



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Definición de un procedimiento orientado a la evaluación técnica de la arquitectura de red IoT definida por software**

**Jimmy Alexander Vásquez Rodríguez**

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería.

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Computación

Bogotá, Colombia

2022

# **Definición de un procedimiento orientado a la evaluación técnica de la arquitectura de red IoT definida por software**

**Jimmy Alexander Vásquez Rodríguez**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ingeniería de telecomunicaciones**

Directora:

Ph. D. Libia Denisse Cangrejo Aljure

Codirectora:

Ph.D. Tatiana Delgado Fernández

Línea de Investigación:

Redes definidas por software, Internet de las Cosas, Telecomunicaciones

Grupo de Investigación:

ANGeoSc

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería.

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Computación

Bogotá, Colombia

2022

# Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



---

Nombre. Jimmy Alexander Vásquez Rodríguez

Fecha 25/01/2023

## Agradecimientos

El desarrollo de esta tesis de maestría fue un largo camino en el cual encontré muchos compañeros de viaje que aportaron siempre su punto de vista para el desarrollo de este trabajo.

En primer lugar, un especial agradecimiento a mi directora de tesis, Ph.D. Libia Denisse Cangrejo Aljure, persona que con su conocimiento y sabiduría me guio y oriento asertivamente desde el punto de vista científico y académico para llevar a feliz término esta investigación, también el agradecimiento a mi codirectora de tesis, Ph.D. Tatiana Delgado Fernández quien a pesar de la distancia siempre me brindo el tiempo solicitado y sus respuestas oportunas.

Al grupo de investigación ANGeoSc adscrito a la facultad de ingeniería de sistemas e industrial de la Universidad Nacional, los cuales me acogieron como un compañero más apoyándome en la consecución de este logro. Una mención especial a Nestor Manosalva y Andres Castiblanco que con su conocimiento en sus saberes orientaron el desarrollo de trabajo.

A mi familia papá, mamá (Carlos y Susy), mis hijos (Lina Maria, Juan José y Ezequiel David) que son la fuerza impulsora de mi vida.

Finalmente, a mi apoyo más importante Angelita, mi amor, que me ha aportado el ánimo, la perseverancia y la compañía que siempre necesité en muchos momentos de este camino.

Gracias a todos, que con su granito de arena contribuyeron para haber hecho posible este sueño de realizar una maestría y culminar este trabajo de investigación a nivel científico y personal.

# Resumen

## **Definición de un procedimiento orientado a la evaluación técnica de la arquitectura de red IoT definida por software**

De cara al desarrollo alcanzado en los últimos años en el cual paradigmas como Internet de las Cosas plantean retos en diferentes niveles tecnológicos, las redes de datos evolucionaron, haciéndose programables, más autónomas y con la posibilidad de prescindir de infraestructuras de hardware dedicadas. Surgieron así las redes Definidas por Software, SDN's, mostrando beneficios relevantes para el despliegue de diversas soluciones y en particular para entornos IoT.

Los entornos IoT demandan redes, programables, interoperables, escalables, seguras y que garanticen el cumplimiento de estándares de calidad del servicio. Todas estas demandas representan desafíos para las redes de datos, que han sido abordados en modelos de SDN, con la capacidad de gestionar eficientemente la información de los objetos IoT, garantizando aspectos como la seguridad, la calidad en los datos y la interoperabilidad. Por tanto, la idea de desarrollar un procedimiento de evaluación técnica sensible a parámetros técnicos de las arquitecturas IoT es un método que enriquece la toma de estas decisiones.

Esta propuesta provee un procedimiento para la selección estructurada, definido en cuatro etapas, a saber, el análisis conceptual, el modelamiento del método de evaluación técnica, la comparación de los criterios y la validación de las alternativas, procedimiento orientado a la identificación de la mejor solución tecnológica.

**Palabras clave: (SDN-IoT, Redes definidas por software, Internet de las cosas, SDN, Interoperabilidad, Seguridad, QoS)**

# Abstract

## **Definition of a procedure for the technical evaluation of software-defined IoT network architecture.**

In view of the development achieved in recent years in which paradigms such as the Internet of Things pose challenges at different technological levels, data networks have evolved, becoming programmable, more autonomous and with the possibility of dispensing with dedicated hardware infrastructures. Thus, Software Defined Networks, SDNs, emerged, showing relevant benefits for the deployment of various solutions and in particular for IoT environments.

IoT environments demand networks that are programmable, interoperable, scalable, secure and that guarantee compliance with service quality standards. All these demands represent challenges for data networks, which have been addressed in SDN models, with the ability to efficiently manage the information of IoT objects, guaranteeing aspects such as security, data quality and interoperability. Therefore, the idea of developing a technical evaluation procedure sensitive to technical parameters of IoT architectures is a method that enriches the making of these decisions.

This proposal provides a procedure for the structured selection, defined in four stages, namely, the conceptual analysis, the modeling of the technical evaluation method, the comparison of the criteria and the validation of the alternatives, a procedure aimed at identifying the best technological solution.

**Keywords: (Software-defined network, SDN-IoT, SDN, interoperability, security, data quality, QoS, IoT, internet of things)**

Esta tesis de maestría se sustentó el 30 de 11 de 2022 a las 07:00am  
y fue evaluada por los siguientes jurados:

Ingrid Patricia Páez Parra (Msc - Ph.D.)  
Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Computación

Octavio José Salcedo (Msc - Ph.D.)  
Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Computación

# Contenido

PÁG.

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>15</b>
2.1	TITULO.....	15
2.2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
2.3	OBJETIVOS.....	16
	<i>Objetivo general.....</i>	<i>16</i>
	<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>16</i>
2.4	PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	17
2.5	ASPECTOS METODOLÓGICOS.....	17
	<i>Metodología de investigación mixta.....</i>	<i>17</i>
	<i>Metodología de investigación interdisciplinaria .....</i>	<i>18</i>
	<i>Metodología de revisión sistemática de la literatura (SLR) .....</i>	<i>20</i>
	<i>Metodología del proceso analítico jerárquico AHP.....</i>	<i>22</i>
<b>3</b>	<b>ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>28</b>
3.1	REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LA LITERATURA .....	28
	<i>Fase 1: Planeación .....</i>	<i>29</i>
	<i>Fase 2: Conducción o Desarrollo .....</i>	<i>31</i>
	<i>Fase 3: Reporte y análisis de resultados .....</i>	<i>32</i>
	<i>Conclusiones del Análisis de estudios primarios .....</i>	<i>42</i>
3.2	MARCO TEÓRICO .....	46
	<i>Interoperabilidad .....</i>	<i>47</i>
	<i>Internet de las cosas (IoT) .....</i>	<i>48</i>
	<i>Redes definidas por software (SDN).....</i>	<i>51</i>
	<i>Funcionalidades SDN en entornos IoT.....</i>	<i>63</i>
<b>4</b>	<b>PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN TÉCNICA DE UNA RED DEFINIDA POR SOFTWARE PARA ENTORNOS IOT .....</b>	<b>68</b>
4.1	MODELADO DEL MÉTODO AHP EN LA EVALUACIÓN TÉCNICA DE SDN-IOT.....	69
4.2	ANÁLISIS PAREADO DE ALTERNATIVAS.....	82
<b>5</b>	<b>EMULACIÓN DE UNA RED SDN ADAPTADA A UN ENTORNO DE COMUNICACIÓN IOT .....</b>	<b>86</b>
5.1	DEFINICIÓN DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN.....	86
5.2	ESCENARIO SIMULADO SOBRE SDN-WISE .....	88
5.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	93
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>97</b>
6.1	RESULTADOS OBTENIDOS .....	98
6.2	CONCLUSIONES.....	100
6.3	RECOMENDACIONES .....	101





# Lista de figuras

## PÁG.

Figura 1. Fases de la Metodología de Investigación Mixta (Almeida, 2018) .....	18
Figura 2. Metodología para la Investigación Interdisciplinaria (Tobi & Kampen, 2018).....	20
Figura 3. Jerarquía del modelo AHP tomada de (Chica Pedraza, 2012). .....	25
Figura 4. Proceso metodológico aplicado en la revisión sistemática de estudios relacionados a las SDN en entornos IoT .....	29
Figura 5. Proceso de selección de estudios .....	32
Figura 6. Ventana de tiempo y contribuciones realizadas .....	33
Figura 7. Aportes en SDN-IoT.....	34
Figura 8. Bibliometría por base de datos digitales – 2013-2022 .....	35
Figura 9. Zona geográfica de los estudios aceptados .....	37
Figura 10. Detalle de País de origen de los artículos - Período 2013 – 2022 .....	38
Figura 11. Clúster de autores en las SDN-IoT.....	39
Figura 12. Clúster de concurrencia. 2013 - 2022 .....	40
Figura 13. (Fig. 2 de Sikeridis et al., 2017) .....	54
Figura 14. Tomada de (Taherkordi et al., 2018) .....	55
Figura 15. Grafica tomada de software defined networking: State-of-the-art .....	56
Figura 16. Tomada de Chapter 17 - Software-Defined Networking and <i>Open Flow</i> .....	58
Figura 17. Arquitectura SDN tomada de (Kreutz et al., 2015) .....	58
Figura 18. Tabla de controladores SDN, tomada de (Centeno et al., 2014) .....	59
Figura 19. Flujo de comunicación protocolo <i>Open Flow</i> .....	61
Figura 20. <i>Gartner</i> 2021.....	72
Figura 21. Árbol de decisión AHP.....	78
Figura 22. Tabla de decisión .....	84
Figura 23. Creación de la simulación .....	88
Figura 24. simulación parametrizada .....	89
Figura 25. creación de motes .....	89
Figura 26. creación del controlador SDN .....	89
Figura 27. configuración del SDN <i>sink</i> .....	90
Figura 28. configuración de puerto .....	90
Figura 29. Descubrimiento de red .....	90
Figura 30. Red mapeada por el SDN .....	91
Figura 31. Grafica de simulación.....	93
Figura 32. Cambios de enrutamiento .....	94
Figura 33. Análisis de sobrecarga .....	95
Figura 34. Eficiencia calculada .....	96
Figura 35. Reporte de data .....	96

# Lista de tablas

PÁG.

Tabla 1. Valoración directa tomada de (Saaty, 2008c) .....	26
Tabla 2. Índice de consistencia aleatorio (RI) (Saaty, 2008c).....	26
Tabla 3. Preguntas de Investigación para la SLR.....	30
Tabla 4. Categorías conceptuales .....	30
Tabla 5. Ecuación de búsqueda empleada para el análisis de estudios primarios y secundarios .....	30
Tabla 6. Artículos encontrados y seleccionados por librería digital .....	32
Tabla 7. Artículos aceptados en la SRL agrupados por revistas científicas .....	37
Tabla 8. Bases conceptuales .....	40
Tabla 9. Detalle de artículos de emuladores SDN.....	42
Tabla 10. Categorías conceptuales identificadas.....	42
Tabla 11. Relación de bases conceptuales con los artículos aceptados .....	46
Tabla 12. Factores de decisión.....	70
Tabla 13. Criterios de selección .....	71
Tabla 14. Alternativas seleccionadas.....	72
Tabla 15. Matriz de factores .....	79
Tabla 16. Matriz normalizada de factores .....	79
Tabla 17. Consistencia de los factores .....	79
Tabla 18. Ponderación de factores .....	80
Tabla 19. Matriz F. Económico/Criterios .....	80
Tabla 20. Matriz F. Tecnológico/Criterios .....	80
Tabla 21. Matriz F. Infraestructura/Criterios .....	81
Tabla 22. Matriz F. Diseño SDN-IoT/Criterios .....	81
Tabla 23. Tabla de ponderación de criterios .....	81
Tabla 24. Tabla de ponderación de alternativas.....	82
Tabla 25. Tabla de priorización resumida .....	83
Tabla 26. Parámetros de red .....	92
Tabla 27. parámetros de simulación.....	92
Tabla 28. parámetros de energía del nodo.....	92
Tabla 29. Overhead SDN-IoT.....	94

# Lista de siglas

AHC	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
ARP	<i>Address Resolution Protocol</i>
CI	<i>Consistency Index</i>
CoAP	<i>Constrained Application Protocol</i>
CR	<i>Consistency Ratio</i>
DHCP	<i>Dynamic Host Configuration Protocol</i>
FRAND	<i>Fair, reasonable and Non- Discriminatory</i>
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
IAP	<i>Participatory Action Research</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ISP	<i>Internet Service Provider</i>
LaaS	<i>Lighting as a Service</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
M2M	<i>Machine to Machine</i>
MPLS	<i>Multiprotocol Label Switching</i>
MQTT	<i>MQ Telemetry Transport</i>
NFV	<i>Network Function Visualization</i>
NFV	<i>Network Function Virtualization</i>
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
ODL	<i>Open Daylight Project</i>
ONF	<i>Open Networking Foundation</i>
PaaS	<i>Platform as a Service</i>
PICOC	<i>Population, Intervention, Comparison, Outcome, Context</i>
QoS	<i>Quality of Services</i>
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
RI	<i>Random Index</i>
SaaS	<i>Software as a Service</i>
SDN	<i>Software Defined Networking</i>
SLA	<i>Service Level Agreement</i>
SLR	<i>System Literature Review</i>
SLR	<i>Systematic Literature Review</i>
TIC	<i>Information and Communications Technology</i>
VNF	<i>Virtual Network Functions</i>
VPN	<i>Virtual Private Network</i>
VRRP	<i>Virtual Router Redundancy Protocol</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>
WNOS	<i>Wireless Network Operating System</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>
XMPP	<i>Extensible Messaging and Presence Protocol</i>
ZTNA	<i>Zero Trust Security Model</i>

# Introducción

El presente trabajo de investigación se enfoca en el estudio de las redes definidas por software en el entorno de una arquitectura IoT o internet de las cosas por sus siglas en inglés, partiendo de la revisión de la literatura se percibe que desde hace años las redes tradicionales eran la forma de implementar la conectividad de sucursales remotas para entornos institucionales o académicos, en un entorno local de forma inalámbrica o por cobre, para una red de área amplia (WAN) conexiones de fibra óptica o satelitales, lo que permitía que los centros de datos se comunicaran a larga distancia con los usuarios del servicio de red. Sin embargo, a medida que se expandían las organizaciones y crecían el número de ubicaciones había límites físicos en el tiempo y la distancia. Detectando problemas como la interoperabilidad entre múltiples proveedores de servicio e integraciones entre diferentes fabricantes de tecnologías, esto debido a la cobertura y estándares de las redes en sus diferentes países.

Algunos de los problemas en las redes tradicionales incluían cortes en el servicio, congestión en la red y variaciones como el retardo de los paquetes o inconvenientes con los flujos de las aplicaciones haciendo sensible la experiencia al usuario final.

Con las tecnologías SDN, conocidas como redes definidas por software es posible priorizar, caracterizar, el tráfico de cualquier red, aprovechando mejor la mejor ruta, sus capacidades de medio o difusión a niveles inalámbricos; también es posible generar alta disponibilidad del servicio al contar con varios canales de respaldo balanceando y optimizando los recursos de red consumidos hacia nubes públicas. Lo anterior se demuestra como un aspecto crítico en los sistemas que promueven las aplicaciones IoT mejorando la experiencia en sus servicios o aplicaciones tipo streaming, ambientes virtualizados, conexiones remotas, servicios de salud, video en demanda e integraciones con redes industriales, algunas de ellas de baja latencia y otras bastante exigentes en el consumo del ancho de banda.

Las redes definidas por software son diseñadas bajo dos modelos el primero funciona con la premisa de crear una capa de servicio superior al transporte IP (superposición) para todo tipo de tráfico de voz y de datos a través de túneles encapsulado. La otra forma de diseñar la red es separando el plano de datos, del plano del control; estableciendo segmentaciones, políticas de control al tráfico sur-norte y mejorando la transmisión de paquetes de un punto a otro con algoritmos que superan el concepto de reenvío de paquetes como se realiza en una red tradicional.

Esta programación de paquetes permite modificar encabezados IP, tablas de reenvío personalizadas y optimizar el desempeño de una aplicación en particular, apoyado en la separación lógica de los planos definidos que identifica el tráfico Este-Oeste de una red. A su vez el plano de datos se compone de la infraestructura de hardware, puertos, tarjeterías y procesamiento utilizado para la recepción y transmisión de paquetes y este asegura que las soluciones tecnológicas sean compartidas e interoperables entre proveedores y fabricantes, otorgando confiabilidad de la red.

Este documento busca generar un procedimiento de evaluación técnica para una arquitectura definida por software orientada a entornos IoT, construyendo un modelo

conceptual a través del análisis y selección de tecnologías en cada una de sus capas, realizando la descripción técnica de las tecnologías más comúnmente probadas por los investigadores y utilizando un modelo de selección que está sustentado en el sistema de toma de decisiones multicriterio AHP de SAATY con la capacidad de evaluar cualitativamente aspectos puntuales, ventajas y desventajas de cada capa frente a las distintas alternativas contemplada (Saaty, 2008a) s.

Bajo este modelo se tendría una visión general de las necesidades técnicas requeridas para las SDN's y lo que significa la adopción de este tipo de tecnologías con las brechas existentes. Mediante los capítulos posteriores se describen la arquitectura definida por niveles, la elección de los métodos, aplicaciones y necesidades mínimas de la SDN en un entorno IoT.

De manera integral se plantea una descripción de la investigación realizada sobre SDN's en entornos IoT, realizando la revisión sistemática de la literatura que permite identificar el marco teórico, siendo un insumo conceptual para definir el procedimiento de evaluación técnica SDN-IoT propuesto en esta investigación y se finaliza con la validación del procedimiento desarrollado a partir de la evaluación de alternativas tecnologías y la caracterización de una red emulada sobre una herramienta de simulación.

# 1 Descripción de la investigación

## 1.1 Título

*Definición de un procedimiento orientado a la evaluación técnica de la arquitectura de red IoT definida por software.*

## 1.2 Planteamiento del problema

El despliegue que supone el paradigma IoT demanda un estándar que defina protocolos de comunicación entre capas, según Karagiannis et al., 2015 no existe algún estándar definido hasta la fecha. Las reglas o protocolos para definir los estándares IoT requieren favorecer la interoperabilidad entre las tecnologías y fabricantes que permitan hacer frente a los retos que plantean la heterogeneidad en las redes y por consiguiente la información que se proporciona a las aplicaciones (Zhu et al., 2017). Martínez-julia & Skarmeta, 2014 en su artículo del potencial que tienen las SDN sobre internet de las cosas afirma que para que una arquitectura IoT sea eficiente, las redes deben asegurar la heterogeneidad, no solo en los dispositivos, también en el comportamiento de red y los protocolos subyacentes, siendo las redes de datos un punto de inflexión en la adopción de tecnologías como IoT.

En consecuencia, a lo anterior, es necesario definir un procedimiento de evaluación técnica a una SDN sensible con los parámetros de una arquitectura IoT, cuyo análisis permita identificar las funcionalidades y criterios de interoperabilidad, seguridad y calidad en los datos. La construcción rigurosa de este proceso permite identificar las necesidades mínimas de una SDN para IoT (Perera et al., 2016) .

Es importante destacar que las redes IoT permiten controlar y acceder de forma remota a los dispositivos conectados como lo menciona Bera et al., 2017<sup>a</sup>. Las tecnologías de red tradicionales están basadas en tiempo de espera y no son capaces de manejar tales requisitos de IoT de manera eficiente, no son escalables, transparentes o rentables. Con la llegada de las SDN se presenta características que satisfacen a los operadores y usuarios conectados, al tiempo aprovechan la vista global de la red. Se espera que en la próxima década millones de cosas estén conectadas en una gran red, gracias al poderío de las IoT, sin embargo, la cantidad de datos que podrán generar todos estos dispositivos conectados deberán procesarse de manera oportuna y eficiente. En este sentido se necesitan tecnologías apropiadas para distribuir y controlar los flujos de tráfico en la red

que balanceen, provean equilibrio a la carga y reduzcan la latencia de esta. Dichos requisitos son proporcionados por la tecnología SDN (Bera et al., 2017).

Uno de los aspectos básicos en la evolución de las redes de datos es la virtualización de funciones de red, cuya naturaleza programada permite a los dispositivos o hardware de propósito específico realizar múltiples tareas, funcionalidad poco común en las redes tradicionales. Este concepto NFV (funciones virtualizadas de red) se introdujo recientemente en el 2013 y permite que los dispositivos realicen múltiples tareas, mientras cambian su funcionalidad en tiempo real, según los requisitos específicos de la aplicación (Morabito & Jimenez, 2020). Para el paradigma SDN las NFV hacen más eficiente la administración de la red para los operadores ISP jugando un papel muy importante en los proveedores de plataformas o servicios asociados a IoT (Wood et al., 2015).

Para las arquitecturas IoT la utilización de recursos de red se traduce directamente en el consumo de energía de los dispositivos interconectados el cual constituye una debilidad conocida en los servicios de IoT, pues el uso excesivo de recursos de red puede degradar el rendimiento de las aplicaciones, reduciendo así la utilidad de la red, en consecuencia la planificación efectiva de las necesidades del dispositivo es esencial para optimizar la utilización de los recursos y maximizar la utilidad de la red.

Introduciendo las SDN a un sistema IoT, esta tecnología redirecciona el tráfico basado su algoritmo en reglas de transmisión que optimizan el uso de los recursos, dando así reglas de flujo optimizadas a los dispositivos finales IoT dejando el control a la SDN (El-Mougy et al., 2015). Los componentes o funciones más débiles de una arquitectura IoT son la aplicación de parámetros de seguridad y privacidad en los datos. Debido a lo anterior las SDN incluyen mecanismos de control al flujo de los datos, que limiten los ataques, protejan la información, la cifren, apliquen técnicas de enmascaramiento y protejan los dispositivos de posibles ataques que vulneren la seguridad y privacidad de esta información. Esto genera que los costos de inversión sean elevados y la protección de los datos cuenten con un único punto de falla que en caso de verse afectada ocasionaría indisponibilidades en las plataformas IoT, siendo un extremo riesgo en entornos empresariales.

## 1.3 Objetivos

### Objetivo general

El objetivo General de la tesis es definir un procedimiento orientado a la evaluación técnica de la arquitectura de red IoT definida por software.

### Objetivos específicos

- En los protocolos de enrutamiento para las SDN se identificará las especificaciones que satisfacen la interoperabilidad, seguridad y calidad de los datos orientados a entornos IoT.



