analizaron, por lo que se puede concluir que las redes SDN generan valores de errores bajos en comparación con otros protocolos de red.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como lo expresa la teoría, las redes SDN a diferencia de las tradicionales separan el plano de control y el plano de datos, lo cual beneficia que los dispositivos físicos de red trabajen de una manera más eficiente, esto porque los dispositivos de *hardware* únicamente realizan funciones que corresponden al plano de datos, tales como el procesamiento y reenvío de datos, y los controladores SDN son los encargados de realizar las tareas que corresponden al plano de control, que es donde se toman las decisiones de manera centralizada, lo que permite realizar nuevas implementaciones de una forma más sencilla y rápida. Al mismo tiempo el controlador SDN permite desde su plataforma un mayor control en términos de gestión y monitoreo del tráfico de la red, lo cual simplifica directamente la escalabilidad y administración de las redes, y de esa forma proporciona también la capacidad de responder de manera oportuna a las necesidades y requerimientos de la industria de las telecomunicaciones.

Al analizar el caso de éxito de la Universidad Estatal de Montana en la implementación de tecnología SDN, se identificaron los desafíos y necesidades tecnológicas, tales como transmitir grandes cantidades de datos, tener una experiencia de usuario idónea independientemente del lugar donde se acceda a la red, y además un control más eficiente por parte de los gestores y encargados de la red.

Tras profundizar en el caso, también se determinaron las ventajas que obtuvo la Universidad Estatal de Montana en su implementación de la tecnología SDN, como el ahorro en gastos de capital de inversión ya que no se requirió cambiar los equipos de *hardware* existentes con los que contaban antes de la implementación, esto porque los controladores SDN tienen la capacidad de adaptarse a las redes tradicionales, además tampoco requirió aumentar el recurso humano en el departamento de tecnologías, más bien por el contrario, SDN logró simplificar la administración del tráfico de red, mejorando la utilización de los recursos y de esa forma garantizar un mejor rendimiento en la calidad del servicio tanto desde la óptica del gestor de la red, como desde la perspectiva del usuario final.

Luego del análisis de los resultados, se ha podido llegar a la conclusión de que las redes definidas por software constan de grandes beneficios que permiten potenciar las redes tradicionales en aspectos como escalabilidad y administración de la red, principalmente.

Las redes definidas por software simplifican las implementaciones y el despliegue de nuevos dispositivos a la red, ya que el profesional en telecomunicaciones o el responsable de administrar la red no va a requerir desplazarse a todos los nuevos dispositivos que se incorporen en la red para realizar configuraciones, sino que va a poder realizar todas las funciones necesarias mediante la plataforma centralizada de SDN.

Además SDN permiten un control y gestión más sencillo y rápido de la red, ya que al incorporar una capa inteligente de software en su arquitectura, proporciona un mayor control de los recursos de red, el controlador es capaz de actuar de manera predictiva y proactiva, ya que utiliza la documentación y el registro de actividades de la red para propiciar la toma de decisiones de una manera más ágil, además son capaces de identificar riesgos potenciales por medio del análisis de las actividades en la red, con el objetivo de programar configuraciones o eventos para que trabaje con iniciativa ante incidentes o que la capacidad de respuesta sea mayor ante algún accidente o suceso, y de esta forma es posible garantizar una mejor experiencia de usuario. Luego de las conclusiones del presente proyecto de investigación se menciona una serie de recomendaciones para ahondar en la tecnología SDN.

Es fundamental analizar las exigencias y las necesidades de cada organización, para determinar cuál solución SDN se adecua o adapta mejor con los requerimientos del proyecto por implementar. Es elemental realizar un estudio de factibilidad para determinar si una implementación de SDN brinda beneficios o utilidades en comparación con la inversión de la tecnología.

Es esencial antes de una implementación verificar que los dispositivos de red sean compatibles con el controlador, pues de lo contrario se sugiere actualizar los equipos para que la incorporación de la arquitectura SDN se realice de manera exitosa.

Es conveniente experimentar con herramientas que simulan SDN, como mininet u otras, para el modelado de topologías, la construcción de prototipos, la configuración de parámetros, la programación de

instrucciones, la realización de pruebas, así como la evaluación del rendimiento de la red.

VI. TRABAJOS FUTUROS

En este trabajo de investigación los esfuerzos se han enfocado en temas específicos de importancia para las redes informáticas y de telecomunicaciones, como la escalabilidad y la administración de los recursos de la red, pero como en todo trabajo de investigación siempre surgen temas particulares de interés en los que se puede profundizar, así como incorporar aspectos de mejora y recomendaciones para futuras investigaciones.

Los requerimientos tecnológicos son cada vez más demandantes debido a las tecnologías disruptivas como IoT, Big Data y 5G, por lo que surgen temas para profundizar en la investigación como NFV (*Network Function Virtualization*), que es una plataforma de virtualización para las funciones de red, y complementa a la tecnología SDN para mejorar el rendimiento de la red. Contribuye para además de que el plano de control pueda ser gestionado por software con las SDN, el plano de datos también sea capaz de ser manejado mediante una plataforma de software de NFV.