- Proponer un procedimiento de evaluación técnica a una arquitectura de red IoT definida por software que cumpla con las expectativas en diseño y atributos.
- Validar el procedimiento desarrollado para una arquitectura de red IoT definida por software.

## 1.4 Preguntas de investigación

A continuaciones se declaran las interrogantes que van a intentar resolverse durante la investigación:

- ¿Las redes definidas por software podrían incrementar la interoperabilidad, seguridad y calidad de la información en las arquitecturas de red IoT?
- ¿Cuáles son los parámetros técnicos sensibles de evaluación de una arquitectura de red IoT definida por software?

## 1.5 Aspectos Metodológicos

En el proceso de investigación de este trabajo se introdujeron e integraron dos metodologías globales que abordan las necesidades de investigación de cada componente evaluado, adicional se empleó en la construcción del estado del arte la metodología de SLR por sus siglas en inglés *system literature review* y finalmente en la sección donde se desarrolló el procedimiento se usó la metodología AHP por sus siglas en inglés *Analytic Hierarchy Process* como soporte al proceso de decisión multicriterio.

- Metodología de Investigación Mixta
- Metodología de Investigación Interdisciplinaria (MIR)
- Metodología de revisión sistemática de la literatura (SLR)
- Metodología del proceso analítico jerárquico (AHP)

### Metodología de investigación mixta

Los métodos de investigación mixtos son un enfoque de comparación cualitativo y cuantitativo, desarrollados para superar las limitaciones de metodologías cuantitativas y cualitativas, que permiten al investigador enriquecerse información que no se pudo obtener utilizando cada método por separado y empleados a fin de ampliar la visión del investigador combinando el conocimiento teórico con el práctico acelerando el proceso de consecución de los objetivos (F. Almeida, 2018).

Creswell & Garrett, 2008 afirma que **"La investigación de método mixto es un diseño de investigación en el que el investigador recopila datos cuantitativos y cualitativos, los evalúa e identifica y los combina en un estudio o programa de investigación en varias fases"**. Esta definición es pertinente para el propósito específico de este trabajo. Confirmando que la metodológica mixta se encuentra en la corriente filosófica del pragmatismo, aportando respuestas a las preguntas de investigación, sirviendo como marco para el desarrollo de las investigaciones (Creswell & Garrett, 2008). Una

característica clave de esta metodología está en su pluralismo metodológico o eclecticismo, que con frecuencia da como resultado una investigación superior (en comparación con la investigación mono método) (R. Burke Johnson & Anthony J. Onwuegbuzie, 2004).

El proceso usado por esta metodología se ilustra en la Figura 1 donde F. Almeida, 2018 la descompone en tres fases esenciales.

**Fase preliminar:** se encuentra el punto de partida del estudio y tiene la intención de buscar el proceso de realizar un enfoque de revisión sistemática de la literatura.

**Fase de síntesis:** se realiza las diversas propuestas de diseño de la investigación a través de métodos mixtos y resume estos procesos observando sus similitudes y diferencias.

**Fase de exploración:** se centra en el estudio particular, al interior de esta fase se desarrollan tres operaciones:

- I. El análisis de la evaluación de impacto.
- II. Se identifica los pasos involucrados en cada diseño de investigación.
- III. Se realiza un análisis y discusión de los ventajas y limitaciones asociadas a cada enfoque.

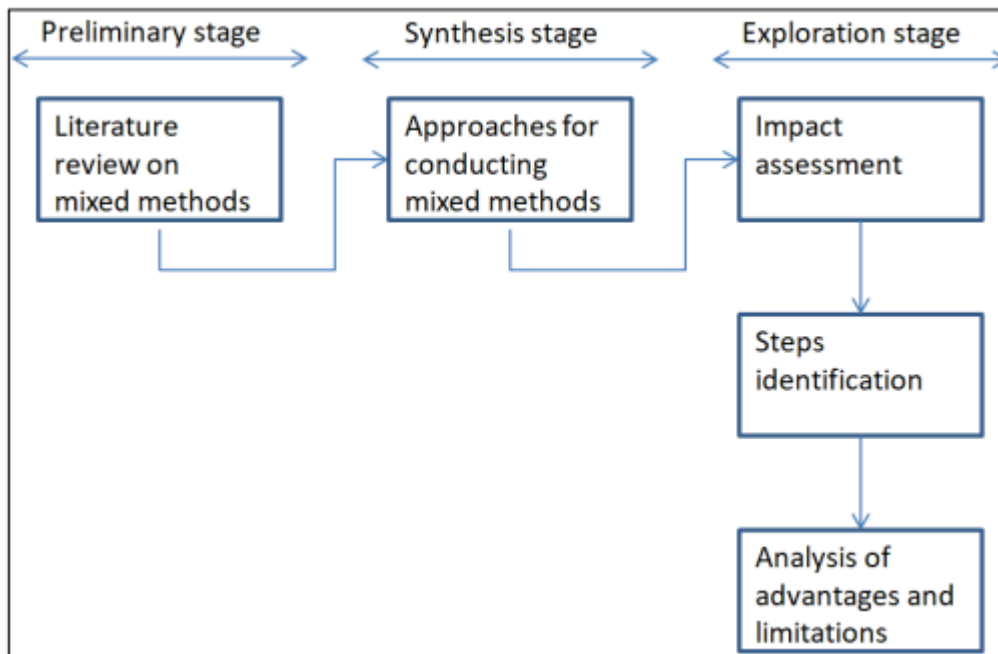


Figura 1. Fases de la Metodología de Investigación Mixta (Almeida, 2018)

## Metodología de investigación interdisciplinaria

Los científicos a nivel mundial en las diferentes disciplinas se enfrentan a desafíos derivados de la formación y sus diferencias de acuerdo con las disímiles áreas de investigación, con ese propósito se desarrolló la metodología interdisciplinaria MIR el cual es un marco de referencia que permite realizar investigaciones a través de los límites de las disciplinas,

especialmente entre las ciencias naturales y sociales. Este marco de referencia es adecuado para proyectos de investigación de diferentes niveles de complejidad, permitiendo combinar una variedad de métodos (estudios de casos, métodos mixtos, etc.). Las diversas etapas del diseño de investigación interdisciplinaria bajo MIR se describen e ilustran con aplicaciones prácticas en la enseñanza y la investigación (H. Tobi & Jarl K. Kampen, 2017).

La estrategia general del enfoque en este proceso metodológico de la investigación, esta se presenta en la Figura 2 propuesta por (H. Tobi & Jarl K. Kampen, 2017), la cual divide las diferentes tareas emprendidas en la investigación en curso, en cuatro etapas:

- Diseño Conceptual
- Diseño Técnico
- Integración
- Ejecución.

En el marco MIR el equipo de investigación debe pensar cuidadosamente en diferentes partes del diseño de su estudio antes de comenzar su ejecución.

**El diseño conceptual:** Es la parte del proceso que aborda el '*por qué*' y el '*qué*' de un proyecto de investigación a nivel conceptual para identificar los objetivos comunes necesarios que requieran una colaboración interdisciplinaria y esto se realiza a través de las actividades de reflexión e intercambio abordados en la lectura y la discusión del asunto. Su resultado se conoce como "marco conceptual", el cual es parte fundamental del objetivo de investigación (H. Tobi & Jarl K. Kampen, 2017).

La aplicación del diseño conceptual de esta investigación se refleja en:

- Definición de Preguntas de Investigación, que son presentadas en la sección 3.1 de este documento.
- Formulación de preguntas generales y específicas de investigación, que están en la sección 1.4
- Análisis de la literatura sobre el cual se soporta el proceso de la investigación y la cual es presentada a lo largo del documento, en particular la revisión de trabajo previo se ubica en la sección 2.1 y la presentación del marco teórico se encuentra en la sección 2.2 del presente documento.

**El diseño técnico:** aborda cuestiones del "cómo, cuándo y dónde será realizada la investigación", el diseño técnico incluye tareas de diseño del estudio, de selección de instrumentos, planes de diseño de muestras, planes de análisis de datos, métodos de recopilación y donde se sintetizan los datos, así como criterios de calidad aceptados para ayudar a cumplir los objetivos del proyecto. El resultado de estas tareas de diseño técnico se puede ver evidenciado en el capítulo 3 con el desarrollo del procedimiento de evaluación técnica de las SDN orientadas a arquitecturas IoT, en este procedimiento se realizan las validaciones y análisis de las funciones mínimas que requiere el instrumento de evaluación para establecer con criterio de calidad un reporte de evaluación técnica de las SDN's.

**Integración y ejecución:** se presenta en el proceso de investigación de métodos mixtos, los dos métodos tanto el método cuantitativo como el cualitativo en el marco MIR

deconstruye los paquetes y datos que son incluidos. La síntesis de los diferentes módulos mono o interdisciplinarios sirve de apoyo sobre la investigación realizada y sobre "los desafíos y posibilidades de integración de enfoques cualitativos y cuantitativos" (M. Fetters & JF. Molina-Azorin, 2017). Las secciones 3.1, 3.2 y el capítulo 4 combina la emulación de una SDN asociando estos análisis,

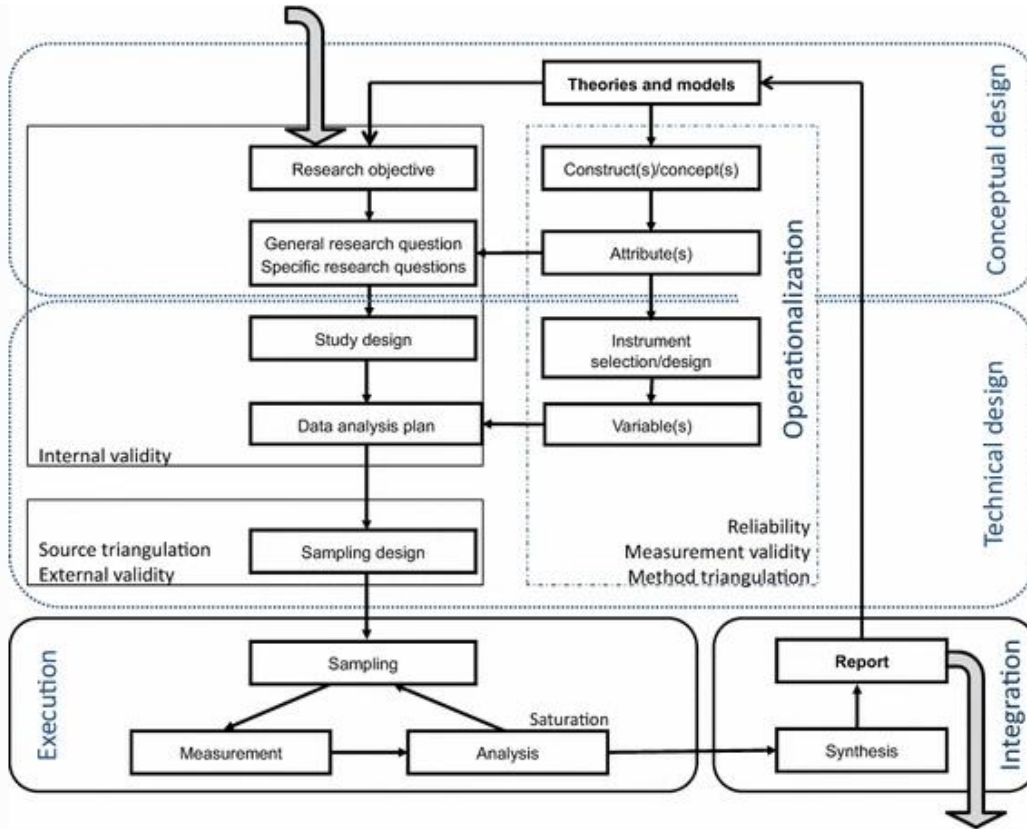


Figura 2. Metodología para la Investigación Interdisciplinaria (Tobi & Kampen, 2018)

## Metodología de revisión sistemática de la literatura (SLR)

Una revisión sistemática de la literatura es un mecanismo para validar y explicar toda investigación que cuenta con variables como una pregunta en particular, área temática o fenómeno de interés.

Este proceso de investigación se asocia a un campo de estudio determinado y establece un proceso sistemático, ecuánime e inexorable que aprueba la evolución temática, los autores referenciales, los diversos análisis orientados a métodos, las metodologías usadas previamente y las tecnologías pertinentemente asociadas en los dominios de la respectiva área del conocimiento.

Para Kitchenham, 2007 la revisión de la literatura debe ser exhaustiva y justa, ésta debe partir de la definición de un protocolo de revisión que especifica la pregunta de investigación donde aborde los métodos que se utilizarán para realizar la revisión.

Este método se basa en una estrategia de búsqueda definida que tiene como objetivo detectar tanta literatura relevante como sea posible, documentando la búsqueda para que los lectores puedan evaluar su rigor, la integridad y repetitividad del proceso teniendo en cuenta que las búsquedas en las bibliotecas digitales son casi imposibles de replicar.

La importancia de este proceso de revisión sistemático minimiza los riesgos existentes en la investigación como lo son los documentos repetidos, la consistencia de los resultados los criterios de selección de inclusión y exclusión explícitos que evalúan cada posible artículo pertinente para la investigación, dando como resultado estudios con criterios de calidad y correctamente evaluados (Kitchenham & Brereton, 2013).

La SLR se constituye de 3 fases, planeación, conducción y reporte.

- **Planeación:** revisión del trabajo previo para identificar y analizar los documentos disponibles desde los estudios primarios que se asocian a las preguntas de investigación, partiendo de las directrices metodológicas propuestas por (Kitchenham & Brereton, 2013). Se apoya en metodología PICOC (Petticrew & Roberts, 2005), con el fin de obtener la pregunta de investigación general para la SLR a través de la determinación de los criterios (Población, Intervención, Comparación, Resultado y Contexto). Con la pregunta general surge la necesidad de establecer sub-preguntas que permitan identificar las palabras clave de la ecuación de búsqueda y a la vez establecer las categorías conceptuales que se presentan en el marco teórico.

Definición de fuentes bibliográficas, para la aplicación de la ecuación de búsqueda se deberá escoger la bases de datos digitales que generen los mejores resultados en el campo de investigación estudiado.

- **Conducción:** Consiste la aplicación de los filtros de criterio necesarios para depurar el consolidado de artículos que será sujeto de análisis y así obtener los resultados. Por tanto, se incluyen aquí los filtros generales por ventana de observación temporal, por tipo de publicación y por idioma en el que fueron publicados los estudios que arrojó la ecuación de búsqueda

La Valoración por Pertinencia es establecer la cantidad de artículos que son seleccionados por su pertinencia y que fueron aceptados una vez se verificaron sus resúmenes y se identificó que aportan al proceso de investigación. Esta actividad deberá arrojar información cuantitativa de los artículos pertinentes.

La evaluación de duplicados es la tarea final de la fase de conducción y consiste en identificar a través de herramientas de apoyo los artículos que se han duplicado a través de un análisis de concurrencia.

- **Reporte:** responde al análisis y resultados que satisfacen las preguntas planteadas en la SLR, así como las conclusiones que arrojan los análisis realizados con relación a la concurrencia, la población, la intervención y los aspectos de interés de la investigación.

## Metodología del proceso analítico jerárquico AHP

El Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process, AHP), propuesto por Saaty en 1980 (Saaty, 2008c), se justifica en la idea de la existencia de la complejidad en un problema de toma de decisión con múltiples criterios y plantea que esta dificultad se resuelve con la jerarquización de los problemas planteados. Esta metodología, puede considerarse como la contribución más importante a niveles operativos, tácticos y estratégicos de los últimos tiempos, pues se ha aprovechado para mejorar el proceso de decisión debido a la gran información que aporta y mejora en el conocimiento del problema. Lo anterior se puede interpretar como una técnica de resolución de problemas multicriterio, una teoría matemática de la medida general aplicada a la influencia de las alternativas de criterios y como una filosofía para abordar la toma de decisiones con alto grado de incertidumbre (J. M. Moreno, 2012).

Este método consiste en proveer un marco de referencia racional y comprensivo para estructurar un problema de decisión, sirve para medir y simbolizar sus elementos y permite relacionarlos con los objetivos generales, buscando evaluar las alternativas de solución. Los interesados en adoptarlo deben tener en cuenta las ideas propuestas por Saaty en su metodología (Saaty, 2008b), estas ideas son sintetizadas por J. M. Moreno, 2012 en su artículo **El proceso analítico jerárquico (AHP), fundamentos, metodologías y aplicaciones**, a continuación, se citan estas ideas:

- *Utiliza jerarquías (en general redes) para formalizar el modelo mental en el modelo estructural asociado. La utilización de jerarquías y redes es algo inherente a las neuronas del cerebro (descomponer un problema complejo en partes más sencillas).*
- *Utiliza conglomerados para integrar lo muy pequeño con lo muy grande. Respondiendo a consideraciones psicológicas (un aspecto esencial en la propuesta del profesor Saaty, es que siempre ha intentado reflejar el comportamiento de los individuos en la realidad), los elementos incluidos en cada conglomerado deben ser del mismo orden de magnitud (los individuos son más precisos al comparar elementos de la misma magnitud), y su número estar acotado por el conocido como número mágico de Miller es decir  $7 \pm 2$ .*
- *Utiliza comparaciones pareadas al incorporar las preferencias de los actores entre elementos. Esta es la forma de incorporar las preferencias (medidas relativas), necesaria trabajar con aspectos intangibles, ha sido extendida al caso de los tangibles.*
- *Utiliza la escala fundamental propuesta por Saaty  $\{1,3,5,7,9\}$  para incorporar los juicios o valoraciones del decisor. Esta escala, estrictamente positiva, permite eliminar las ambigüedades que el ser humano tiene al comparar elementos en la proximidad del cero o del infinito.*

Desde un punto de vista calculista de Saaty, utiliza el método del autovector principal por la derecha para obtener las prioridades locales. Este es el principio de composición jerárquico para calcular las prioridades globales y una forma lineal multiaditiva para obtener las prioridades totales. Además, a diferencia de otras técnicas multicriterio, AHP permite,

dentro del propio proceso de resolución, evaluar analíticamente (matemáticamente) la consistencia del decisor a la hora de emitir los juicios (M. S, 2009).

Las prioridades derivadas vienen dadas en una escala de razón, estas escalas son la única forma de generalizar una teoría de la decisión al caso de dependencia y retroalimentación. En estas escalas están permitidas las multiplicaciones y las adiciones cuando los elementos pertenecen a la misma escala, como sucede con las prioridades.

**Metodología AHP:** como en todos los procesos científicos el proceso analítico jerárquico (AHP), cuenta con una estructura la cual se sustenta en las siguientes fases (Saaty, 2008c):

**Fase 1:** desarrolla el método jerárquico en el cual se dejan representados todos los aspectos relevantes para el proceso AHP, en esta etapa se representan actores, escenarios, factores y elementos por jerarquía, esta debe ser redundante y minimalista. Su construcción supone el aspecto más creativo del proceso AHP (Saaty, 2008c).

**Fase 2:** Incorpora las preferencias de los actores a través de juicios incluidos en las denominadas o matrices de comparación por pares. Esta estructura matemática refleja la dominación relativa de un elemento frente a otro, considerando sus atributos y se interpreta como la comparación de dos elementos tomando como referencia el que posee menor grado de la característica de estudio y se asigna un valor numérico a las veces que es preferido por el atributo estudiado (Saaty, 2008c).

**Fase 3:** priorización y síntesis, tiene como fin proporcionar diferentes prioridades a la resolución del problema. Se entiende como prioridad a la unidad abstracta válida para comparar las preferencias que tienen los aspectos tangibles e intangibles para cualquier individuo, sin tener en cuenta una escala; en el problema de decisión se determinan 3 tipos: (M. del Socorro García, 2009)

- Las prioridades locales: son las prioridades de los elementos asociados a un nodo común.
- Las prioridades globales: son la importancia de esos elementos respecto al objetivo fijado para el problema. La manera de analizar las prioridades globales consiste en aplicar el principio de composición jerárquica; multiplicando los diferentes pesos que aparecen en el recorrido de la jerarquía desde el elemento inferior u hoja hasta la meta.
- La prioridad final o total: es una alternativa y se obtiene agregando las prioridades globales identificadas en los diferentes caminos la asocian con el objetivo. El método habitualmente empleado en AHP para la agregación es igual a la suma ponderada.

**Fase 4:** Consiste en validar la priorización de las alternativas y el grado de sensibilidad del resultado obtenido en una decisión que se modela para un problema.

**Modelamiento AHP:** el proceso de análisis jerárquico multicriterio AHP determina que se requieren 4 pasos para modelar correctamente una decisión evaluada sobre este método, los pasos son los siguientes (Saaty, 2008c):

1. Definición del problema, adopción de la metodología Saaty
  - a. Relacionamiento de datos (AHP)

2. Estructuración del problema, a través de niveles de decisión, estableciendo grupos de criterios
  - a. Creación del árbol de decisión
3. Establecimiento de las prioridades entre los criterios
  - a. Construcción de matrices de comparación para todos los niveles jerárquicos
  - b. Análisis de consistencia
4. Análisis pareado de criterios
  - a. Evaluación de criterios a nivel jerárquico, de superior a inferior
  - b. Obtener pesos en cada nivel
5. Determinación de la mejor alternativa
  - a. Construcción de la matriz de priorización
  - b. Análisis de sensibilidad (opcional)
  - c. Análisis de decisión final y conclusiones de selección de alternativa

A continuación, se describe brevemente las relevancias de cada paso, en caso de requerir ampliar la información y detalle de cada uno de los pasos ver (Saaty, 2008c), (Saaty, 2008b), (Chica Pedraza, 2012), (M. S, 2009), (J. M. Moreno, 2012), (María & Jiménez, 2010) y (OSORIO, 2008).

**Paso1:** El objetivo de este paso es relacionar las metas con el objetivo general y los criterios de selección con el método AHP.

**Paso 2:** El objetivo consiste en estructurar el problema como jerarquía que surja a partir del objetivo general planteado para establecer distintos niveles de complejidad del problema con la finalidad de confirmar un grupo de criterios que puedan desprender subcriterios y en derivar en alternativas planteadas para su decisión. El análisis gráfico debe ser representado como un árbol de decisión el cual se observa a continuación en la Figura 3.



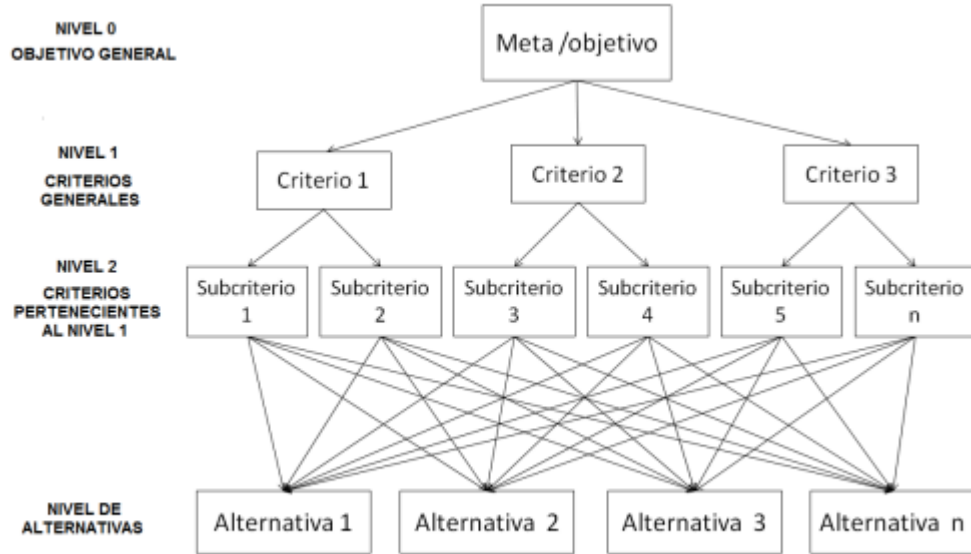


Figura 3. Jerarquía del modelo AHP tomada de (Chica Pedraza, 2012).

**Paso 3:** Establecimiento de las prioridades tiene el objetivo de construir un vector de prioridades o peso que valora la importancia relativa que se asigna a cada criterio. Una consideración para tener en cuenta es la suma de las ponderaciones (vectores de prioridad) finales por cada nivel, ponderando con una unidad de número.

Un mecanismo para definir los criterios es sintetizar los juicios y esto se realiza asignando valores numéricos a cada criterio de acuerdo con el orden de importancia en una escala vertical diseñada por Saaty para la comparación directa de los criterios y para la comparación indirecta de los criterios se utilizan técnicas de comparación simples, de acuerdo con lo anterior como previo a la resolución del problema podemos establecer con este mecanismo la valoración cualitativa de los criterios.

A continuación, se relaciona la escala numérica para la evaluación del criterio relacionado en la Tabla 1 (Saaty, 2008c).

ESCALA NUMÉRICA	ESCALA VERBAL	EXPLICACIÓN
1	Igual importancia	Los dos elementos contribuyen igualmente a la prioridad o criterio
3	Moderadamente más importante un elemento que otro	El juicio y la experiencia previa favorecen un elemento frente al otro
5	Frecuentemente más importante un elemento que otro	El juicio y la experiencia previa favorecen un elemento frente al otro

<b>7</b>	Mucho más fuerte la importancia de un elemento que la del otro	Un elemento domina fuertemente. Su dominación está probada en practica
<b>9</b>	Importancia extrema de un elemento frente al otro	Un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud posible

**Los valores 2, 4, 6 y 8 suelen utilizarse en situaciones intermedias, y las cifras decimales en estudios de gran precisión**

Tabla 1. Valoración directa tomada de (Saaty, 2008c)

Para revisar la consistencia y robustez de los juicios, se debe evaluar si al momento de realizar las comparaciones por pares, surgen contradicciones entre los datos y los criterios, por ejemplo, *al evaluar la comparación entre  $C1 > C2$  y  $C2 > C3$  por lógica se obtiene que  $C1 > C3$  y asignando valores la matriz arroja que  $C3 > C2$  esto hace la evaluación inconsistente. Con el fin de asegurar el proceso y mejorar la consistencia se debe construir una función para medir los juicios, esto se realiza mediante el índice de consistencia. Para obtener el índice de consistencia aleatorio RI, se debe comparar el número de criterios seleccionados con la equivalencia relacionada en la Tabla 2 igual a  $\eta$ . Esta tabla de simulación se obtuvo mediante la simulación de las matrices recíprocas generadas aleatoriamente utilizando la escala de Saaty (1/9, 1/8, . . . , 1, . . . , 8, 9)* (M. S, 2009).

Por ejemplo, si la cantidad de criterios es igual a 4 el índice de consistencia aleatorio sería 0,882.

<b>n</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
<b>RI</b>	0	0	0,525	0,882	1,115	1,252	1,341	1,404	1,452	1,484	1,513	1,535	1,555	1,570	1,583	1,595

Tabla 2. Índice de consistencia aleatorio (RI) (Saaty, 2008c)

*El índice de consistencia aleatoria junto con el índice de consistencia (CI) son necesarios para determinar el ratio de consistencia (CR).*

*El índice de consistencia (CI) se define en la Ecuación I de la siguiente forma* (Chica Pedraza, 2012) y (M. S, 2009).

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

*Ecuación I*

*Habiendo obtenido el RI como el CI, se puede calcular el ratio de consistencia (CR) tal como se muestra en la Ecuación II* (Chica Pedraza, 2012) y (M. S, 2009).

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

*Ecuación II*

Si este cociente vale 0,10 o menos, entonces se acepta la consistencia de la matriz y por tanto el autovector de pesos se admite como válido. Para una matriz  $n=3$  el umbral se fija en 5% y para una matriz  $n=4$  en 10%. Para matrices superiores a  $n = 5$ , si CR es mayor al 10% se debe estudiar de nuevo el problema y revisar los juicios emitidos (Chica Pedraza, 2012).

**Paso 4:** Consiste en la evaluación de criterios y subcriterios, para poder realizar esta tarea se requiere construir las matrices de comparación, donde cada elemento de nivel superior sea comparado con un elemento de un nivel inmediatamente inferior y para cada una de estas comparaciones se deben realizar mínimo las siguientes tareas:

- Obtener la matriz de comparación de criterios
- A partir de la matriz de criterios, sacar la matriz normalizada
- Obtener los pesos por cada criterio

La evaluación de los criterios frente al objetivo general: el método consiste en identificar ¿Qué peso tiene cada criterio para el cumplimiento del objetivo general?

Evaluación de subcriterios frente a criterios: consiste en identificar ¿Qué peso tiene cada subcriterio frente a los criterios seleccionados?

Evaluación de alternativas frente a subcriterios: consiste en identificar ¿Qué peso tiene cada subcriterio para la selección de una alternativa?

**Paso 5:** Este paso consiste en realizar un análisis de los pesos identificados para cada alternativa con el fin de evaluar los resultados arrojados por el método AHP frente al cumplimiento del objetivo general del proceso de selección, se deberá construir una mapa de selección y una tabla de análisis. Lo anterior se realiza calculando la prioridad global en el conjunto de alternativas, identificando una prioridad asociada a un criterio determinado, estableciendo los pesos y determinando cual es la alternativa seleccionada.

Para el análisis de sensibilidad se pueden emplear herramientas de software (*Expert Choice*) que permitan observar la jerarquía del árbol de decisión en el cual se deberán ingresar los pesos obtenidos por el cálculo matemático de comparación pareada, estas herramientas buscan evaluar si existen variaciones en el método. En entornos empresariales este sería la opción ideal para la evaluación de decisiones por AHP, sin embargo, el proceso matemático ejecutado en los pasos anteriores es una alternativa que cumple con la metodología descrita.

## 2 Estado del Arte

Según las definiciones encontradas por Vargas et al. 2015 en su artículo *Una metodología de investigación* afirma que el estado del arte busca rescatar para trascender reflexivamente y su interés primario es lograr la comprensión, para ello construye las fases de inventarios y análisis bibliométricos; que permiten evidenciar el conocimiento y la información que se tiene de un fenómeno hasta el momento con los autores más representativos, coyunturas y finalidades, describiendo la producción documental y las lógicas encontradas. Todo este análisis se realiza a través de herramientas cualitativas y cuantitativas al servicio de la comprensión otorgando el rigor necesario al momento de aportar definiciones conceptuales a los marcos teóricos.

Este enfoque pretende mejorar los avances en los inventarios bibliográficos con el fin de asegurar el estado del conocimiento. Desde esta perspectiva el estado del arte es un “*tipo de evaluación descriptiva; evaluación seria, sistematizada y consistente*” así lo menciona Bojacá Acosta, 2004 en su libro de investigación pedagógica.

Teniendo en cuenta estos enfoques se presenta el capítulo el estado del arte mediante el análisis sistemático de la literatura previa sobre SDN y el marco teórico correspondiente. En la revisión de literatura previa se incluyen la evaluación de arquitecturas y taxonomías de SDN, además de estudios secundarios previos al respecto<sup>1</sup>. Adicionalmente se presenta el marco conceptual.

### 2.1 Revisión sistemática de la literatura

En esta sección se presenta, la revisión de literatura del trabajo previo de las SDN's en entornos IoT (SDN-IoT) con el fin de identificar la forma como ha evolucionado la investigación en las redes definidas por software, las principales contribuciones y los retos vigentes.

La SLR desarrollada contribuye un avance en el conocimiento del paradigma tecnológico SDN y a su vez identifica los límites que acotan la investigación en entornos IoT. Como material previo se abordó la aplicación de las SLR por Souri et al., 2020 y Souza et al., n.d. quienes también realizaron revisiones del trabajo previo enfocadas las SDN y las NFV respectivamente, pero con criterios distintos y objetivos diferentes.

El proceso se ejecutó apoyado las tres fases (Kitchenham, 2007), Planeación, Conducción y Reporte, el cual puede ser visualizado en la Figura 4.

---

<sup>1</sup> Los estudios secundarios previos incluyen *surveys*, revisiones sistemáticas de literatura y *reviews*.



## Proceso metodológico aplicado en la revisión sistemática de estudios relacionados a las SDN en entornos IoT

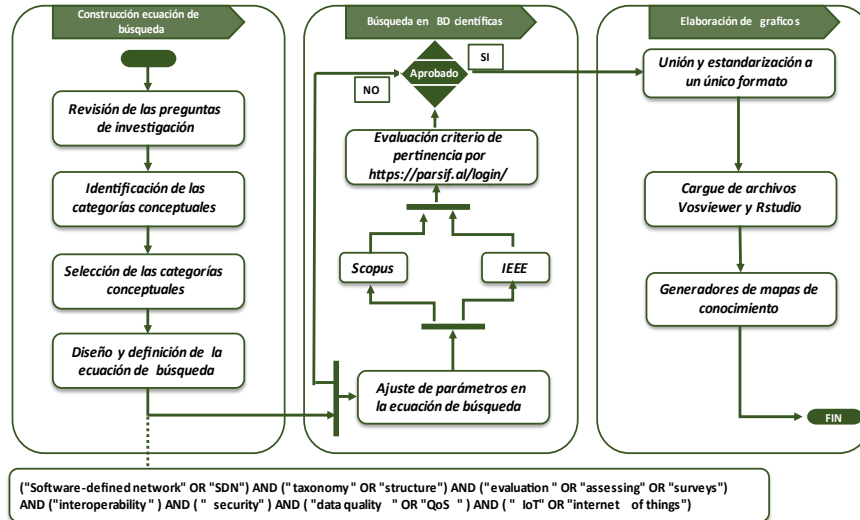


Figura 4. Proceso metodológico aplicado en la revisión sistemática de estudios relacionados a las SDN en entornos IoT

### Fase 1: Planeación

Paso 1: Formulación de preguntas de investigación, aplicando la metodología PICOC se establecen los siguientes aspectos:

- *Population: Software-defined network, SDN*
- *Intervention: taxonomy, topology, structure*
- *Comparison: interoperability, security, data quality, QoS*
- *Context: IoT, internet of things*

La pregunta de investigación general que sustenta la revisión de la literatura, para este trabajo de investigación es la siguiente:

**¿cuáles son los parámetros técnicos sensibles para la evaluación de una arquitectura IoT, que identifique características como la interoperabilidad, seguridad y QoS?**

Se postulan 4 sub-preguntas con el fin de satisfacer las necesidades de la ecuación de búsqueda, en la *Tabla 3* se presentan las preguntas.

#### *Pregunta de investigación principal para la SLR*

*En la tecnología de una red definida por software, ¿cuáles son los parámetros técnicos sensibles para la evaluación de una arquitectura IoT, que identifique características como la interoperabilidad, seguridad y QoS?*

#### *Sub-preguntas específicas*

*Preguntas*

*Motivación*

RQ1. ¿Cuáles son los principales documentos de investigación en el análisis en SDN y su desarrollo entre los años 2013 y 2022?	Identificar los principales autores y redes de autores en el área, en la ventana de tiempo propuesta.
RQ2. ¿En cuál zona geográfica se ha realizado mayor contribución en el área de SDN's y cuáles son los países donde se ha generado mayor producción?	Reconocer cuáles son los países que más aportes han realizado en la ventana de tiempo propuesta.
RQ3. ¿Cuáles de las bases conceptuales utilizadas en la investigación sobre SDN's han permitido validar aspectos como interoperabilidad, seguridad y calidad en los datos?	Identificar mediante un análisis de concurrencia de términos en el resumen de las palabras clave, las categorías conceptuales mínimas en las SDN que apoyan el mejoramiento de la arquitectura IoT.
RQ4. ¿Qué autores han empleado herramientas de emulación para validar las SDN's?	Reconocer trabajos previos que desplieguen o emulen redes definidas por software

**Tabla 3. Preguntas de Investigación para la SLR**

Paso 2: Establecer las palabras clave y ecuación de búsqueda, de acuerdo con PICOC se asociaron 5 categorías conceptuales (ver Tabla 4) la cuales que fueron utilizadas al final de esta sección para clasificar los documentos científicos y académicos de la SLR desarrollada en la investigación:

#### CATEGORIAS CONCEPTUALES

Interoperabilidad
<i>Internet of things</i>
<i>Software-defined network</i>
Seguridad
Calidad del servicio QoS

**Tabla 4. Categorías conceptuales**

La ecuación de búsqueda es definida desde la óptica que arroja las categorías conceptuales y priorizando el cumplimiento de los objetivos propuestos en este trabajo, en la Tabla 5, se presentan los términos o palabras similares que conformaron el conjunto de palabras clave usadas por la comunidad académica para referirse las SDN-IoT y sus funciones de interoperabilidad, seguridad y calidad en los datos, que son componentes claves de la revisión en curso.

CRITERIO	PALABRAS CLAVE	SINÓNIMOS O TÉRMINOS ALTERNATIVOS
POPULATION	<i>Software-defined network, SDN</i>	"SDN", "Redes definidas por software", "SDN-IoT"
INTERVENTION	<i>Taxonomy, Topology, Structure</i>	"architecture" OR "taxonomy" OR "diagram" OR "topology" OR "Structure"
CONTEXT	<i>Internet of things</i>	"IoT" OR "internet of things"

**ECUACIÓN DE BÚSQUEDA:**

**TITLE-ABS-KEY ("SOFTWARE-DEFINED NETWORK" OR "SDN" OR "SDN-IOT") AND ("INTEROPERABILITY") AND ("SECURITY") AND ("DATA QUALITY" OR "QOS")**

**Tabla 5. Ecuación de búsqueda empleada para el análisis de estudios primarios y secundarios**

Paso 3: Definición de fuentes bibliográficas, empleando la ecuación de búsqueda se realiza el proceso automático de búsqueda en las bases de datos digitales. Para este paso

se decidió usar la bases de datos científicas *Scopus*<sup>2</sup> e *IEEE explore*<sup>3</sup>. Estas bases de datos fueron seleccionadas por el nivel de contribuciones realizadas, donde IEEE se encamina a ser la fuente primaria de aportes científicos por su amplio cubrimiento y relevancia en cuanto a volumen de indexación en el mundo de recursos bibliográficos técnicos de ingeniería, así como la propiedad de muchos de los protocolos a nivel de telecomunicaciones, contando con un archivo actual de más de 4 millones de artículos incluidas revistas, normas técnicas, libros y conferencias, en todo el mundo: Cuenta con revistas académicas influyentes y revisadas por pares en los campos de las tecnologías, como las telecomunicaciones, ingeniería, sistemas de programación, manejo de energías, redes inalámbricas, SDN's, seguridad y demás, que brindan mayores posibilidades para encontrar fuentes relevantes en el trabajo de investigación en curso (Biolchini et al., 2005) de igual manera también se optó por *Scopus* que alberga más de 20 000 artículos académicos y 24500 revistas académicas de dominancia científica, siendo una de las plataformas líderes en búsquedas literarias por su alto nivel de aportes científicos.

## Fase 2: Conducción o Desarrollo

Paso 4: consolida los filtros generales aplicados a las bases de datos, estos son la ventana de observación temporal, tipo de publicación e idioma con el fin acotar el consolidado de artículos arrojados por la ecuación de búsqueda.

Paso 5. Valoración por Pertinencia: después de filtrar el gran consolidado resultante son 326 el grupo de contribuciones para llevar a cabo la valoración de pertinencia. Este paso tiene como objetivo realizar una inspección preliminar de los 326 artículos inicialmente aceptados y consiste en un juicio con criterio de pertinencia el *abstract*, las palabras clave y conclusiones son el componente de información a revisar y busca identificar contribuciones poco pertinentes para el problema planteado, así como la reducción de la base de artículos aceptados. Mediante este método se comprobó que la ecuación de búsqueda satisface y respalda el objeto de estudio, aunque una vez realizado esta fase se reduce la cantidad de artículos, aun se presenta incertidumbre con algunos de ellos, para estos casos fue necesario validar más a fondo cada uno de los documentos, evaluando detalladamente su nivel de pertinencia en el cuerpo del artículo.

Como se observa en la Figura 5, el análisis de pertinencia consolido un conjunto de trabajos, y redujo el número de aceptación a 106 artículos de 326 filtrados inicialmente, siendo un proceso manual y riguroso el tiempo que consume esta actividades es prolongado, pero mejora el proceso de selección donde 65 artículos fueron recuperados por *Scopus* y 41 por IEEE. (Ver Tabla 6)

---

2 Disponible en <http://www.scopus.com>

3 Disponible en <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>

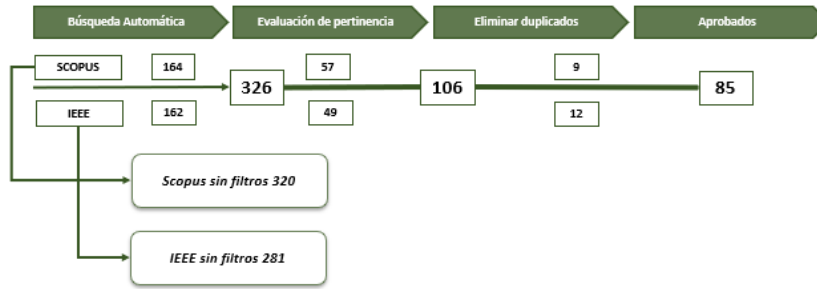


Figura 5. Proceso de selección de estudios

Artículos	Estudios ENCONTRADOS	Porcentaje de estudios ENCONTRADOS	Estudios ACEPTADOS	Porcentaje de estudios ACEPTADOS
Scopus	164	50,31%	56	66%
IEEE	162	49,69%	29	34%
Totales	326	100.0%	85	100.0%

Tabla 6. Artículos encontrados y seleccionados por librería digital

Paso 6. Evaluación de duplicados: a pesar de contar con una base de 106 artículos que son una buena medida para la SLR, esta paso consiste en la depuración de la base obtenida con el criterio de duplicidad. Para este fin se empleó la herramienta *Parsifal* que permite evaluar bases bibliométricas con el fin de identificar las fuentes duplicadas y como comprobación del método PICOC. Una vez se realizó el análisis por la herramienta fueron identificados 21 artículos duplicados, reduciendo la base de 106 contribuciones a 85.

Este procedimiento se realizó descargado y exportando las búsquedas realizadas en formato de citación utilizando los formatos como **.Bib .Tex y .Bibtex** una vez genero el catálogo en los formatos descritos se procedió a importarlos a la base de datos de *Parsifal* y aplicando el método PICOC se establecieron los 85 artículos con criterio de aceptación. La Figura 5, informa el proceso de selección de estudios, que constituye el primer objetivo de esta revisión sistemática en SDN-IoT.

### Fase 3: Reporte y análisis de resultados

Esta fase tiene como objetivo presentar y realizar el análisis de cada uno de los resultados obtenidos bajo la metodología SLR aplicada al estudio de SDN-IoT y el método utilizado para esta fase consiste en responder una a una las sub-preguntas de la SLR. Para la revisión de este trabajo se postularon 4 preguntas registradas en la Fase 1: Planeación en la Tabla 3.

A su vez se hace uso del análisis obtenido en la Fase 2: Conducción o Desarrollo, empleando la ecuación de búsqueda en las bases de datos digitales:



- IEEE explore
- Scopus

Para el análisis bibliométrico y la generación de resultados gráficos se usaron las siguientes herramientas:

- VosViewer<sup>4</sup>
- Parsifal<sup>5</sup>
- Google data studio<sup>6</sup>

## Pregunta RQ1

**RQ1** ¿Cuáles son los principales documentos de investigación en el análisis en SDN y su desarrollo entre los años 2013 y 2022?