Las organizaciones y los profesionales en redes informáticas se ven obligados a responder a las exigencias de la industria de las telecomunicaciones, cambiar, adaptar o transformar los diseños y arquitecturas para que las tecnologías emergentes y las que se encuentran en desarrollo, se puedan gestionar de manera más eficiente, por lo que también se propone indagar sobre el uso de DevOps (*Development and Operations*) como una herramienta en alianza de SDN para potenciar el desarrollo de software y las operaciones de TI (Tecnologías de Información), para una adopción más ágil y oportuna de las redes definidas por software.

La incorporación de grupos de enfoque, así como la elaboración de entrevistas son herramientas muy importantes que pueden enriquecer la investigación, permitiendo conocer más experiencias en la implementación de las redes definidas por software.

VII. REFERENCIAS

- [1] Ccoyllo Ingrid, “*Redes definidas por software (SDN)*”, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://informatica.ucm.es/data/cont/media/www/pag103596/transparencias/redes-por-software-SDN.pdf>. [Accedido: 7 octubre 2021].
- [2] SUTEL, “*Estadísticas del sector Costa Rica Telecomunicaciones 2020*”, 1er. ed. digital. San José, Costa Rica, 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.sutel.go.cr/sites/default/files/sutel_informe_estadistico_2020_digital.pdf.
- [3] M.A Pérez Barrera, N.Y Losada Serrato, E. Sánchez Rojas, G.Gaona Mancilla, “*Estado del arte en redes definidas por software (SDN)*,” *Visión Electrónica*, Vol. 13 Issue 1, p17-23, 7p, Jan-Jun2019. [En línea]. Disponible en <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=aci&AN=139204556&lang=es&site=ehost-live>.
- [4] Spera, C., 2021. [online] La.logicalis.com. Available at: <https://www.la.logicalis.com/globalassets/latin->

- america/logicalisnow/revista-20/lnow20-nota-42-45.pdf> [Accessed 19 November 2021].
- [5] Reports.valuates.com. 2021. *Global Software Defined Networking (SDN) Market Size, Status and Forecast 2021-2027*. [online] Available at: <<https://reports.valuates.com/market-reports/QYRE-Auto-22H5992/global-software-defined-networking-sdn>> [Accessed 19 November 2021].
- [6] Kaliyamurthy, N. M. et ál, *Software-Defined Networking: An Evolving Network Architecture—Programmability and Security Perspective*. Security & Communication Networks, 2021, Consultado en: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=aci&AN=150284853&lang=es&site=ehost-live>
- [7] Ian Milligan, *History in the Age of Abundance? How the web is transforming Historical Research*, McGill-Queen's University Press, 2019. Consultado en: https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=2086633&lang=es&site=ehost-live&ebv=EB&ppid=pp_40
- [8] JoAnne Yates & Craig N. Murphy, *Engineering Rules: Global Standard Setting Since 1980*, Johns Hopkins University Press, 2019, Consultado en: https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=1916450&lang=es&site=ehost-live&ebv=EB&ppid=pp_247
- [9] Jocelyn O Palladan, *Computer Networks and Communications*, Arcler Press, 2019, Consultado en: https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=2013882&lang=es&site=ehost-live&ebv=EB&ppid=pp_6
- [10] Assegie, Tsehay Admassu, Pramod Sekharan Nair, *A review on Software Defined Network Security Risks and Challenges*, Telkomnika, 2019, Consultado en: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=138666110&lang=es&site=ehost-live>
- [11] Bayas, O. B. W. *Implementación de una red definida por software que permita brindar servicio de VoIP Seguros*. Revista Universidad y Sociedad. (2021, marzo) Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202021000200389
- [12] Zambrano, L. *Estudio, diseño y costo de una red de telecomunicaciones en una empresa corporativa*. cybertesis. (2014). Recuperado de http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/8595/1/zambrano_tl.pdf
- [13] Carlos Spera, *Software Defined Network: el futuro de las arquitecturas de red*, 2013. Recuperado de: <https://www.la.logicalis.com/globalassets/latin-america/logicalisnow/revista-20/lnow20-nota-42-45.pdf>
- [14] Kolbi. *Personas*. (2021). Recuperado de https://www.kolbi.cr/wps/portal/kolbi_dev/negocios/pymes/actividad/Internetindividual-pymes/internetindividualconfibra!/ut/p/z1/pZDLDoIwEEU_qU
- N5IC6b KqWfHcJpwG4MK9NE0YXx-60uTEREjLOb5Nx5HGRRh-zQX92v7jT0B98v7XJTtomIBUUDZVqxDGq5UZJkWqwhRO0rAFRRYCoXK4Kx1kWE7D95TpbISZ2yIBceMCoGRjkHHppAVsmyPHwoBj_e_w7Y-fEtsvMr8BiYUDwL3B0-gKckUREPUBUaXcY4bYIxMGHx2x_no_HVgZNO3gBmvFLJ/dz/d5/L2dBISEvZ0FBIS9nQSEh/
- [15] dlink. *dgs-1210-series*. (2021). Recuperado de <https://la.dlink.com/la/switches/dgs-1210-series/>
- [16] Tplink. *Archer C7 | Router Gigabit Inalámbrico de Banda Dual AC1750* | TP-Link Iberia. link. (2021). Recuperado de <https://www.tp-link.com/es/home-networking/wifi-router/archer-c7/>
- [17] Vidal, S. *Escalabilidad de Redes Definidas por Software en la Red Académica*. colibri. (2016). Recuperado de <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/19030/1/2529.pdf>
- [18] A. Abdulghaffar, A. Mahmoud, M. Abu-Amara, y T. Sheltami, "Modeling and evaluation of software defined networking based 5G core network architecture", IEEE Access, vol. 9, pp. 10179–10198, undefined 2021.
- [19] S. Bera, S. Misra, y A. V. Vasilakos, "Software-defined networking for internet of things: A survey", IEEE Internet Things J., vol. 4, núm. 6, pp. 1994–2008, 2017.
- [20] Claudio, U. and David, B., 2021. *Software-Defined Networking Solutions, Architecture and Controllers* for the...: EBSCOhost. [online] Web.p.ebscohost.com. Available at:<<https://web.p.ebscohost.com/ehost/detail/detail?vid=6&sid=8bbc5e49f7605dc3%40redis&bdata=Jmxhbm9ZXMmc2l0ZT1laG9zdC1saXZl#AN=153039104&db=a9h>> [Accessed 30 October 2021]
- [21] Subedi, P., Alsadoon, A., Prasad, P., Rehman, S., Giweli, N., Imran, M. and Arif, S., 2021. *Network slicing: a next generation 5G perspective*: EBSCOhost. [online] Web.s.ebscohost.com. Available at:<<https://web.s.ebscohost.com/ehost/detail/detail?vid=0&sid=ab4cc4f6-2fc4-48e0-94c4-7e3cc8bb3737%40redis&bdata=Jmxhbm9ZXMmc2l0ZT1laG9zdC1saXZl#AN=149960349&db=aci>> [Accessed 30 October 2021].
- [22] Hegde, A. and H.Vishalakshi, P., 2021. *Review of State of Art of Software-Defined Networking for 5G*: EBSCOhost. [online] Web.s.ebscohost.com. Available at:<<https://web.s.ebscohost.com/ehost/detail/detail?vid=0&sid=9f62f342b53a-4569-93ba-b642c9f66f95%40redis&bdata=Jmxhbm9ZXMmc2l0ZT1laG9zdC1saXZl#AN=142646262&db=aci>> [Accessed 30 October 2021].
- [23] Romero Gázquez, J. and Bueno Delgado, M., 2021. *Software Architecture Solution Based on SDN for an Industrial IoT Scenario*: EBSCOhost. [online] Web.p.ebscohost.com. Available at:

- <<https://web.p.ebscohost.com/ehost/detail/detail?vid=7&sid=5797dab9ada4-401f-8bbc5e49f7605dc3%40redis&bdata=Jmxhbmc9ZXMmc2l0ZT1laG9zdC1saXZl#AN=132009699&db=aci>> [Accessed 30 October 2021].
- [24] Ramírez Giraldo, M. and López Echeverry, A., 2021. *Redes de datos definidas por software - SDN, arquitectura, componentes y fu...: EBSCOhost*. [online] Web.p.ebscohost.com. Available at: <<https://web.p.ebscohost.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=3&sid=5797dab9-ada4-401f-8bbc-5e49f7605dc3%40redis>> [Accessed 30 October 2021].
- [25] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado y M. P. Baptista Lucio, *Metodología de la investigación*, 6ta ed., McGraw-Hill, Mexico D.F., 2014.
- [26] Montana State University, *About MSU*, 2021, Consultado de: <https://www.montana.edu/>
- [27] Cisco, *Leading Research University Expands Research Networking Capabilities for an Enhanced User Experience*, 2018, Consultado de: https://www.cisco.com/c/dam/m/digital/elq-cmcglobal/OCA/Assets/Education/Montana_State_University_Case_Study.pdf
- [28] Cisco, *Cisco DNA Software for Access: Switching and Wireless Subscription Offers At a Glance*, 2021, Consultado de: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/software/nb-06-dna-swit-wire-subs-aag-ctp-en.html?oid=aagswt026932>
- [29] Cardona Aguirre, J., 2021. [online] Repository.usc.edu.co. Available at: <<https://repository.usc.edu.co/bitstream/handle/20.500.12421/4158/DISE%C3%91O%20DE%20UNA%20GU%C3%8DA?sequence=3&isAllowed=y>> [Accessed 20 November 2021].
- [30] Y. A. M. Muro y F. A. Paliza, “9. Topología árbol en Mininet. Fuente: Autor”, ResearchGate, 08-dic-2016. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Figura-39-Topologia-arbol-en-Mininet-Fuente-Autor_fig7_312187600. [Consultado: 18-dic-2021].