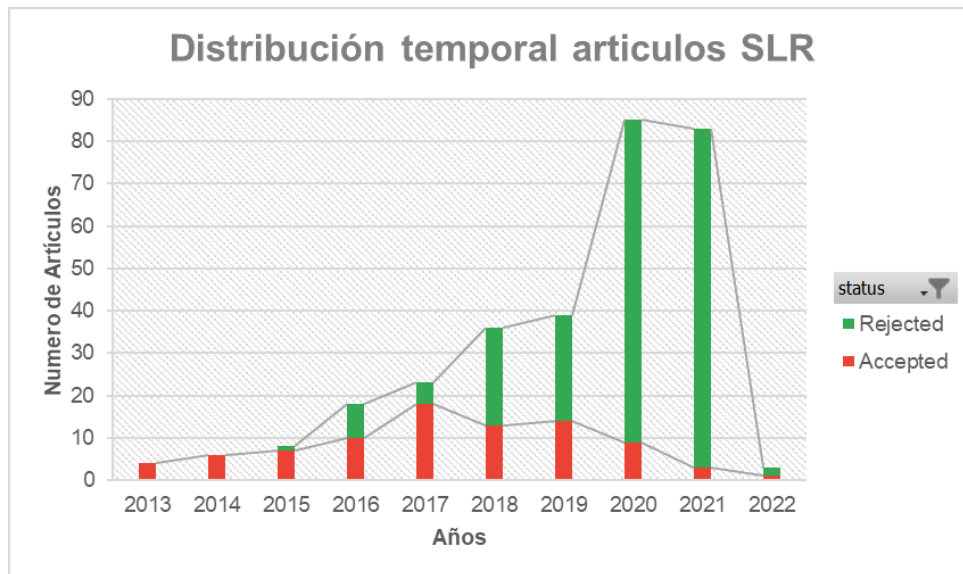


Figura 6. Ventana de tiempo y contribuciones realizadas

Durante los años 2013 a 2021 la comunidad científica del mundo demostró el interés existente en las SDN, las soluciones IoT y sus componentes a nivel de arquitectura, en la Figura 6 se ve reflejado la cantidad de contribuciones realizadas durante estos años, demostrando un máximo de interés durante los años 2020 y 2021. Es comprensible que los investigadores se entusiasmen con estos dos paradigmas, considerando que las SDN para el 2020 ya tienen un grado de madurez medio y son motores de desarrollo en proyectos tecnológicos, algo similar sucede con el IoT donde en los primeros años la

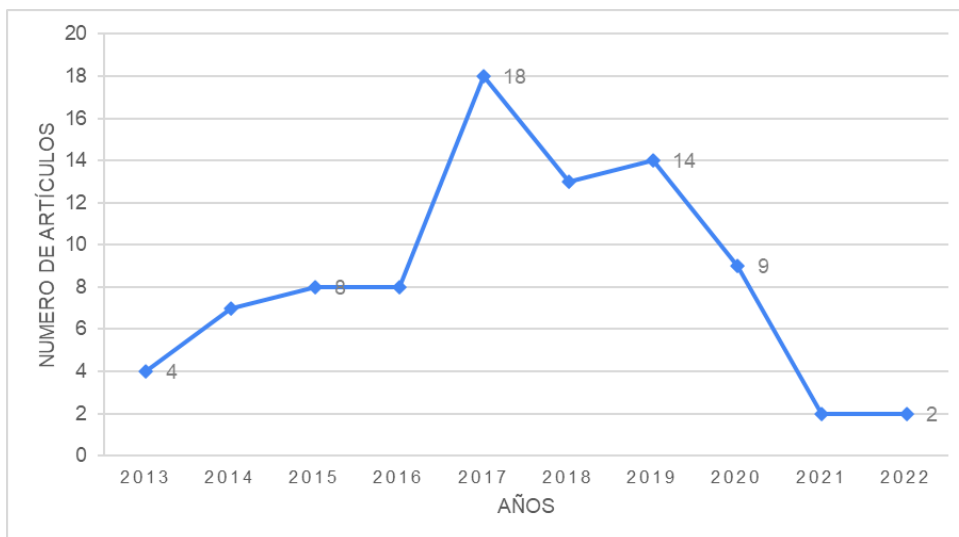
<sup>4</sup> VOSviewer es un software de mapas, que se usa para visualizar redes bibliométricas. Disponible en <http://www.vosviewer.com/>

<sup>5</sup> PARSIFAL aplicación de uso libre, online orientado a apoyar los investigadores en la generación de SLR. Disponible en <https://parsif.al/>.

<sup>6</sup> Google data studio es una herramienta de la suite de Google y se usa para la creación de tableros y análisis de datos. Disponible en <https://datastudio.google.com/u/0/>

exploración de este paradigma era mínima por que aún no explotaba el conocimiento y bondades de sus aplicaciones.

De la distribución temporal de artículos resultante de la SLR se concluye que una gran cantidad de contribuciones rechazadas se identifican durante los años 2018 al 2021 mostrando una coherencia con las tendencias tecnológicas, confirmando que el objeto de investigación pretendido en esta revisión de la literatura fue abordado en periodos anteriores respondiendo el cuestionamiento realizado sobre si las SDN son integrables a los sistemas IoT, de la Figura 6 se puede rescatar analíticamente que la producción científica aceptada para el objetivo de este trabajo fue relevante durante el periodo 2015 al 2019, con una cantidad aproximada de 150 artículos, justificando el periodo durante el que se realizó la propuesta de investigación. Para finalizar en el año 2021 se puede observar de manera precisa que más del 70% de los artículos filtrados no eran pertinentes para esta investigación debido a que se desvían del objetivo trazado.



**Figura 7. Aportes en SDN-IoT**

La Figura 7, representa la línea temporal de comportamiento de las contribuciones pertinentes a los objetivos de la investigación, de ella se sacan 3 conclusiones directas. La primera conclusión es el punto máximo de contribuciones aceptadas fue en el 2017 con un consolidado de 18 artículos. La segunda conclusión refleja la reducción de contribuciones en temas específicos de SDN orientadas a sistemas IoT y la tercera conclusión refleja que la comunidad científica durante los primeros años cultivo el interés de explorar las SDN, probando modelos para el IoT, pero lamentablemente el interés dejó de encaminarse hacia este tipo de soluciones en gran medida por que se comprobó que las SDN debe ser parte de la arquitectura de IoT.

Por último, es posible afirmar por la evolución en la producción académica que las SDN son la nueva generación de las redes de datos y vienen siendo integradas como tecnología a red 5G, LowPan, Zeegbe, Sigfox, que particularmente están siendo probadas para

prestar servicios en entornos IoT, por la flexibilidad que permite el uso de las conexiones inalámbricas.

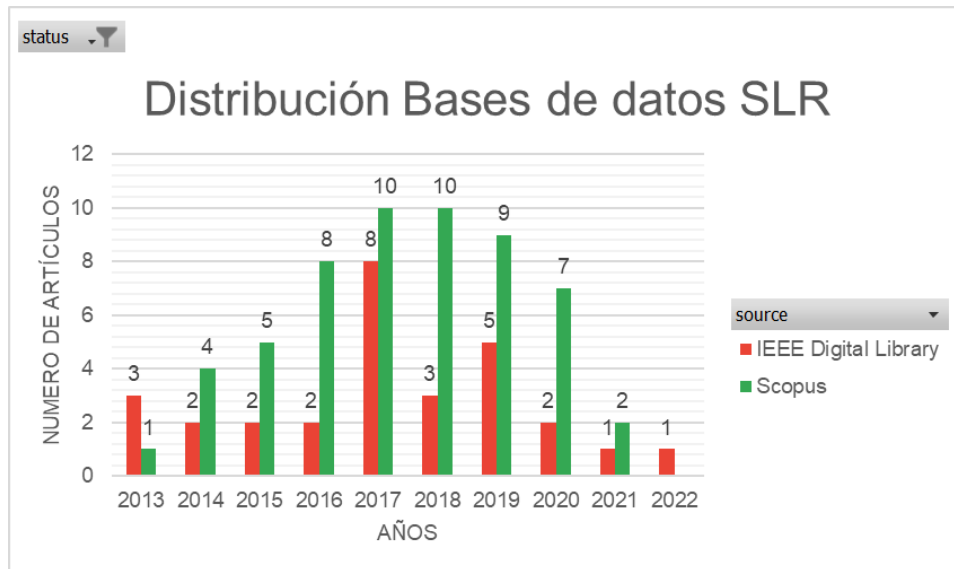


Figura 8. Bibliometría por base de datos digitales – 2013-2022

En la búsqueda y selección los artículos que son pertinentes para la base conceptual del trabajo propuesto se ratificó a la base de datos *Scopus* como la mejor fuente de artículos científicos, particularmente con mayor pertinencia para el objeto de este trabajo, en la Figura 8 se comprueba la anterior afirmación. Caso distinto se evidencia con la base de datos IEEE que se consideraba un fuente de información técnica de ingeniería robusta y durante el proceso de selección de los artículos se concluyó que esta base de datos acepta muchos artículos con poca contribución científica, concluyendo que esto se debe a la gran cantidad de asociados en el mundo a esta base científica.

Otro resultado que se puede apreciar de la gráfica anterior es el nivel de producción científica por año, mostrando un promedio de 4 a 5 artículos en el tema específico de investigaciones, este análisis surge de solo representar gráficamente los artículos que por su peso científico y aporte al desarrollo del procedimiento fueron aceptados dentro de la SLR.

Para terminar el análisis de la primera pregunta se presenta la Tabla 7, esta tabla representa los registros de las publicaciones de impacto para las SDN-IoT. Como análisis general se puede resaltar la agrupación de las revistas IEEE que contribuyen a este trabajo con un total de 29 aportes. Uno de los resultados exigidos por la pregunta de investigación de la SLR, tiene que ver con determinar cuáles son los principales documentos objeto de análisis de investigación. De acuerdo con lo anterior se ve representados los artículos y publicaciones que se encuentran en las bases de datos seleccionadas y que son soporte clave para el diseño de redes SDN orientadas a entornos IoT. Adicional la tabla organiza la producción académica por años visualizando como están agrupadas las contribuciones por las diferentes comunidades académicas.

<b>JOURNALS /PROCEEDINGS CONFERENCE</b>	<b>AÑOS</b>	<b>TOTAL</b>
<b>IEEE International Conference</b>		
Proceedings of the IEEE	2015	1
IEEE/ACM Transactions on Networking	2021	1
IEEE Transactions on Mobile Computing	2016	1
IEEE Transactions on Information Forensics and Security	2017	1
IEEE Transactions on Industrial Informatics	2021	1
IEEE INTERNET OF THINGS JOURNAL	2016, 2017, 2018, 2019, 2020	7
IEEE International Conference (IDAACS)	2019	1
IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)	2015	1
IEEE Communications Surveys and Tutorials	2017, 2018, 2019	4
IEEE Communications Surveys & Tutorials	2014, 2017, 2019	4
IEEE Communications Magazine	2016	1
IEEE Access (Volumen: 5)	2016	1
IEEE Access	2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2022	9
IEEE 8th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC)	2019	1
<b>World Scientific News</b>	2017	1
<b>Universidad politecnica de valencia</b>	2015	1
<b>Universidad Politécnica de Madrid</b>	2015	1
<b>Telecommunications Policy</b>	2017	1
<b>Sensors (Switzerland)</b>	2019, 2020	2
<b>Revista Telem@tica</b>	2014	1
<b>Procedia Computer Science</b>	2016	1
<b>Novel Design and the Applications of Smart-M3 Platform in the Internet of Things: Emerging Research and Opportunities</b>	2017	1
<b>Mobile Networks and Applications</b>	2019	1
<b>Mobile Information Systems</b>	2016	1
<b>Journal of Network and Computer Applications</b>	2017, 2018	2
<b>Journal of Internet Services and Applications</b>	2018	1
<b>Journal of High-Speed Networks</b>	2019	1
<b>Journal of Computational Science</b>	2017	1
<b>International Journal of Electrical and Computer Engineering</b>	2020	1
<b>International Journal of Critical Infrastructure Protection</b>	2019	1
<b>International Journal of Communication Systems</b>	2018, 2020	2
<b>International Conference on Advanced Communication Technology (ICTACT)</b>	2016	1
<b>Intelligent Computing in Data Sciences (ICDS)</b>	2020	1
<b>Information Sciences</b>	2017	1

<b>Future Internet</b>	2018	1
<b>Future Generation Computer Systems</b>	2019	1
<b>Elsevier Inc</b>	2013, 2017	7
<b>Computer Standards and Interfaces</b>	2020	1
<b>Computer Networks</b>	2014, 2016, 2017, 2018, 2019	6
<b>Computer Communications</b>	2014, 2018	3
<b>Computer Communication Review</b>	2015	1
<b>Clúster Computing</b>	2019	1
<b>Ad Hoc Networks</b>	2015, 2017	3
<b>ACM SIGCOMM Computer Communication Review</b>	2013	1
<b>2021 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)</b>	2021	1
<b>2020 Information Communication Technologies Conference (ICTC)</b>	2020	1
<b>2014 IFIP Networking Conference</b>	2014	1

Tabla 7. Artículos aceptados en la SRL agrupados por revistas científicas

## Pregunta RQ2

**RQ2** *¿En cuál zona geográfica se ha realizado mayor contribución en el área de SDN's y cuáles son los países donde se ha generado mayor producción?*

El primer componente de la segunda pregunta de la SLR tiene el objetivo de encontrar las zonas geográficas donde se han realizado contribuciones para las SDN-IoT y en el análisis realizado, mediante los mapas de calor que suministra la aplicación de Google data estudio, se puede visualizar de forma gráfica las zonas de mayor influencia, donde se publicaron los artículos en la ventana de tiempo desde el 2013 al 2022.

En la Figura 9 se evidencia que China es el país de origen con mayor interés y progreso en las contribuciones, Estados Unidos e India lo siguen en el orden de producción. Esta afirmación nos permite asociar que la comunidad científica está trabajando en conjunto con la industria, pues las empresas más grandes de fabricación de equipos de telecomunicaciones se ubican en estas latitudes. Así mismo se observa que en los países europeos existe un interés bajo relacionado con el área de investigación de los estudios.



Figura 9. Zona geográfica de los estudios aceptados

Para contestar el segundo componente de la pregunta se realiza el análisis gráfico de los países con mayor producción, tal como se muestra en la Figura 10 la mayor producción científica se concentra en China, Estados Unidos, India e Italia, evaluando la gráfica particularmente se identifica que la mayor producción de estudios aceptados se realizó en el año 2018 en el país de origen China, por otro lado países como Malasia, Portugal, Francia presentaron contribuciones científicas en el campo de las SDN mostrando interés por parte de investigadores que pueden no estar ligados a la industria de las telecomunicaciones.

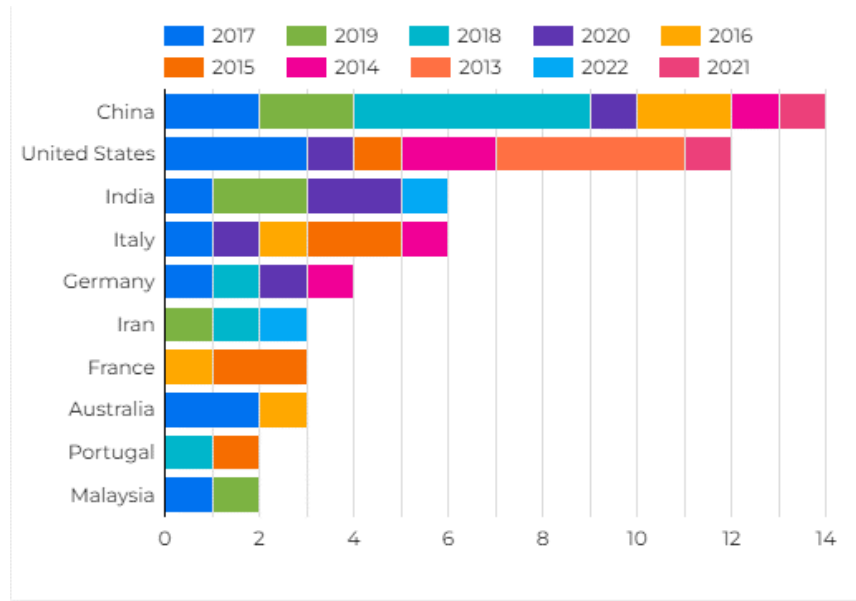
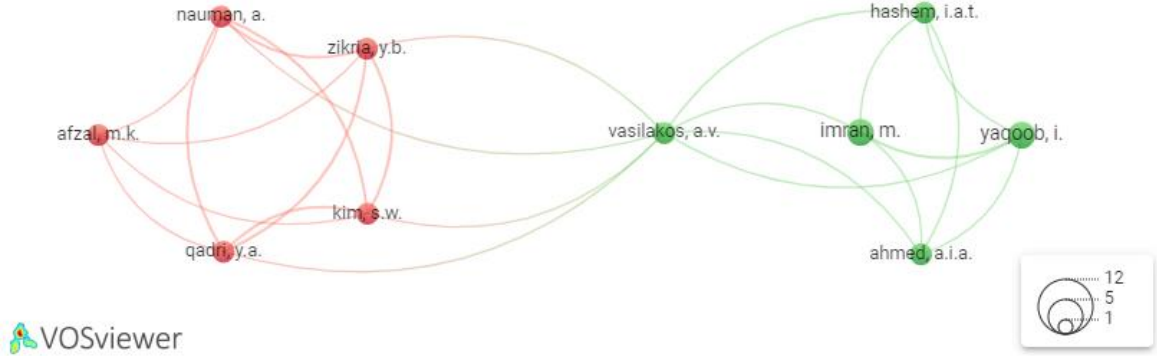


Figura 10. Detalle de País de origen de los artículos - Período 2013 – 2022

### Pregunta RQ3

**RQ3** *¿Cuáles de las bases conceptuales utilizadas en la investigación sobre SDN's han permitido validar aspectos como interoperabilidad, seguridad y calidad en los datos?*

Para la construcción de las bases conceptuales del marco teórico se parte del proceso de identificar a través de la SLR los actores con mayor influencia en la producción científica, esta actividad se realiza a través de herramientas como VosViewer, aplicación orientada a generar los *clúster* de las redes de autores y el tamaño de cada *clúster* se expande a mayor número de referencias asociadas al autor en los diferentes artículos publicados. En la Figura 11 se visualizan 2 grandes *clúster* de autores evidenciando confluencias entre los autores más citados o referenciados sobre los artículos aceptados. El resultado del análisis muestra que Vasilakos, Kim, Zikria, Nauman, Afzal, Qadri, Imram, Hashem, Yaqoob y Ahmed son los autores que han generado las contribuciones más importantes a las bases conceptuales referidas en el marco teórico.



**Figura 11. Clúster de autores en las SDN-IoT**

Mediante la misma herramienta VosViewer se identificó el análisis de concurrencia de las palabras clave sirviendo como soporte a la construcción y análisis de bases conceptuales en las SDN-IoT. Estas bases serán ampliadas el marco teórico y servirán como apoyo conceptual para afianzar el conocimiento del lector en las tecnologías SDN orientadas a IoT, así como en los parámetros sensibles de Interoperabilidad, seguridad y calidad en los datos.

En la Figura 12, se detalla la concurrencia de las palabras con un mecanismo de periodicidad, identificando aquellas que aparecieron al menos 20 veces dentro del conjunto de palabras clave. El primer análisis muestra la relación que existe entre el *clúster* de internet of things y software defined Networks, el segundo análisis se refiere a la relación de influencia entre los conceptos de seguridad, calidad de servicio, virtualización y Big data.

Entre los *clúster* con mayor número de concurrencias se resalta el *clúster* SDN definido con el color rojo, este *clúster* se vincula de manera directa con los diferentes términos de IoT. Para el *clúster* de IoT representado con el color azul se visualiza la importancia que tiene para los autores las líneas futuras de investigación por la relación de influencia que se direcciona hacia términos como QoS y futuras investigaciones. En esta último resultado como una parte importante a nivel conceptual de cualquier solución de IoT se visualiza agrupado en el *clúster* 3 que esta demarcado en color verde el cual permite identificar la confluencia del protocolo *Open Flow*, la virtualización y la seguridad en las SDN sobre arquitecturas IoT.

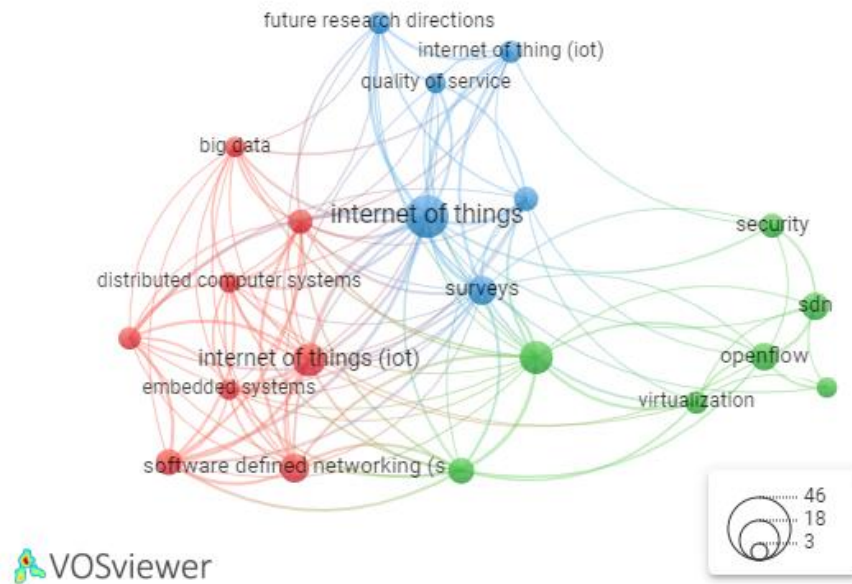


Figura 12. Clúster de concurrencia. 2013 - 2022

Para finalizar en la Figura 12, se visualizan todos los términos de la ecuación de búsqueda aplicada confirmando que las palabras claves seleccionadas agrupaban el conjunto de términos necesarios para encontrar los estudios que fueron aceptados en la revisión de la literatura y sirviendo de base para la determinación de las categorías conceptuales que se muestran en la Tabla 8.

CATEGORIAS CONCEPTUALES
Interoperabilidad en SDN
Internet of Things
Software-Defined Network
Seguridad sobre SDN
Calidad del servicio QoS

Tabla 8. Bases conceptuales

#### Pregunta RQ4

**RQ4** ¿Qué autores han empleado herramientas de emulación para validar las SDN's?

En la Tabla 9, se presenta el detalle de los artículos que abordaron herramientas de emulación de redes definidas por software, algunas de estas asociadas a servicios de internet de las cosas. Las principales herramientas de emulación usadas por las comunidad científica son Mininet y SDN-WISE *design*. Estas herramientas permiten



realizar el despliegue lógico virtualizado de una red SDN que permite identificar el tráfico de red controlado por las tablas de flujo del protocolo *Open Flow*, demostrando que al desacoplar el plano de control en los dispositivos de red es posible modelar el flujo de tráfico mediante tablas y algoritmos definidos por software mejorando el comportamiento de la red para diferentes enfoques. Por ejemplo, para las arquitecturas IoT es necesario mejorar el consumo de energía de los dispositivos que se conectan a la red, también deben incluir parámetros de seguridad a los datos y aplicar calidad en el servicio de esto depende el rendimiento de la red. En síntesis, la comunidad científica apoya algunas de sus investigaciones en este tipo de simulaciones para demostrar sus modelos de investigación propuestos.

Título del Artículo	Autores del artículo	Base de Datos	Año	País de procedencia del artículo	Revista Fuente	Tipo de Artículo
<b>SDN-WISE: Design, prototyping and experimentation of a stateful SDN solution for Wireless Sensor networks</b>	Laura Galluccio; Sebastiano Milardo; Giacomo Morabito; Sergio Palazzo	IEEE Xplore	2015	Italy	(INFOCOM)	Journal
<b>MaxiNet: Distributed emulation of software-defined networks</b>	Philip Wette; Martin Dräxler; Arne Schwabe; Felix Wallaschek; Mohammad Hassan Zahraee	IEEE Xplore	2014	Germany	2014 IFIP Networking Conference	Journal
<b>Control frameworks in network emulation testbeds: A survey</b>	Tsai, P.-W.; Piccialli, F; Tsai, C.-W.; Luo, M.-Y	Scopus	2017	Taiwan	Journal of Computational Science	Journal
<b>CORAL-SDN: A software-defined networking solution for the Internet of Things</b>	Tryfon Theodorou; Lefteris Mamas	IEEE Xplore	2017	Germany	IEEE	Journal
<b>An SDN-Assisted Framework for Optimal Deployment of MapReduce Functions in WSNs</b>	Angelos-Christos G. Anadiotis; Giacomo Morabito; Sergio Palazzo	IEEE Xplore	2015	Italy	IEEE Transactions on Mobile Computing	Journal

<b>A Mininet-based Virtual Testbed for Distributed SDN Development</b>	Bob Lantz; Brian O'Connor	Scopus	2015	United States	ACM SIGCOMM Computer Communication Review	Magazine
--	------------------------------	--------	------	---------------	---	----------

Tabla 9. Detalle de artículos de emuladores SDN

## Conclusiones del Análisis de estudios primarios

Una de las conclusiones sobre los hallazgos encontrados en la revisión sistemática de la literatura aplicada al ramo de las SDN-IoT, responde a los objetivos de la SLR y las cuatro sub-preguntas postuladas resuelven la pregunta de investigación planteada en este trabajo de grado.

Otra conclusión define que a través de la SLR fue posible identificar parámetros en las SDN sensibles a la interoperabilidad, seguridad y calidad de los datos en entornos IoT, en la cual se evidenciaron que son componentes críticos en la evaluación de las SDN, confirmando que es necesario proponer un procedimiento de evaluación técnico que aborde las SDN para casos de uso específicos como el IoT.

Del análisis de concurrencia realizado con las palabras clave que fueron relacionadas la ecuación de búsqueda definida mediante el método PICOC, comprueba con baja desviación que los estudios primarios incluyen la mayor cantidad de términos asociados a la ecuación de búsqueda.

La última conclusión se obtiene del gran consolidado de contribuciones aceptadas para las SDN-IoT, donde fueron seleccionados 85 artículos pertinentes y solo 19 de ellos abordan casos de uso específico en IoT lo que corresponde al 22% de los estudios analizados, también se evidenció que 44 artículos desarrollan la complejidad de las SDN siendo el 52% de los estudios aceptados, a continuación, se presenta en la Tabla 10 con el análisis porcentual de los artículos aceptados con relación a cada categoría conceptual identificada.

<b>CATEGORIAS CONCEPTUALES</b>	<b>N° Estudios</b>	<b>%</b>
Interoperabilidad en SDN	7	8%
Internet de las cosas	9	22%
Redes definidas por software	44	52%
Seguridad sobre SDN	10	12%
Calidad del servicio QoS	5	6%

Tabla 10. Categorías conceptuales identificadas

Como resultado final de la SLR se relaciona la Tabla 11 que muestra el interés que han recibido las bases conceptuales identificadas por parte de la comunidad científica, la inclusión de las SDN en las arquitecturas IoT y cómo se van abordan los requisitos de red en las arquitecturas IoT.

<b>CATEGORÍAS CONCEPTUALES</b>					
<b>ESTUDIOS PRIMARIOS ACEPTADOS</b>	<b>Interoperabilidad en SDN</b>	<b>Internet of Things</b>	<b>Software-Defined Network</b>	<b>Seguridad sobre SDN</b>	<b>Calidad del servicio QoS</b>
do Nascimento, Nathalia Moraes; Carlos Jose, Pereira; (2017)		*			
Abbasi, A A; Abbasi, A A; ; (2018)			*		
Aggarwal, S.; Kumar, N; ; (2019)			*		
Ahmed, A.I.A.; Gani, A.; Hamid, S.H.A.; Abdelmaboud, A.; Syed, H.J.; Habeeb Mohamed; R.A.A., Ali, I; ; (2019)	*				
Ahmed, E; Yaqoob, I; Hashem, I A T; Khan, I; ; (2017)		*			
Alaba; Othman; Hashem; Alotaibi; (2017)		*			
Alvizu, R; Maier, G; Kukreja, N; Pattavina, A; (2017)			*		
Angelos-Christos G. Anadiotis; Giacomo Morabito; Sergio Palazzo; (2015)			*		
Asghari, P.; Rahmani, A.M.; Javadi, H.H.S; ; (2019)		*			
Asghari; Rahmani; Javadi; (2018)					*
Baktir, A C; Ozgovde, A; Ersoy, C;; (2017)			*		
Bello; Zeadally; Badra; (2017)		*			
Bing Xiong; Kun Yang; Jinyuan Zhao; Wei Li; Keqin Li; ; (2016)			*		
Bob Lantz; Brian O'Connor; (2015)			*		
Borgia; Eleonora; (2014)		*			
Bröring, A.; Seeger, J.; Papoutsakis, M.; Fysarakis, K.; Caracalli, A.; (2020)					*
Carolyn J.; Sher DeCusatis; Aparicio; Carranza; (2013)			*		
Casimer; DeCusatis; (2013)			*		

Celal Çeken; Mohammed Al-Hubaishi; (2019)		*			
Centeno, Alejandro García; Manuel, Carlos; Vergel, Rodríguez; (2014)			*		
Chen, B; Wan, J; Shu, L; Li, P; ; (2017)		*			
Chiara Buratti; Andrea Stajkic; Gordana Gardasevic; Sebastiano Milardo; M. Danilo Abrignani; Stefan Mijovic; Giacomo Morabito; Roberto Verdone; (2016)	*				
Cokic, M.; Seskar, I; ; (2019)					*
Čolaković; Hadžialić; (2018)		*			
Darabseh, A; Freris, N M; (2019)		*			
David Andres Serrano; (2015)			*		
Elham Hajian; Mohammad Reza Khayyambashi; Naser Movahhedinia; ; (2022)	*				
Fei, Hu; Qi, Hao; Ke, Bao; (2014)			*		
Gaolei Li; Jun Wu; Jianhua Li; Zhenyu Zhou; Longhua Guo; (2018)					*
Gharaibeh, A.; Salahuddin, M.A.; Hussini, S.J.; Khreishah, A.; Khalil, I.; Guizani, M., Al-Fuqaha, A; (2017)		*			
Hatzivasilis, G.; Fysarakis, K.; Soultatos, O.; Askoxylakis, I.; Papaefstathiou, I.; Demetriou, G; ; (2018)		*			
Hiamnshi Babbar; Shalli Rani; Salman A Alqahtani; ; (2022)		*			
Ivan Farris; Tarik Taleb; Yacine Khettab; Jaeseung Song; (2019)			*		
Jain, V; Yatri, V; Kanchan; (2019)			*		
Kamal, Zeinab; Mohammed, Aldein; Sayed, Elmustafa; Ahmed, Ali; (2017)		*			
Keshav Sood; Shui Yu; Yong Xiang; (2016)	*				
Khan, M.A.; Peters, S.; Sahinel, D.; Pozo-Pardo, F.D.; Dang, X.-T; ; (2018)			*		
Kim Thuat Nguyena; Maryline Laurent; Nouha Oualhaa; (2015)				*	
Korzun; Kashevnik; Balandin; (2017)		*			
Kreutz, D.; Ramos, F.M.V.; Verissimo, P.E.; Rothenberg, C.E.; ; (2015)			*		
Laura Galluccio; Sebastiano Milardo; Giacomo Morabito; Sergio Palazzo; (2015)			*		
Le, N T; Hossain M A; Islam A; Kim D.-Y; (2016)	*				

Maimó, L.F.; Celdrán, A.H.; Perales Gómez; Á.L., García Clemente; F.J., Weimer; J., Lee, I; (2019)				*	
Mališa Vucinic; Bernard Tourancheau; Franck Rousseau; Andrzej Duda; Laurent Damon; Roberto Guizzetti; (2015)				*	
Manare Zerifi; Abdellatif Ezzouhairi; Abdelhak Boulaalam; (2020)			*		
Marsden., C.T.; (2017)		*			
Masayoshi, Kobayashi; Srin, Seetharaman; Guru, Parulkar; Guido, Appenzeller; Joseph, Little ; Johanvan Reijendam; Paul Weissmann; ; (2014)			*		
Moreno, Javier Cano; (2015)			*		
Mouradian, C.; Naboulsi, D.; Yangui, S.; Glioth, R.H.; Morrow, M.J.; Polakos, P.A;; (2018)			*		
Naser, J.I.; Kadhim, A.J.; ; (2020)			*		
Nian Xue; Daojing Guo; Jie Zhang; Jihao Xin; Zhen Li; Xin Huang; (2021)			*		
Nick McKeown; Tom Anderson; Hari Balakrishnan; Guru Parulkar; Larry Peterson; Jennifer Rexford; Scott Shenker; Jonathan Turner; (2013)			*		
Nikos Bizanis; Fernando A. Kuipers; (2016)			*		
Nitin Varyani; Zhi-Li Zhang; David Dai; (2020)					*
Olivier Flauzac; Carlos Gonzalez; Florent Nolot; (2016)			*		
Paul Göransson and Chuck Black and Timothy Culver; (2017)		*	*		
Paul Göransson; Chuck Black; Timothy Culver; (2017)			*		
Peng, Y; Wang, X; Shen, D; Yan, W; ; (2018)			*		
Philip Wette; Martin Dräxler; Arne Schwabe; Felix Wallaschek; Mohammad Hassan Zahraee; (2014)			*		
Rashidi, B; Fung, C; Bertino, E; (2017)				*	
Rehmani, M H; Davy, A; Jennings, B; Assi, C; (2019)	*				
Rohit Kumar Das; Nurzaman Ahmed; Fabiola Hazel Pohrmen; Arnab Kumar Maji; Goutam S; (2020)	*				
Ruslan Kirichek; Andrei Vladyko; Maxim Zakharov; Andrey Koucheryavy; (2016)			*		
Salman, O; Elhadj, I; Chehab, A; Kayssi, A; ; (2018)			*		
Samaresh Bera; Sudip Misra; Athanasios V. Vasilakos; (2017)		*			
Sándor, H; Genge, B; Szántó, Z; Márton, L;; (2019)				*	
Saurav Das; DanTalayco; Rob Sherwood; (2013)			*		

Shiji Zheng; (2019)				*	
Sikandar Ejaz; Zeshan Iqbal; Peer Azmat Shah; Bilal Haider Bukhari; Armughan Ali; Farhan Aadil; (2019)				*	
Souza, R.; Dias, K.; Fernandes, S.; ; (2020)				*	
Srivastava, A; Gupta, S.; Quamara, M.; Chaudhary, P.; Aski, V.J.; (2020)				*	
Taherkordi, A; Zahid, F; Verginadis, Y; Horn, G; (2018)				*	
Tong Xu; Deyun Gao; Ping Dong; Hongke Zhang; Chuan Heng Foh; Han-Chieh Chao; (2017)				*	
Tryfon Theodorou; Lefteris Mamatras; (2017)				*	
Tsai, P.-W.; Piccialli, F; Tsai, C.-W.; Luo, M.-Y; (2017)				*	
Velasquez, K.; Abreu, D.P.; Assis, M.R.M.; Senna, C.; Aranha, D.F.; Bittencourt, L.F.; Laranjeiro, N.; Curado, M.; Vieira, M.; Monteiro, E.; Madeira, E.; (2018)				*	
Xiang Sun; Nirwan Ansari; (2016)				*	
Xiaomin Li; Di Li; Jiafu Wan; Chengliang Liu; Muhammad Imran; (2018)		*			
Xiaoning Zhang; Shui Yu; Ji Zhang; Zhichao Xu; (2019)				*	
Yanbing Liu; Yao Kuang; Yunpeng Xiao; Guangxia Xu; (2018)				*	
Yang Wang; Xiaogang Wei; (2020)				*	
Yosr,Jarraya; Taous,Madi; Mourad,Debbabi ; (2014)				*	
Zhangyu Guan; Lorenzo Bertizzolo; Emrecan Demirors; Tommaso Melodia; ; (2021)				*	
Zunino, C.; Valenzano, A.; Obermaisser, R.; Petersen, S.; ; (2020)				*	

Tabla 11. Relación de bases conceptuales con los artículos aceptados

## 2.2 Marco Teórico

El marco teórico está definido a partir de las bases conceptuales identificadas en la revisión de la literatura, las cuales permiten potenciar la comprensión y dimensionamiento del procedimiento que se va a proponer en este trabajo de investigación.

Abordando la tecnología de las redes definidas por software se hace necesario comprender conceptualmente los componentes de su arquitectura, las mejoras que estos realizan a las redes tradicionales y en el caso específico de esta investigación cómo es posible adoptar las SDN's en el entorno IoT considerando desde el punto de vista teórico los componentes que incrementan la interoperabilidad, la seguridad y la calidad en los datos.

## Interoperabilidad

Por definición la interoperabilidad es *“la capacidad de las organizaciones para intercambiar información y conocimiento en el marco de sus procesos de negocio para interactuar hacia objetivos mutuamente beneficiosos, con el propósito de facilitar la entrega de servicios digitales a ciudadanos, empresas y a otras entidades, mediante el intercambio de datos entre sus sistemas TIC”* (Interoperabilidad - Arquitectura TI, n.d.); en este orden de ideas, un marco de interoperabilidad es un enfoque que sirve de mecanismo para proporcionar servicios de intercambio de información, bajo un conjunto común de características, recomendaciones y esfuerzos regulatorios técnicos que faciliten la interoperabilidad. Para nuestro escenario este esfuerzo está orientado en el dominio técnico, el cual referencia a las aplicaciones e infraestructuras que conectan sistemas de información, servicios de intercambio de información sobre las aplicaciones e Incluye aspectos como especificaciones de hardware, protocolos y estándares de interconexión, servicios de integración de datos.

### Concepto de interoperabilidad en IoT

Actualmente la gestión de servicios de IoT se enfrenta a tres tipos de interoperabilidad; conectividad, semántica y sintáctico. Desde la perspectiva de conectividad se visibiliza la necesidad de permitir la integración sin fisuras y el intercambio de información entre sistemas IoT con diversas capacidades entre los dispositivos, a través de diferentes tecnologías de red. Desde la óptica semántica se trata de la capacidad de interpretar los datos de manera significativa, la incompatibilidad entre los datos derivan en el mayor consumo de recursos y procedimientos operativos, a su vez desde el punto de vista sintáctico se refiere a la relación en el formato y la estructura de los datos, haciendo necesario construir sistemas heterogéneos de IoT que realicen el intercambio de información entre entidades, creando reglas de codificación para la información (A. I. A. Ahmed et al., 2019).

Las soluciones de IoT se construyen utilizando diferentes plataformas de software y se integran a diversos tipos de hardware armando una arquitectura por capas con el único fin de ofrecer servicios y aplicaciones inteligentes mediante la implementación de tecnologías que se encaminan sobre diferentes tipos de protocolos (Ahmed et al., 2019). Hacer de estas arquitecturas escalables e interoperables en la capa de red constituye un reto tecnológico. Este desafío se enfrenta a través de un protocolo de enrutamiento que satisfaga a los sistemas IoT y con las SDN's se logra el objetivo, (Hajian et al., 2022) incluyendo mecanismos de control y balanceo del tráfico de las aplicaciones, así como adicionar características de seguridad y calidad en los datos (R. K. Das et al., 2020). Kumar en el artículo 6LE-SDN propone una arquitectura basada en la integración de las redes LoWPAN y las SDN, lo que él nombra como 6LoWPAN-SDN y consiste en un protocolo diseñado para usar las características de redes inalámbricas de corta distancia, desacoplando el plano de control utilizando controladores SDN con el fin de redefinir las tablas de flujo usadas por *Open Flow* para mejorar la comunicación de los dispositivos IoT con las capas superiores de la arquitectura.

## **Concepto de interoperabilidad en SDN**

Una visión general de cómo se deben abordar las redes para servicios IoT facilitando la interacción entre el mundo físico y humano, brindando una alta importancia a las arquitecturas de redes SDN en entornos IoT se puede observar en (Le et al., 2016). Este documento presenta cómo desacoplan el plano de control, del plano de datos para respaldar la capacidad de programación, adaptabilidad y flexibilidad en la redes, estos aspectos son mínimos y necesarios para soluciones de tipo IoT que requieren redes flexibles y escalables para su correcto desempeño.

Las redes definidas por software son teóricamente idóneas para las arquitecturas IoT ya que simplifican y facilitan el control de las redes en el entorno (Sood et al., 2016), este paradigma es prometedor y novedoso para desarrollar tecnologías IoT en los dominios inalámbricos y ópticos teniendo en cuenta los componentes de seguridad y escalabilidad de la red. La integración de las SDN al IoT simplifica la adquisición de la información, el análisis, la toma de decisiones, el proceso de implementación de red, el despliegue de los servicios y la gestión, acceso y control de los usuarios del sistema IoT, (Sood et al., 2016). En Rehmani et al., 2019 propone el diseño una red SDN para monitorear y administrar las redes eléctricas inteligentes (Smart grid) a nivel mundial, aplicado sobre la infraestructura de la red de energía, controladores SDN y modelando una taxonomía que clasifica y discute las ventajas de SGC basados en SDN y la forma como se optimiza el tráfico red inteligente (SG).

## **Internet de las cosas (IoT)**

Internet de las cosas se define como un ecosistema de comunicaciones entre dispositivos, su objetivo consiste en lograr la interacción eficiente entre las tecnologías de comunicación de los dispositivos que conforman el ecosistema; las comunicaciones M2M garantizan la heterogeneidad y movilidad de los datos, todo a través de protocolos TCP/IP asegurando que la información sea almacenada en centros de datos con el fin de potenciar las aplicaciones que soportan los servicios y apoyen la toma de decisiones. (Bello et al., 2017)

IoT proporciona servicios a las personas dando la posibilidad de conectar cosas u objetos, su premisa central es identificar e interconectar todas las cosas en el mundo construyendo una gran red apoyado en las diferentes tecnologías de comunicación. En general IoT, es un servicio de comunicaciones apoyado en tecnologías inmersas como la computación móvil, RFID, redes inalámbricas de sensores y sistemas integrados, todos ellos definidos y controlados por algoritmos matemáticos, que incorporan metodologías de gestión, almacenamiento y seguridad. (Kamal et al., 2017)

A su vez Borgia, 2014 define las características fundamentales de IoT, describiendo las tecnologías implicadas en su desarrollo, así como las aplicaciones previstas, en él se catalogan conceptualmente las aplicaciones previstas. Además, discute los principales retos que se encuentran en las diferentes áreas de investigación: arquitectura de



comunicación, direccionamiento, descubrimiento, procesamiento de datos, gestión de datos, seguridad y privacidad de los datos, esta documentación conceptual hace parte de los estudios secundarios y es pertinente para la investigación que se realizó, fundamentando la interpretación de los conceptos para el entendimiento de las arquitecturas IoT. (Borgia, 2014)

Alaba et al., 2017 en su estudio *Internet of Things security*, resalta la importancia del paradigma IoT en investigación, debido al interés científico asociado a la comunicación entre los sensores, siendo un punto crítico, la seguridad. Para ello realiza un estudio comparativo de las posibles vulneraciones a la seguridad en IoT. El artículo presenta una revisión completa de las amenazas y vulnerabilidades de seguridad, apoyándose en una clasificación taxonómica, que sirve de insumo para proponer un modelo apoyado en redes definidas por software (SDIoT), con el fin de mejorar y proporcionar una solución básica para las amenazas en la arquitectura de IoT convencional a través del reenvío, almacenamiento de datos y asegurando la data generada por los objetos de IoT.

Network *Neutrality* es un documento regulatorio que aborda todos los aspectos de neutralidad de la red como política de acceso a internet; en este documento se describe la historia de internet desde 1999 ilustrando aspectos de regulación, legislación y política de uso a fin de brindar un enfoque de lo que representa la neutralidad en la red en Europa, Estados Unidos y los países en desarrollo, tema pertinente para el área de investigación y el concepto de internet. El documento ofrece soluciones en el marco de la regulación basadas en la FRAND y la no exclusividad. (Marsden., 2017) En este libro se explica que la neutralidad de la red regula directamente la relación entre los IAP (proveedor de acceso a internet) y los proveedores de contenido, proporcionando reglas sobre cómo los IAP pueden contratar y tratar el tráfico de esos proveedores de contenido y especialmente que no pueden discriminar a ciertos proveedores para beneficios económicos. Este tipo de políticas regulatorias deberán ponerse en uso para la explotación eficiente del IoT en los próximos años, pues sin una regulación clara, el desarrollo de tecnologías en IoT seguirán siendo vulneradas y orientadas hacia las tendencias del mercado. La regulación mundial deberá centrarse en cuatro partes: la regulación específica del sector (competencia / protección del consumidor); educar al público, fomentar una mayor transparencia e incentivos para la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías que potencien la adquisición y adopción de estas para establecer un estándar que el mercado pueda seguir.

Basado en análisis SLR's se obtuvieron documentos pertinentes para la construcción del marco conceptual, por ejemplo, en el desarrollo de servicios orientados y apoyados en IoT se hace necesario encontrar claridad en las funcionalidades habilitantes para este tipo de servicio. Čolaković & Hadžialić, 2018 nos brinda una clasificación de tecnologías habilitadoras de IoT, que sirven como mecanismo para proporcionar una descripción general de las funciones y tecnologías emergentes según sus características, proponiendo una discusión sobre problemas y desafíos abiertos de IoT. Esta solución es adaptable a una arquitectura IoT, cuenta con plataformas de aplicaciones mixtas sobre internet, se encuentren desplegada en nube, integra redes SDN a su arquitectura y opera sobre tecnologías inalámbricas bajo protocolos de IPv4 e IPv6, que incluyen dispositivos de

borde para que se agrupen las redes de sensores locales y los demás subsistemas que constituyen un marco referencial.

Con la gran cantidad de información que se ingresa a una plataforma IoT lo más recomendable es pensar en un modelo de adquisición de datos tipo *BIG DATA*, (E. Ahmed et al., 2017) el cual incluirá técnicas de *machine learning* al procesamiento de los datos a fin de mejorar el uso de los recursos de computación ubicados en la nube, apoyados en tecnologías clave a nivel de software para mejorar la efectividad, calidad e interpretación de la data de IoT (Chen et al., 2017).

Para el transporte de la información desde los equipos de borde hasta la nube se plantea que se empleen tecnologías de red de quinta generación 5G (X. Li et al., 2018), las cuales son soluciones flexibles, eficientes y conscientes de la calidad del servicio y la energía, capaces de dar servicio a numerosos dispositivos heterogéneos, acercando la visión de una economía circular sostenible de los servicios IoT. Hatzivasilis et al., 2018 en su visión de la arquitectura IoT propuesta se encamina a que se incluya una red definida por software que desacople el plano de control, del plano de datos con el fin de segmentar y mejorar la eficiencia en el tráfico de la información, este tipo de modelo emplea controladores SDN's y dispositivos de borde llamados *Gateway IoT* que cuentan con capacidades de cómputo para mantener la información, procesarla e incluso aplicar políticas de servicio con el objetivo de proporcionar una capa de middleware para encapsular unidades y servicios en operaciones de tiempo crítico o entornos altamente dinámicos.(Darabseh & Freris, 2019)

Finalizando algunos modelos incluyen el uso de las tecnologías habilitadoras más importantes en el dominio vertical de los sistemas IoT, definidas como redes WSN (*Wireless Sensor Networks*), las cuales con acopladas a los SDN convirtiéndose en las *WSDN's* que tienen la función de construir las grandes redes de sensores M2M, que requieren los sistemas IoT, usando protocolos de comunicación abiertos de publicación/suscripción, como *MQTT*, *HTTP*, *CoAP* y *XMPP* para el envío de información en tiempo real (Al-Hubaishi, 2019). Los flujos de comunicación serán divididos a través de las tablas de control de flujo que se son editables en el protocolo *Open Flow* sobre los controladores SDN, este protocolo está definido bajo código abierto en el marco Open Mul, el controlador SDN estará interconectado en dirección NORTE-SUR con los dispositivos de red formando nodos WSDN en los cuales cada cierto número de sensores se deberá establecer un nodo controlador que permita validar la ruta de transmisión y la potencia transmitida de los dispositivos M2M inmersos en el sistema IoT (X. Li et al., 2018). Con lo anterior se constata que las redes definidas por software pueden ser orientadas a arquitecturas IoT y sobre ellas se pueden parametrizar, mejorar o desarrollar técnicas que mejoren las funciones de seguridad, calidad en los datos y la interoperabilidad de los sistemas IoT.

## Redes definidas por software (SDN)

El concepto de virtualización en la red está presente desde que se crearon los estándares de red tradicionales y es altamente utilizado en todas las redes. El uso de circuitos virtuales o de dominios de broadcast (VLAN) es una característica básica en algunos tipos de red. La superposición de las redes ha aparecido a medida que las redes fueron creciendo; ambientes como los túneles *VPN*, las *MPLS*, son servicios que brindan los proveedores ISP, todo este tipo de encapsulamiento de tráfico en múltiples servicios que utilizan la misma infraestructura de red fue posible sobre las redes tradicionales (Moreno, 2015).

El término "redes definidas por software (SDN)" fue acuñado desde 2009 en un artículo de MIT Tech Review que nombró a *Open Flow* como una de las 10 principales tecnologías emergentes de la década. (S. Das et al., 2013b) A partir de ese momento las redes definidas por software (SDN) representan un paradigma importante en el desarrollo y evolución de las redes, la idea de una red definida por software consiste en separar la lógica de control de la red de los enrutadores y conmutadores subyacentes, promoviendo la centralización (lógica) del control de la red e introduciendo la capacidad para programar la red (Kreutz et al., 2015). Podemos decir que las redes tradicionales no son fáciles de parametrizar, segmentar o programar y esto pasa por que cada línea de producto cuenta con sus propias configuraciones, hacer interoperable y administrable una red con diferentes fabricantes es una labor compleja que requiere de muchos recursos de ingeniería, tanto a nivel de desarrollo como de servicios profesionales, sin embargo las SDN prometen resolver este problema con ideas clave como la capacidad de programación dinámica, el manejo de tablas de flujo para segmentar el tráfico de red, la lógica de red puede variar sin afectar el comportamiento de la red y solo aislando el segmento de red necesario, con las SDN es posible cerrar la brecha que tenían las redes tradicionales introduciendo conceptos como la escalabilidad, el rendimiento, arquitecturas de seguridad y confiabilidad en las red y todo desde un punto central (Kreutz et al., 2015).

### Antecedentes

La adopción del paradigma SDN se puede implementar en diferentes modalidades, entre ellos esta las redes de acceso LAN, el *core* del *backbone* de un proveedor, los centros de datos, abordando la gestión del tráfico de red de acuerdo con la orientación del servicio. Su capacidad de programación de red mejora por el desacoplamiento de las funciones de control y de reenvío del flujo de tráfico, la gestión de la red se puede realizar de forma independiente a los equipos y en consecuencia reducen la complejidad de conmutación en los dispositivos subyacentes en comparación con las redes tradicionales. Farris et al., 2019 afirma que las redes SDN derivadas dan como resultado un entorno programable más simple, lo que permite que las aplicaciones externas definan el comportamiento de la red. Según *Open Networking Foundation (ONF)*, una fundación sin ánimo de lucro enfocada al desarrollo, estandarización y comercialización de SDN, indica que el modelo de arquitectura SDN se compone de tres capas, a saber, aplicaciones, plano de control y plano de datos (Malcolm Betts, 2014).

Las SDN's surgieron a partir de las redes tradicionales como líneas arrendadas punto a punto (PPP), frame relay y *MPLS*, en la era de las conexiones PPP el objetivo era conectar múltiples redes de área local (LAN) previo a que llegara frame relay y eliminara la necesidad de comprar y administrar enlaces de conexión individuales entre varias ubicaciones. Las redes *MPLS* mejoraron el servicio de red al incorporar funcionalidades como redes de voz, video y datos a la misma red utilizando tecnología basada en protocolo de Internet (IP). Rápidamente hacia los años 2000, la conmutación de etiquetas multiprotocolo (*MPLS*) se hizo popular llegando a relegar la usabilidad de frame relay aprovechando que la tecnología era soportada sobre el protocolo IP permitiendo segmentar las redes en diferentes servicios. En la actualidad, *MPLS* es la tecnología de mayor uso para los entornos de red amplia metropolitana y su uso es casi un estándar debido a su latencia reducida y los beneficios de calidad de servicio (QoS) que proporciona (Fortinet INC., n.d.).

En la última década, más exactamente en el 2013, nacieron las SDN y en la medida que la comunidad científica y el sector comercial fue examinando sus bondades, ventajas y desventajas, posteriormente asumió que las redes definidas por software son la evolución dado que su implementación y despliegue resulta menos costoso, flexible, escalable y con potencial para mejorar las condiciones de los servicios de red.

Para comprender la adopción de las SDN en entornos LAN es necesario contar con la visión general de los protocolos de red convencionales, como el *Spanning Tree Protocol* y *multichassis link aggregation*, y los enfoques de diseño de red como *like equal cost multipath spine-leaf* (DeCusatis, 2013). A continuación, se realiza una breve descripción de cada uno de los protocolos mencionados sin ahondar en el detalle dado que no es objeto de esta investigación.

- STP es un protocolo de conmutación de capa 2 utilizado en redes LAN, que garantiza topologías de red sin bucles creando siempre una estructura de árbol de un solo camino a través de la red (Integrated Cisco and Unix Network Architectures, 2008).
- El estándar de *multichassis link aggregation* (LAG) (IEEE 802.3ad), permite a dos o más enlaces físicos unirlos en un solo enlace lógico, ya sea entre dos conmutadores o entre un servidor y un conmutador. Dado que LAG introduce un bucle en la red (Juniper INC., 2014).
- En la arquitectura *Spine and leaf*, los servidores son conmutadores " *spine* " que se interconectan con un conjunto de conmutadores " *leaf* ". Bajo esta arquitectura es posible agregar lógicamente múltiples conexiones al mismo dispositivo bajo un grupo de agregación de enlaces virtuales (VLAG) común. También es posible utilizar enlaces VLAG entre conmutadores combinados con el *Virtual Router Redundancy Protocol* (VRRP) para interconectar switches en el mismo nivel de la red. Esta arquitectura tiene limitantes como por ejemplo si todos los servidores conectados a un conmutador de leaf arrancan a la vez, la capacidad del conmutador para procesar la resolución de direcciones de la red se ve afectada en

la capacidad del conmutador para procesar el protocolo de resolución de direcciones (ARP) y el protocolo de configuración dinámica de Host (DHCP) siendo este último el cuello de botella (DeCusatis, 2013).

### Concepto de virtualización

La virtualización es una de las tecnologías más importante en estos días, con ella se optimiza los recursos de cómputo, siendo su objetivo usar al máximo la infraestructura de cómputo, reduciendo los costos de inversión, posibilitando mayor capacidad de uso de la máquina y así optimizando la creación de servicios de TI. Con estas características es posible lanzar varios servidores en un solo equipo físico, en el cual a través de un sistema operativo virtualizado se puede acceder a los recursos del servidor hosts mediante la capa de virtualización (hipervisor). Así mismo el servidor virtualizado no puede comunicarse con el servidor hosts, solo con la capa intermediaria de virtualización, o con la virtualización basada en contenedores. (Red Hat, 2018)

Aunque la virtualización data de la década de los sesenta, comenzó a adoptarse más ampliamente a principios del año 2000. Las tecnologías que posibilitaron la virtualización, como los hipervisores, se desarrollaron hace muchas décadas para permitir que varios usuarios accedieran simultáneamente a computadoras que realizaban procesamiento por lotes. El procesamiento por lotes era un tipo de informática popular en el ámbito empresarial por ejemplo para los sistemas contables. La mayoría de las empresas tenía servidores físicos y pilas de TI de un solo proveedor, por lo cual las aplicaciones heredadas no podían ejecutarse en sistemas de hardware de otro proveedor. El hardware físico se usaba de manera insuficiente y cada servidor podía ejecutar solo una tarea específica del proveedor. Fue en este momento que la virtualización cobró gran protagonismo. Resultó ser la solución natural para dos problemas: las empresas podían dividir los servidores y ejecutar aplicaciones heredadas en varios tipos y versiones de sistemas operativos.

La Virtualización funciona sobre la base de un software o sistema operativo raíz quien separa los recursos físicos de los entornos virtuales que los necesitan, entre ellos se conoce la virtualización basada en hipervisores y la virtualización basada en contenedores. (Sher DeCusatis & Carranza, 2013)

- Virtualización basada en hipervisores: Un hipervisor es un software que se encarga de abstraer el servidor host (servidor físico) del servidor *guest* (máquina virtual), proporcionando una interfaz para que los servidores *guests* puedan interactuar entre ellos y puedan usar los recursos del servidor físico. El hipervisor se encarga de mantener servidores virtuales corriendo en paralelo y aislados, los cuales comparten recursos como CPU, memoria, y dispositivos I/O del servidor hosts. Existen hipervisores de tipo 2, que corresponden a un software que corre en sobre el sistema operativo del servidor físico, y pueden virtualizar nuevos sistemas operativos *guests* entre ellos están los más conocidos como *VMware* y *Virtualbox* y también podemos relacionar los hipervisores llamados de tipo 1, o bare-metal, los cuales son los más populares dentro de los data centers, ya que en ellos se carga

el hipervisor directamente sobre el hardware. Las suites más importantes son *vSphere* de *VMWare* y *Hyper-V* de Microsoft de acuerdo con la tabla *Gartner 2016* (Sikeridis et al., 2017).

- Virtualización basada en contenedores: La virtualización basada en contenedores emplea otro enfoque, el enfoque consiste en virtualizar sobre un sistema operativo que corre directamente sobre un servidor físico, aislando mini máquinas virtuales en un único *kernel*, en este escenario las instancias virtuales en realidad son procesos conocidos como contenedores. Actualmente *Dockers* es el motor de contenedores más popular en la industria, siendo su competidor directo RKT (Sikeridis et al., 2017). La Figura 13 es tomada del artículo citado y se puede observar la comparación de *Hypervisor-based vs Container-based Virtualization* para mayor entendimiento de los conceptos descritos anteriormente.

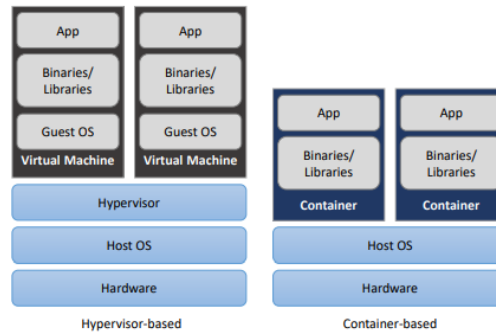


Figura 13. (Fig. 2 de Sikeridis et al., 2017)

### Concepto de nube (Cloud), soporte para las SDN

El concepto de computación en la nube no es la virtualización de servidores físicos, tampoco la virtualización es un elemento necesario para la computación en nube. La nube consiste en poder orquestar recursos de manera central, según la definición del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST), *nube es un centro de datos entregado en modalidad de autoservicio como demanda, donde el proveedor del servicio garantiza, disponibilidad, calidad, seguridad y respaldo de la información almacenada; este centro de datos es de aprovisionamiento rápido, elástico, cuenta con amplio acceso a la red con crecimientos bajo demanda* (Sher DeCusatis & Carranza, 2013). Los modelos de servicio para los entornos de computación en nube suelen clasificarse según ofrezcan software como servicio (SaaS), plataforma como servicio (PaaS) o infraestructura como servicio (IaaS) y estos pueden ser catalogados como privados o públicos.

En (Taherkordi et al., 2018) se desarrolla una taxonomía completa de las principales áreas de investigación de la computación en la nube, proporcionado información útil para una comprensión más amplia de los desafíos de diseño en ambientes de nube, haciendo énfasis en las características de virtualización y como las SDN facilitan la creación de múltiples servicios. En la Figura 14 se cataloga por medio de una taxonomía los desafíos

que tiene la computación en la nube y así mismo identifica las líneas futuras de investigación en esta área.

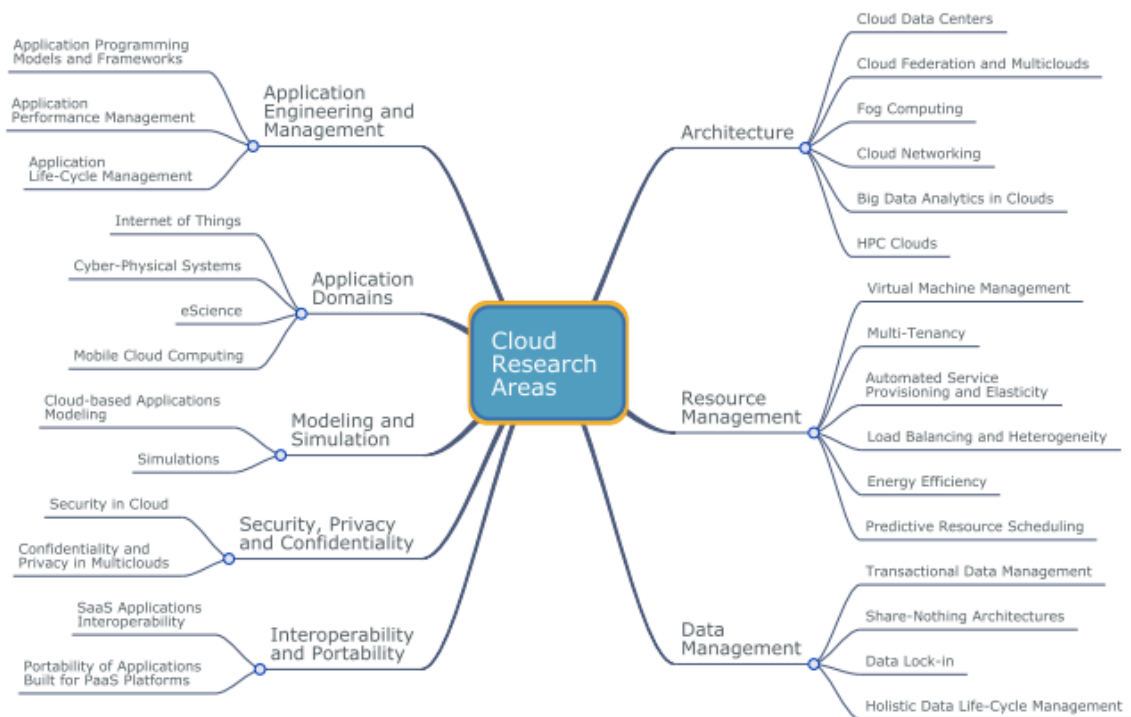


Figura 14. Tomada de (Taherkordi et al., 2018)

### Computación en la niebla (FOG) y las SDN

La computación en la niebla es un concepto introducido por C/SCO en 2012, es una extensión del paradigma de la computación en nube desde el núcleo hasta el borde de la red. Para el internet de las cosas es un concepto que permite acercar los dispositivos finales al borde de la red. (Mouradian et al., 2018), este concepto de computación en la niebla tiene un creciente interés por parte de la comunidad científica que está enfocada al IoT, pues promueve esfuerzos para desarrollar soluciones que permitan agregar características de seguridad y calidad de servicios en las grandes cantidades de datos que generan los sensores (Salman et al., 2018). Para los investigadores se tiene una visión global de la Fog siempre y cuando se incorpore el paradigma de las SDN con el fin de empujar los datos al borde de la red reduciendo así la complejidad en la gestión permitiendo así proporcionar servicios de interconexión a los diferentes dispositivos IoT (Velasquez et al., 2018). La combinación de estos paradigmas abre un nuevo conjunto de posibilidades para servicios y aplicaciones innovadoras; sin embargo, también trae consigo un nuevo escenario complejo que debe ser gestionado de forma eficiente para satisfacer adecuadamente las necesidades de los usuarios (Sun & Ansari, 2016).

Teniendo en cuenta todos los retos y limitaciones divisados en la combinación de estos dos paradigmas (Aggarwal & Kumar, 2019) y (Baktir et al., 2017) proponen un análisis

solido para la implementación de soluciones de IoT que integren las SDN y la Fog en una sola troncal de infraestructura con el fin de reducir la latencia de red, otorgar mayor fiabilidad en las aplicaciones, garantizando la orquestación de los datos desde el borde de la red y asegurando las condiciones de seguridad y privacidad que son requeridas para este tipo de servicios.

### Definición de la arquitectura SDN

Por definición toda arquitectura SDN debe contar con tres capas, la capa de aplicaciones, la capa de control y la capa de datos, formando un conjunto de componentes de hardware y software que tienen el objetivo de facilitar que los proveedores de la nube y los operadores de red manejen dinámicamente los requisitos comerciales y servicios de telecomunicaciones, todo a través de un sistema de control centralizado (Jain et al., 2019). En la Figura 15 tomada del artículo software defined networking: State-of-the-art se ilustra la definición de la arquitectura tipo SDN estándar y a continuación se describe cada una de sus capas

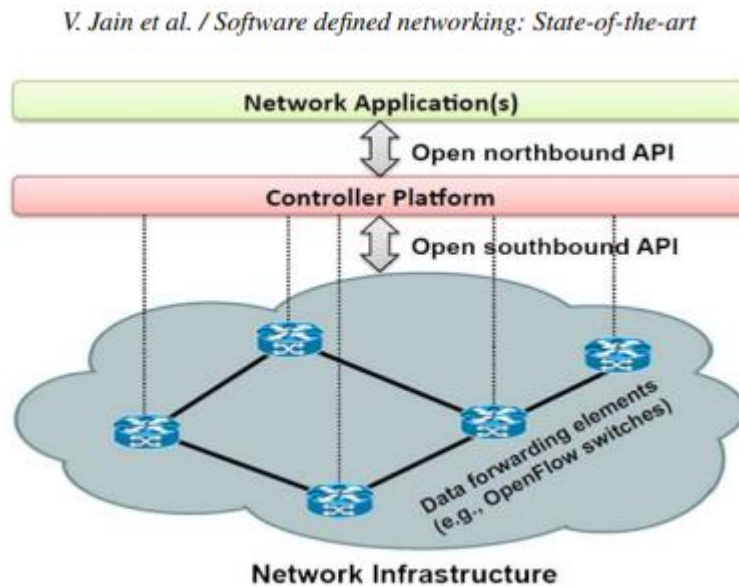


Figura 15. Grafica tomada de software defined networking: State-of-the-art

**Capa de aplicación:** esta capa es un componente de software donde se albergan las aplicaciones de negocio y del usuario final que consumen los servicios de la red SDN, sirviendo de visualización para la gestión de la red y sus aplicaciones (Kreutz et al., 2015)

**Capa de control:** el componente central de las SDN consiste en un conjunto de controladores que se apoyan en el protocolo *Open Flow* para proporcionar una funcionalidad de control consolidada a través de las API de conexión que tienen como función supervisar el comportamiento de reenvío de tráfico en la red. Estas interfaces



lógicas de comunicación permiten que los controladores interactúen: hacia el sur, hacia el norte y hacia el este / hacia el oeste (Jarraya et al., 2014).

**Capa de infraestructura:** también conocida como el plano de datos, consta principalmente de elementos de reenvío (FE), que incluyen conmutadores físicos y virtuales accesibles a través de una interfaz abierta y permite la conmutación y el reenvío de paquetes (McKeown et al., 2013).

Jarraya et al., 2014 presenta una taxonomía a partir del estudio de la literatura sobre las SDN durante el periodo de 2008 al 2013 que sirve como apoyo a esta investigación para identificar y analizar las contribuciones y avances sobre las SDN's.

### **Controlador SDN**

Como se mencionó anteriormente las SDN's desarrollan es una tecnología que desacopla el plano de datos, del plano de control y en este último se integran los controladores, elemento de software que tienen la función de administrar el reenvío de la información de los conmutadores fungiendo como el centro de la arquitectura SDN. Realizando esta gestión a través de tablas de flujos (Centeno et al., 2014), es posible comparar un controlador SDN como una pieza de software semejante a un sistema operativo para la red, responsable de controlar todas las comunicaciones entre las aplicaciones y los dispositivos y encargado de interpretar las necesidades de la capa de aplicación a los elementos de red en la capa de datos, proporcionando información de control, necesario para la operación de la SDN.

Desde esta óptica los controladores son servidores que ejecutan un sistema operativo, que están ubicados de forma externa a la red y contienen la lógica de control con la cual se aplican las reglas de ingeniería de tráfico, control del enrutamiento, balanceo de carga e interactúan con la arquitectura SDN a través de las API; una que conecta la capa de aplicación (NBI) y otra que conecta el plano de datos (SBI) (S. Das et al., 2013b). Para que una arquitectura SDN funcione correctamente es necesario que cada capa cumpla funciones específicas, así como las API de conexión. El correcto funcionamiento de la SDN depende de las etiquetas de los paquetes que se transportan a las tablas de flujo, en la Figura 16 (S. Das et al., 2013a) muestra la información que está contenida en las etiquetas de cabecera de los paquetes de TCP, información que es reenviada a las tablas de flujo del protocolo *Open Flow* para la caracterización de las reglas SDN.

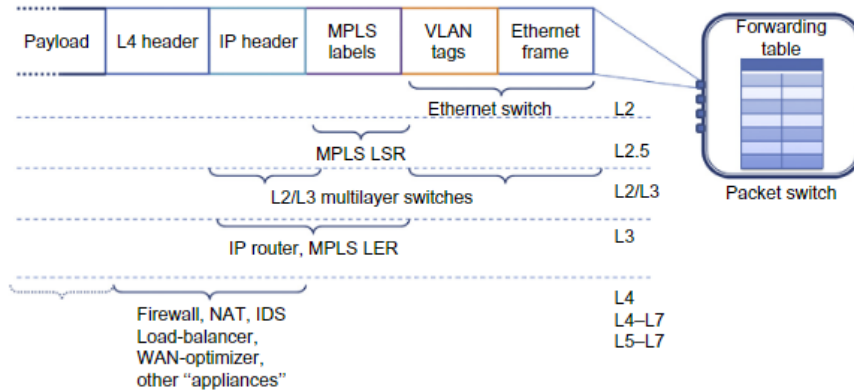


Figura 16. Tomada de Chapter 17 - Software-Defined Networking and *Open Flow*

El plano de control cuenta con el API del conmutador que tiene la función específica de conectar y reenviar las tablas de flujo, en otras palabras, los conmutadores convencionales podrían adaptar un desarrollo de software que automatice esta función y permitir el control programático simple, flexible y agnóstico de la capa de datos (McKeown et al., 2013).

Las interfaces de comunicación API son comúnmente conocidas como la *Southbound API* (SBI) y la *Northbound AP* (NBI) y son utilizadas para la comunicación entre el controlador y las dos capas (J. C. Moreno, 2015), estas realizan la interacción entre las aplicaciones y los conmutadores del plano de datos, estas interfaces pueden monitorearse en el *flowvisor* del controlador exponiendo el detalle del reenvío de paquetes siendo posible dividirlos en sílices (rebanadas) o porciones de red, para presentar diferentes vistas en el controlador dando la posibilidad de particionar la red si es necesario. En la Figura 17 tomada del artículo *Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey* de (Kreutz et al., 2015) es posible visualizar el proceso de interconexión e intercambio de información de las interfaces API con las capas de la red SDN.

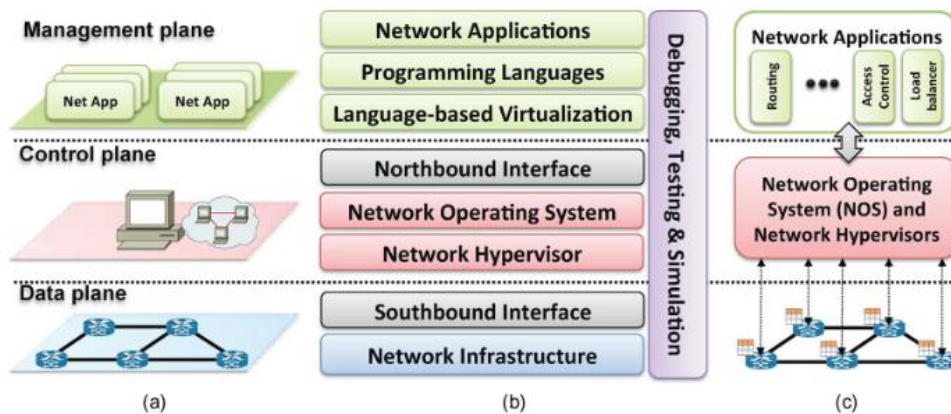


Figura 17. Arquitectura SDN tomada de (Kreutz et al., 2015)

En los controladores SDN, la abstracción de flujo elimina planos de control múltiples, distribuidos o independientes, al satisfacer un controlador externo la capacidad de definir flujos de paquetes es posible identificar el flujo de una aplicación de la misma forma que una red tradicional, (McKeown et al., 2013) fiel a este concepto de han desarrollado diferentes controladores de código abierto para Centeno et al., 2014 en su artículo de evaluación técnica y selección de controladores SDN identifica las características y elementos relevantes a tener en cuenta en un controlador y resume su análisis en una tabla de comparación de controladores más utilizados hasta la fecha (*Beacon*, *Floodlight*, *NOX*, *POX*, *Ryu*, *Trema* y *OpenDayLight* (ODL)). Este análisis fue importante para determinar que el controlador con mayor avance y contribuciones para el desarrollo de la tecnología SDN es ODL.

	Beacon	Floodlight	NOX	POX	Trema	Ryu	ODL
Soporte OpenFlow	OF v1.0	OF v1.0	OF v1.0	OF v1.0	OF v1.3	OF v1.0, v1.2, v1.3 y extensiones Nicira	OF v1.0
Virtualización	Mininet y Open vSwitch	Mininet y Open vSwitch	Mininet y Open vSwitch	Mininet y Open vSwitch	Construcción de una herramienta virtual de simulación	Mininet y Open vSwitch	Mininet y Open vSwitch
Lenguaje de desarrollo	Java	Java	C++	Python	Rudy/C	Python	Java
Provee REST API	No	Si	No	No	Si (Básica)	Si (Básica)	Si
Interfaz Gráfica	Web	Web	Python+, QT4	Python+, QT4, Web	No	Web	Web
Soporte de plataformas	Linux, Mac OS, Windows y Android para móviles	Linux, Mac OS, Windows	Linux	Linux, Mac OS, Windows	Linux	Linux	Linux, Mac OS, Windows
Soporte de OpenStack	No	Si	No	No	Si	Si	Si
Multiprocesos	Si	Si	Si	No	Si	No	Si
Código Abierto	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Tiempo en el mercado	4 años	2 años	8 años	1 años	2 años	1 años	5 meses
Documentación	Buena	Buena	Media	Pobre	Media	Media	Media

Figura 18. Tabla de controladores SDN, tomada de (Centeno et al., 2014)

### Protocolo Open Flow

*Open Flow* es un protocolo de código abierto con la promesa pragmática de proporcionar a los investigadores y desarrolladores tablas de flujo como mecanismos para programar los diferentes conmutadores en la red (McKeown et al., 2013), así lo definen en el 2008 los investigadores de la universidad de Standford, quienes diseñaron una nueva forma de

experimentar con las redes de datos de gran densidad de puertos y requerían una velocidad uniforme. El protocolo aprovecha las tablas de flujo que ya existen en los conmutadores ethernet construidas a partir de las tablas TCAM y RAM (Serrano & Guerri, 2015) y define el protocolo con tres partes, una tabla de flujo, un canal de comunicación seguro y el estándar de comunicaciones *Open Flow*. La tabla de flujo dispone de campos para buscar las coincidencias entrantes, el canal seguro permite el envío de comandos desde el controlador al conmutador y el protocolo *Open Flow* provee un estándar abierto de comunicación para modificar, insertar o eliminar las entradas de la tabla de flujo (Serrano & Guerri, 2015).

El estándar *Open Flow* en la versión 1.1.0 (Felipe & Gómez, n.d.) está definido como un proceso de comunicación que se detalla con el intercambio de mensajes entre el controlador y el conmutador, los mensajes, el tipo y los valores se describen a continuación:

- *Header* (Encabezado de todos los paquetes)
- *Type* (Tipo de mensaje), pueden tener valores como:
  - Mensajes inmutables
  - Mensajes de configuración
  - Mensajes asíncronos
  - Mensajes con comandos al controlador
  - Mensajes estadísticos
  - Mensajes de barrera
  - Mensajes de configuración de cola

El protocolo también define la composición del puerto: por su descripción, convenciones, y características que son necesarias para el análisis de la tabla de flujos. Entre estas características están:

- Entradas de flujos, el respectivo “*wildcard*” para identificación de puerto
- IP de origen y destino
- Dirección MAC, tabla ARP
- Prioridad CoS
- ID VLAN, o VXLAN
- Tipo de trama Ethernet
- Tipo de servicio ToS
- Protocolos de red o transporte como TCP, UDP, IP, *MPLS*
- Puerto de conexión TCP/UDP origen y destino

El funcionamiento del protocolo está definido para sea adaptable a implementaciones de alto rendimiento a bajo costo y debe ser capaz de garantizar el aislamiento de cualquier tipo de tráfico. En la Figura 19 se presenta el flujo de comunicación del protocolo *Open Flow*

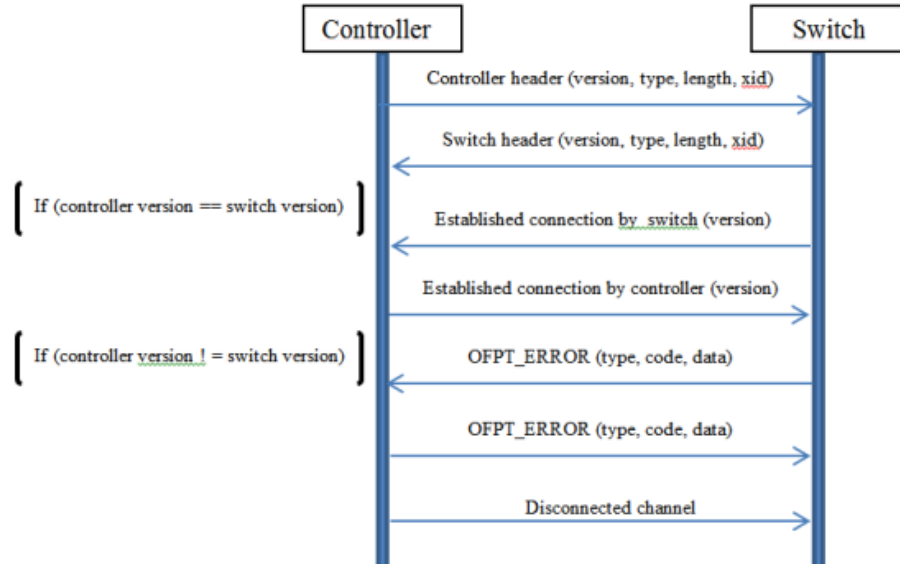


Figura 19. Flujo de comunicación protocolo *Open Flow*

Para finalizar el protocolo *Open Flow* determina una coincidencia y especificación para las acciones que se deben realizar en la tabla de flujo, proporcionando un marco analítico para razonar el plano de datos (Hu et al., 2014). El paquete *Open Flow* también delimita las acciones compatibles para la SDN (Kobayashi et al., 2014), aplicando la lógica de procesamiento cuando un paquete llega a un conmutador; éste inspecciona si hay una entrada en su tabla de flujo que coincida con el encabezado y campos del paquete.

Si encuentra coincidencia, la entrada de la tabla de flujo especifica cómo reenviar el paquete, si no se detecta coincidencia, el conmutador genera un mensaje de entrada de paquete que se envía al controlador y el controlador pasa el evento *package\_in* a las aplicaciones de control adecuadas en función de las políticas programadas para que las aplicaciones reciban eventos que utilizan en el estado de red. La acción puede implicar un *paquete\_salida* o un *flow\_mod* (agregar o modificar una entrada de flujo) (Moreno, 2015).

Las siguientes son las posibles acciones que se pueden realizar con las tablas de flujo tomado de (Xiong et al., 2016).

- Reenviar paquete a algún puerto de salida físico.
- Reenviar paquete a algún mecanismo de salida virtual *VPN* o *VXLAN*
- Modificar un campo existente en el paquete.
- Agregar un nuevo campo a un paquete.
- Eliminar un campo existente del paquete.
- Asociar el paquete con alguna función que involucre el estado local
- Copiar paquete del plano de datos al plano de control SDN.
- Descartar el paquete del plano de datos.
- Resolución de acciones sobre la tabla de flujo basado en el estándar *Open Flow 1.1.0*
  - Paralelo múltiple

- Permiso múltiples coincidencias.
- Acciones coherentes.
- Tablas múltiples pueden provenir de una o varias redes.
- Priorización del paquete para resolver conflictos.
- Progresión lineal a través de la canalización "volver a enviar"
- Asociación del paquete por medio de metadatos para transmitirse junto con él para procesamiento posterior.

### **Modelos de SDN-IoT**

Las SDN (Software Defined Network por sus siglas en inglés) son un paradigma tecnológico que se desacopla el plano de datos, del plano de control, Flauzac et al., 2016 presenta un modelo para controlar y asegurar los intercambios de IoT basado en SDN sobre redes ad-hoc usando un protocolo de enrutamiento entre *clústeres* distribuidos, dando la función a cada *clúster* de procesar el 100% de los paquetes que llegan a su puerta de enlace a fin de gestionar el tráfico entre los nodos conectados. En este modelo se identifica cada una de las capas de la arquitectura SDN y demuestra cómo se optimiza la interconexiones de aplicaciones IoT.

Otro es el modelo lo postula Kirichek et al., 2016 que construye una SDN sobre el laboratorio de internet de las cosas de Departamento de Redes y Transmisión de Datos de la Universidad estatal de Telecomunicaciones, teniendo como objetivo interconectar la red de sensores ubicuos voladores (FUSN) que se encuentran en zonas remotas y son utilizados para calcular las trayectorias y detección de interferencias electromagnéticas. El modelo comprueba que la mejor solución de red es una SDN dado que la plataforma de IoT esta desarrollada para consumir flujos de datos a fin de realizar minería con la información de los sensores.

A su vez (Bizanis & Kuipers, 2016) define un modelo de virtualización de red para centros de datos explorando la integración de (NFV) o funciones de red virtualizadas apoyado sobre el protocolo IPV6 con el fin de asociar la mayor cantidad de dispositivos virtuales y físicos como le sean posibles, el modelo demuestra que la arquitectura de red SDN sobre este entorno es posible optimizar los recursos para las plataformas IoT, segmentándolos y asegurándolos con las FNV.

Zhang et al., 2019 Propone el método de FRM para minimizar el número total de reglas de reenvío en IoT basado en SDN el cual consiste en la multiplexación de trayectos definidos por reglas de flujo diseñando un algoritmo polinomial utilizando la técnica de aproximación de Markov; este análisis teórico indica que el algoritmo polinomial genera una solución casi óptima aproximando el reenvío de datos en 15,73 % de media en comparación con los algoritmos de referencia. En concordancia con los diferentes modelos y aplicaciones (Ibrahim Naser & Jawad Kadhim, 2020) define un modelo SDN como técnica para la estrategia de multidifusión con conciencia de la energía para MANET, que se define técnicamente como enrutamiento multicast proactivo con el fin de reducir el consumo de

energía al mínimo en sistemas de redes móviles ad-hoc donde el proceso de enrutamiento se hace difícil debido al movimiento continuo de los nodos.

Para finalizar Guan et al., 2021 propone un modelo de arquitectura WNOS que integra una solución SDN, mediante la definición de componentes como abstracción de red, descomposición del control de red automatizado y pila de protocolos programables a fin de proporcionar un modelo definido por software para el control de los radios en soluciones IoT con base en las redes inalámbricas. Todos los modelos anteriormente descritos proponen una red definida por software orientada y ajustada a las necesidades de un entorno IoT específico, mostrando la versatilidad y capacidad de las SDN's para el desarrollo de nuevos servicios sobre IoT.

## **Funcionalidades SDN en entornos IoT**

Las funcionalidades en una SDN se encaminan a desarrollos compactos desplegados en la capa de aplicación que determinan el funcionamiento de la red, de acuerdo con reglas, políticas, acciones, controles, inspecciones y todo análisis que se pueda realizar para mejorar el desempeño de la red. Las aplicaciones en términos de funciones de red son muchas, pero solo algunas potencian la red para un correcto desempeño, por ejemplo a nivel WAN la red debe contar con funciones de seguridad perimetral, calidad de servicio, balanceo de tráfico, aceleración de contenidos y filtrado de sitios WEB que aseguren que el acceso a internet es eficiente y rápido; sin embargo en otros ambientes como LAN o servicios de data center es necesario contar con funcionalidades que cubran características de red como la calidad de servicio, control de acceso a la red, perfilamiento, postura de usuarios, segmentación por tipos de servicio, priorización de aplicaciones y todas aquellas que optimicen el rendimiento, brinden protecciones de seguridad y mejoren el desempeño de la red interna para cualquier sector.

## **Funcionalidades de redes virtualizadas**

La idea principal detrás de las funcionalidades virtualizadas de red más conocidas como NFV no es más que hacer la red directamente programable, apoyándose en un control centralizado que le permita aplicar reglas y políticas programables (Zerifi et al., 2020). Las NFV surgieron en los centros de datos cuando se descubrió que con la tecnología de virtualización era posible no solo virtualizar servidores, aplicaciones o servicios, se pudo observar que era posible virtualizar instancias con funciones específicas para manejar los problemas de red y que no dependían exclusivamente del hardware, en particular (Souza et al., 2020) realizó una revisión de la literatura a fin de establecer cuáles eran las aplicaciones NFV que eran posibles implementar y estaba siendo más ampliamente usadas.

La NFV es un concepto que está siendo ligado a las SDN por brindar la capacidad de ofrecer funciones de red sin necesidad de hardware dedicado. Este concepto simplifica la implementación de las funcionalidades de red y permite que los administradores puedan proporcionarlos sin la necesidad de adquirir equipos adicionales con la facilidad de

poderlos desplegar directamente sobre los controladores SDN, adaptándolos entre controladores centrales a controladores de borde o a nodos determinados donde sea requerida su funcionalidad, esto a su vez mejora el costo de las soluciones de red actuales y en término de IoT asegura que sus aplicaciones cuenten con los servicios de red que demanden de manera simplificada (Zunino et al., 2020).

### **Funcionalidades de Seguridad**

Internet de las Cosas o "IoT" define una red altamente interconectada normalmente heterogénea en la que se busca cualquier tipo de comunicaciones. El requisito de seguridad en la red, sin embargo, resulta crítico, y algunos protocolos de seguridad estándar de Internet no son aplicables en particular sobre algunos dispositivos de IoT que son limitados en sus recursos de hardware y energía (Nguyen et al., 2015).

Para este tipo de arquitecturas IoT se busca que las comunicaciones se cifren extremo a extremo, proporcionando a los usuarios y dispositivos accesos secretos y encriptados (Vučinić et al., 2015), de otra parte, en internet se requiere contar con mecanismos de defensa para los ataques de denegación de servicio (Rashidi et al., 2017), que a menudo son destructivos y pueden permitir el robo de información. Con las SDN es posible implementar reglas y funciones de seguridad para prevenir la mayoría de amenazas que vulneren la seguridad de IoT.

Xu et al., 2016 propone un método de defensa llamado *new-flow attack* que consiste en monitorear las tablas de flujo de los controladores SDN con el fin de interceptar los flujos de ataque, el método propuesto utiliza principalmente en *Open Flow* y pretende inyectar gran cantidad de paquetes no coincidentes en los conmutadores habilitados para SDN y de acuerdo al concepto SDN estos paquetes no coincidentes son tratados como nuevos flujos, por lo tanto estos paquetes se encapsulan en los mensajes *PacketIn* y se envían al controlador de esta forma el controlador ordena recalcular la ruta. Este es un mecanismo de seguridad inteligente que permite detectar nuevos flujos de ataque y es una solución de bajo costo para los sistemas IoT de grandes redes de sensores en las cuales podría colapsar la red en el momento que no se cuenten con estos controles. Otra posibilidad es habilitando un controlador intermedio tal como se define en la FoG implementada en entornos IoT, donde se integra un algoritmo de selección de posición que se despliega en toda la red de IoT asegurando un tráfico simétrico no dirigido con bordes ponderados (Liu et al., 2018). Este mecanismo selecciona el mayor peso de la secuencia del *middlebox* que responde a las políticas seguras definidas y se determina una posición de despliegue efectiva para la red. Maimó et al., 2019 plantea la mitigación de eventos de seguridad tipo *rasomware* a partir del uso de técnicas de machine learning definiendo una aplicación tipo NFV que permita el aislamiento de los paquetes en las tablas de flujo mediante la asociación de metadatos.

En conclusión, son muchos los mecanismos de seguridad actuales que podrían ser desplegados como una aplicación en las redes SDN sin embargo se requiere de mayor



interés e investigación en la adopción de estos parámetros, particularmente para los sistemas IoT se proponen las siguientes funcionalidades que fueron definidas en una encuesta de funciones de seguridad sobre las SDN para IoT (Farris et al., 2019)

#### Mecanismos de Seguridad Convencionales en Entornos IoT

- *Authentication and Authorization for IoT*: La autenticación es el proceso de identificación del dispositivo, mientras que la autorización proporciona permisos. Los dispositivos IoT utilizan estos procesos para realizar un control de acceso basado en roles (Kristen Gloss, n.d.)
- *Traffic Filtering and Firewalls*: El filtrado de tráfico es un método utilizado para proporcionar seguridad en la red
- *Encryption Protocols*: El método de cifrado es utilizado por los firewalls para proporcionar seguridad extremo a extremo
- *Signature-Based IDS*: es la detección de ataques mediante la búsqueda de patrones específicos, como secuencias de bytes en el tráfico de la red
- *Anomaly-Based IDS*: es la detección de intrusiones basado en anomalías, método usado por los firewalls para monitorear la actividad de las aplicaciones

Estas funcionalidades están en la capacidad de detener las amenazas de seguridad más relevantes en los entornos de IoT

#### Amenazas de seguridad para dispositivos IoT

- *Hardware Trojan Attack*
- *Battery Draining Attacks*
- *Malicious Code Injection Attacks*

#### Amenazas de seguridad en aplicaciones de IoT

- *Malicious Virus/Worm*
- *Application Data Leakage*
- *Service Logging Failure*
- *Malicious Scripts*
- *Phishing Attacks*
- *Inconsistent Software Patches*

#### Amenazas de seguridad en las redes usadas para IoT

- *Denial-of-Service Attack*
- *Spoofing Attack*
- *Man-in-the-Middle (MitM) Attack*
- *Routing Attacks*
- *IoT Cloud Service Manipulation*
- *Security Inter-Working*

### **Funcionalidades de Calidad de servicio**

Una limitante que tienen los controladores SDN que se basan sobre *Open Flow* es que NO pueden configurar parámetros de QoS de manera dinámica y bajo demanda para garantizar las condiciones de servicio sobre la red, lo anterior se ve reflejado por que usualmente en las redes tradicionales TCP/IP utiliza la ruta más corta para ubicar su

destino y cuando el camino más corto se encuentra congestionado, descarta una gran cantidad de paquetes, para *Open Flow* no es una regla, ya que su contexto no se asocia a buscar la ruta más corta. Hu et al., 2014 propone un marco que se denomina QoSFlow el cual consiste en permitir la gestión de la clase de tráfico y las colas a través de reglas definidas, a través de la formula del enrutamiento QoS dinámico como problema a una ruta restringida. Para las aplicaciones de video, se aplica el método de variación de retardo en función de optimizar el costo del paquete para la restricción, para cumplir con la restricción de pérdida de paquetes, define una congestión combinada entre la media de perdida de paquetes y la media de variación de retardo. La solución admite rutas QoS de nivel 1 y nivel 2. Y sus resultados arrojan una mejora en el desempeño de la red SDN en un 14%.

Otro método para aplicar calidad de servicio en las SDN es desplegar la aplicación de *Aware Routing*. Este mecanismo realiza la identificación de paquetes empleando técnicas de inspección de paquetes IPS, que permiten extraer de él la información para su identificación. Si los paquetes no están cifrados, el proceso de identificación es simple al poder acceder a toda la información del paquete y con esta información modificar en las tablas de flujo la prioridad que tiene el paquete. La identificación de tipo IPS es un mecanismo que se puede usar como QoS en las SDN. Este sería un avance hacia técnicas basadas en métodos heurísticos que realicen la priorización de paquetes a partir de un aprendizaje de patrones identificables en los flujos, se pueden hacer posteriormente predicciones sobre tipos de aplicación (Juan.Rodrigo, 2019).

G. Li et al., 2018 propone en su artículo un esquema de aprovisionamiento de QoS detallado (SFQP) compatible con SLA (acuerdos de nivel de servicio) para las SDN, este esquema permite el Aprovisionamiento de QoS de grano fino consciente de SLA, lo que facilita que la SDN admita completamente la circunstancias de múltiples inquilinos permitiendo la negociación de reglas SLA que posteriormente serian aplicadas sobre las tablas de flujo del controlador, con base a estos SLA es posible la asignación de ancho de banda bajo el supuesto de popularidad de la regla. Algo parecido propone Bröring et al., 2020, el cual enmarca su método en permitir la definición de flujos de las aplicaciones con el propósito de determinar las restricciones de QoS de forma automática de acuerdo con el interés que tenga la aplicación, siempre modificando las tablas de flujo de acuerdo con las parametrizaciones.

En todos los artículos encontrados sobre parámetros QoS para entornos IoT que utilicen las SDN se asume que sobre internet no se pueden garantizar restricciones de QoS debido a que el modelo de internet es un servicio al mejor esfuerzo y a nivel de infraestructura se trata de la interconexión de diferentes proveedores para llevar un paquete de un origen a un destino por eso la propuesta de QoS esta enfoca a la construcción de una funcionalidad virtualizada de tipo SLA para aplicaciones, que identifique las aplicaciones y parametrize automáticamente las tablas de flujo para asegurar la priorización del paquete de acuerdo a un acuerdo de reglas previamente definidas(Varyani et al., 2020).

## Herramientas para la emulación de redes SDN

Los emuladores de red son herramientas de software diseñadas por la comunidad académica para ayudar a proporcionar entornos virtuales con propiedades realistas para probar arquitecturas, protocolos, funciones en centros de datos antes de implementarlo en la práctica (Wette et al., 2014). Una de estas herramientas es MaxiNet, construida para probar nuevos algoritmos de enrutamiento de red en un entorno de emulación escalable, donde se simula el tráfico de grandes centros de datos y en la actualidad tiene la posibilidad de emular topologías SDN.

MineNet es un *clúster* desarrollado como un banco de pruebas virtual, que cuenta con contenedores de bajo peso y corre solo en una máquina virtual (Lantz & O'Connor, 2015), esta es la herramienta que han usado muchos investigadores y desarrolladores desde el 2013 para probar las SDN, siendo un desarrollo de código abierto, cuenta con una única consola para el control de los laboratorios, es compatibles con APIs en Python, realiza colocación automática de nodos y soporta algoritmos de ubicación.

Este tipo de plataformas se pueden utilizar para reducir el tiempo de los desarrolladores en los experimentos y para explorar nuevos escenarios de red (Tsai et al., 2017). Por ejemplo (Galluccio et al., 2015) presento una herramienta de emulación de red SDN orientada a IoT denominada como SDN-WISE, la cual es una solución de red definida por software (SDN) para redes de sensores inalámbricos, integra un API que permite a los desarrolladores de software implementar el controlador SDN utilizando el lenguaje de programación que prefieran. Esto representa una gran ventaja de SDN-WISE en comparación con las soluciones existentes porque aumenta la flexibilidad y la simplicidad en la programación de redes.

***“Los principales desafíos en la era IoT son la interoperabilidad, la heterogeneidad, la movilidad, la calidad del servicio y la seguridad. Las redes definidas por software son un nuevo enfoque que se enfoca en los desafíos anteriores, explotando nuevas arquitecturas de red centralizadas lógicamente flexibles”.*** (Tsai et al., 2017).

### 3 Procedimiento de evaluación técnica de una red definida por software para entornos IoT

En las últimas décadas las comunicaciones se han hecho esenciales para el funcionamiento de toda organización; en consonancia con ello están las plataformas IoT, con alta dependencia de las transacciones sobre las redes de datos, haciendo de la capa de red, un componente esencial y determinante para la adopción y despliegue de dicho paradigma. Bajo esta premisa las organizaciones demandan creciente adaptabilidad de las redes frente a los diversos escenarios. Esa demanda de adaptabilidad ha potenciado SDN, por parte de investigadores y fabricantes, de la tecnología que prometen fácil adaptación, relegando las redes tradicionales.

Aun así, quedan retos diversos asociados a la selección del tipo de SDN que mejor se ajuste a cada ecosistema IoT, captando por ello el interés de los investigadores. Se presenta en consecuencia, en este capítulo como contribución central de este trabajo de investigación, el procedimiento para la evaluación de las condiciones técnicas de la red SDN en entornos IoT.

El análisis realizado para la construcción del procedimiento evidencia el alto nivel de incertidumbre que acompaña el proceso de toma de esta selección. La toma de decisiones es un proceso habitual para el ser humano que debe elegir la alternativa más acertada o la que mejor satisface las necesidades (M. S, 2009), y el ámbito organizacional no es la excepción; los ejecutivos de las empresas, directores, políticos, gerentes de proyectos y en general los profesionales deben tomar decisiones difíciles en el desarrollo de sus actividades. Estas decisiones son complejas según León Garcia, (2000) y se caracterizan por:

- Observar intereses contrapuestos
- Tener elementos de incertidumbre
- Involucrar distintas personas en la decisión
- Poseer elementos fácilmente valorables y elementos difícilmente valorables

Las buenas decisiones se valoran de acuerdo a sus consecuencias, pero no todas suelen tener este efecto, por este motivo es imprescindible asegurar la toma de decisiones bajo un proceso estructurado que considere la información relevante, los recursos disponibles, las premisas mínimas y que permita evaluar si la decisión es la mejor alternativa en el escenario planteado. Según León Garcia, (2000) una buena decisión posee las siguientes características:

- Que sea una decisión en la que se ha trazado el objetivo que se quiere conseguir
- Que reúna toda la información relevante
- Que considere las preferencias del decisor

En proyectos de ingeniería es vital precisar los requerimientos para minimizar la incertidumbre; los ingenieros deben definir los criterios, los diferentes puntos de vista, y las responsabilidades para resolver los conflictos asociados (Boer, 1989).

Para la construcción del procedimiento de evaluación técnica objeto de esta investigación, partimos del proceso de toma de decisiones en proyectos de ingeniería en el cual cada decisión sobre hechos, necesidades, conocimiento, limitantes técnicas y experiencia se debe efectuar en conjunto, bajo el contexto del problema (Chica Pedraza, 2012). Bajo esta perspectiva se realizó la evaluación de las redes definidas por software en el contexto de Internet de las Cosas (IoT), bajo la metodología del Proceso Analítico Jerárquico, AHP.

En AHP se deben definir los criterios de manera precisa, asignarle un peso a cada uno de ellos, para la evaluación formal de aspectos relevantes y específicos de cada alternativa, valorando la importancia de forma independiente y dinámica de los componentes evaluados.

Existen diferentes métodos de evaluación multicriterio: el Sporting, el MAUT, método de Utilidad Multi-atributo, el Método AHP, el Proceso Analítico de Red (ANP), entre otros; no obstante, el más utilizado para la selección de tecnologías es el AHP. (J. M. Moreno 2012), (Osorio, 2008).

### **3.1 Modelado del método AHP en la evaluación técnica de SDN-IoT**

Aplicando la metodología AHP se realizó la evaluación técnica de una solución SDN para el entorno IoT tomando como base las premisas definidas por Saaty. Estas premisas permiten evaluar jerárquicamente cada uno de los factores, criterios y alternativas que se tienen para la selección de un fabricante que cumpla con el objetivo general planteado en esta investigación. Se debe aclarar que este método podría ser adoptado a nivel organizacional, si se considera el juicio de expertos. Ellos estarían en la capacidad de definir cada uno de los criterios que plantea el método AHP y su relevancia; sin embargo, en el contexto de este trabajo de investigación, la alternativas a considerar fueron generadas a partir de la revisión de la literatura que permitió determinar cada uno de los criterios relevantes tanto a nivel técnico, como conceptual. Estas son representadas por las categorías conceptuales descritas en la SLR.

Todo este procedimiento ha sido desarrollado para soportar a las áreas de tecnología en el proceso de selección de fabricantes de SDN's, mediante el análisis multicriterio y apoyarlas metodológicamente. Dicho proceso metodológico incluye los siguientes pasos, que fueron adecuados para los entornos IoT.

- Definición del problema, adopción de la metodología Saaty
- Estructuración del problema, niveles de decisión, estableciendo grupos de criterios

- Establecimiento de las prioridades entre los criterios
- Análisis pareado de alternativas
- Determinación de la mejor alternativa

### Definición de problema y adopción de la metodología AHP

En esta sección, siguiendo la metodología AHP se van a determinar los criterios de selección y describir cada uno de ellos.

Objetivo general del proceso de selección: hacer una evaluación técnica para soportar la selección de una tecnología.

Factores de decisión: además de la revisión del trabajo previo en el campo, presentada en el capítulo 2, se tuvo en cuenta en esta selección la experiencia del autor en el análisis de selección de tecnologías. Para los proveedores de servicio y organizaciones existen algunos criterios generales que les permiten juzgar y valorar ponderadamente las alternativas bajo el peso que se establezca; normalmente este tipo de análisis técnico es realizado por un equipo de ingenieros expertos, que establecen criterios de acuerdo con cada escenario realizando un análisis confiable para la selección de la tecnología que cumpla con los indicadores previstos por la organización. En este orden los siguientes factores son los más usados para estimar decisiones de tipo técnico, ver Tabla 12.

<b>Factores</b>	<b>Económico</b>
	<b>Tecnológico</b>
	<b>Infraestructura</b>
	<b>Diseño SDN for IoT</b>

Tabla 12. Factores de decisión

El factor económico es de alta relevancia cuando se trata de adoptar una nueva tecnología para cualquier proceso, en segundo lugar está el factor tecnológico que es vital para la selección de tecnologías y ya en un enfoque IoT, el factor de infraestructura es un elemento de decisión debido a que las plataformas IoT requieren la integración de diferentes tecnologías para proveer servicios y en la medida que la infraestructura sea escalable e interoperable permitirá la adopción de la solución planteada.

Por último y específicamente para las redes definidas por software es necesario seleccionar el tipo de diseño de red SDN que se va a implementar pues de él depende la consistencia de la red, su método de operación, así como sus funcionalidades.

En cuanto a los criterios relacionados se optó por realizar en cada uno de los factores un análisis creativo de selección teniendo en cuenta, el criterio de la experiencia en servicios de telecomunicaciones, las categorías conceptuales de la SLR y las tendencias

tecnologías del mercado definidas por *Gartner* en el 2021, a continuación, se relacionan los criterios seleccionados para la aplicación del método AHP en la Tabla 13.

<b>Factores</b>	<b>Criterios</b>
<b>Económico</b>	Costo del equipamiento
	Costo de implementación
	Costo de administración
	Vida Útil
<b>Tecnológico</b>	Soporte protocolo <i>Open Flow</i>
	Integración con VNF's
	Funciones de seguridad
	Funciones de calidad en servicio
	Observabilidad
	Geolocalización de componentes
<b>Infraestructura</b>	Interoperabilidad
	Rendimiento
	Flexibilidad
	Escalabilidad
<b>Diseño SDN for IoT</b>	Modelo Overlay-Based
	Modelo Fabric-Based

**Tabla 13. Criterios de selección**

Para relacionar las alternativas SDN existentes en el mercado, se realizó la revisión de las soluciones tecnológicas enmarcadas en el cuadrante mágico de *Gartner* del 2021 y se incluyó la tecnología con mayor avance en su desarrollo bajo licencia GPL a fin de brindar el análisis vinculando a las tecnologías de software libre.

El cuadrante mágico de *Gartner* es un estudio de mercado específico que entrega un panorama de los competidores y posicionamiento del mercado del año en el cual se analiza; bajo esta óptica es posible determinar cuál proveedor de la tecnología se está desempeñando mejor, en qué nicho se posiciona y cómo es su evolución en el tiempo. Las alternativas seleccionadas están en el cuadrante de líderes por su madurez tecnológica, su desempeño y su posicionamiento en el mercado (*Gartner*, 2021), ver Tabla 14.

Figure 1: Magic Quadrant for WAN Edge Infrastructure



Source: Gartner (September 2021)

Figura 20. Gartner 2021

<b>Alternativas</b>	<b>SDN FORTINET</b>
	<b>SDN VMWARE</b>
	<b>SDN CISCO</b>
	<b>SDN OPENDAYLIGHT</b>

Tabla 14. Alternativas seleccionadas

### Estructuración del problema, niveles de decisión, estableciendo grupos de criterios

El proceso de estructuración se realiza a partir de la descripción de cada uno de los criterios y un análisis exploratorio de las alternativas de decisión. Una vez se cuente con esta información se procede con la creación del árbol de decisión el cual representa gráficamente la estructura jerárquica para tomar la decisión, este árbol debe quedar definido en niveles y el peso de los criterios está condicionado por el intérprete para decidir su posición.



A continuación, se procede a describir cada uno de los criterios de selección, de acuerdo con sus aspectos y fundamentado en la revisión bibliográfica.

**Factor económico:** éste es un criterio de primer nivel, pues define los aspectos relacionados con la capacidad económica, el precio y la importancia financiera que requieren las organizaciones para determinar la adquisición de las deferentes tecnologías.

En un subnivel se encuentran los criterios de selección que están relacionados en el aspecto económico y los cuales son relevantes para el análisis de selección, todos fueron adaptados a la escala de Saaty para poderlos ponderar.

**Costo de equipamiento:** es el valor y el esfuerzo que tiene que realizar la compañía para adquirir la tecnología, el equipamiento puede ser adquirido en la modalidad de compra CAPEX o como servicio OPEX, en ambas modalidades se debe contemplar un presupuesto durante un periodo de tiempo determinado, para cubrir esta necesidad las organizaciones diseñan un RFQ que tiene con fin realizar un estudio de mercado con los proveedores invitados y en nuestro ejercicio tiene el objetivo de valorar la medida o esfuerzo que representa adquirir cada alternativa.

**Costo de implementación:** es el valor que representa el pago de los servicios profesionales para su implementación, en el caso de nuevas tecnologías esto es elevado por el poco nivel de experiencia por parte de las empresas que se dedican a su implementación y el objetivo en este análisis es establecer cómo este criterio afecta la decisión de selección de la tecnología.

**Costos de administración:** es el esfuerzo económico que debe realizar las organizaciones para asegurar que la tecnología opere correctamente, este criterio recoge los costos asociados a contratación de personal experto, capacitación de personal interno y transferencias de conocimiento periódicas. Su objetivo es reconocer la afectación que estos costos pueden tener en la selección de las alternativas

**Vida útil:** este criterio mide la variable del tiempo de vida útil de los elementos que componen la SDN para este caso específico. Este criterio es uno de los más importantes para la selección de las tecnologías, pues los fabricantes normalmente estiman desde el lanzamiento de sus tecnologías el tiempo en el cual podrían operar y a partir del nivel de adopción de esta tecnología emiten una fecha límite en la cual estarán soportando las actualizaciones. Una organización que no estime el tiempo de vida útil de los equipos adquiridos está expuesta a una grave amenaza para su operación en el tiempo.

**Factor tecnológico:** es el criterio que requiere mayor grado de análisis por parte de los expertos y sustenta su selección de acuerdo con las necesidades de uso específicas de cada tecnología; en este aspecto se deben evaluar las funcionalidades, desempeño, integraciones, servicios ofrecidos, aplicaciones y en particular el soporte técnico de la tecnología para su uso. Para el caso específico de las SDN en un entorno IoT los criterios de selección técnica surgieron a partir de la base conceptual obtenida mediante la SLR que fungen como criterio experto, a continuación, se describen los criterios seleccionados a fin de satisfacer el caso de uso específico abordado en este trabajo de grado.

**Soporte protocolo Open Flow:** se incluye este criterio de selección por ser el componente principal de una SDN según la ONF y componente esencial para el acoplamiento de las funcionalidades observadas en los entornos IoT, como se evidenció en la SLR, el protocolo *Open Flow* tiene la capacidad de modificar las tablas de flujo con las cuales los paquetes

se reenvían de forma adecuada; sirve como mecanismo para incluir protecciones de seguridad y conecta la capa de control con la capa de datos y aplicaciones.

**Integración con VNF's:** siendo las funciones virtualizadas de red, esenciales en la optimización de las SDN, este criterio reconoce la necesidad de incluirlas para la selección de las alternativas.

**Funciones de seguridad:** este criterio de selección de acuerdo con la SLR encamina las soluciones de IoT a mitigar los riesgos de vulnerabilidad en los servicios: La implementación de estas funciones otorgan a los servicios de IoT un mayor grado de confiabilidad para su adopción y su objetivo es medir la capacidad de las alternativas de implementar funciones de seguridad.

**Funciones de calidad en servicio o QoS:** en las redes de datos tradicionales y en las SDN, gracias a la posibilidad de implementar funciones QoS es posible alcanzar un mayor desempeño en la implementación de soluciones IoT. En varios de los modelos considerados en la revisión de literatura (capítulo 3) fue incluido este criterio para la identificación de las alternativas que cuentan con funciones de priorización de tráfico y altos indicadores de calidad de servicio.

**Observabilidad:** para las redes definidas por software es necesario contar con aplicaciones para monitorear la red; éstas apoyan la gestión eficientemente. En entornos IoT contar con un modelo de observabilidad con una capa de analítica, brinda la posibilidad de conocer de primera mano el comportamiento de los servicios y ofrece una mejor prestación del servicio. El objetivo principal de este criterio es identificar qué tecnologías, incluyen el monitoreo de las diferentes variables y aplican técnicas de análisis de datos inteligente.

**Geolocalización de componentes:** más que un criterio de selección es un componente de software importante que deben incluir las tecnologías SDN para entornos IoT. Este componente se considera como un criterio de selección debido a que NO todos los fabricantes incluyen la posibilidad de tener un mapa geolocalizado de los dispositivos de red que apoye a los sistemas de IoT y su objetivo consiste en definir las tecnologías que trabajan en este tipo de servicios.

**Factor de infraestructura:** este aspecto está relacionado con el tipo de infraestructura que deben seleccionar las organizaciones. Este criterio establece las consideraciones mínimas que debería soportar la tecnología para el caso de uso específico, la posibilidad de que la infraestructura permita realizar crecimientos sin afectar su rendimiento o incluir costos adicionales es un plus que todas las organizaciones aprecian. De acuerdo con la revisión de la literatura para entornos IoT cada vez es más frecuente que los proveedores de tecnologías de red ofrezcan la posibilidad de ser interoperables entre ellos y flexibles en sus integraciones, sin perder de vista el rendimiento que deben proporcionar a los servicios IoT; los criterios de selección para este factor son los siguientes:

**Interoperabilidad:** como se ha podido evaluar a lo largo de esta investigación el componente de interoperabilidad en las SDN's es un criterio deseable en la selección de las tecnologías, sin embargo, este criterio depende de la voluntad de los fabricantes. Las SDN's cuentan con un protocolo estándar para garantizar la interoperabilidad. Sin embargo, los fabricantes pueden modificar el protocolo *Open Flow* para ofrecer su tecnología e impidiendo la integración con otros fabricantes. Ese preciso identificar cuáles alternativas permiten la interoperabilidad y son más abiertas con sus competidores.

**Rendimiento:** este criterio está encaminado a garantizar que la tecnología seleccionada cuente con la estabilidad mínima que necesita cualquier sistema y ofrezca la menor cantidad

de fallas posibles en su operación. El objetivo de esta variable es medir el porcentaje de rendimiento que proponen las diferentes alternativas.

**Flexibilidad:** éste es un criterio relevante para la selección de tecnologías SDN; asegura que la alternativa seleccionada cuente con la posibilidad de desarrollar API's para la integración de necesidades adicionales, la conexión con diferentes herramientas y plataformas del cliente. El criterio de selección se postula como el valor agregado que tiene la tecnología para soportar diferentes integraciones, tanto a nivel de protocolos como de servicios ofrecidos.

**Escalabilidad:** cubre la necesidad de crecimiento del sistema SDN y establece las reglas de juego para su expansión, este criterio es importante para los proveedores de servicio que adoptan estas tecnologías para proporcionar diferentes servicios y en los entornos IoT suministra la posibilidad de incrementar la red de dispositivos tanto como la tecnología lo permita. Su objetivo es proporcionar al evaluador las capacidades máximas de crecimiento en una SDN.

**Factor de diseño SDN-IoT:** este factor de decisión se incluyó en concordancia con el enfoque del director ejecutivo de *OpenDaylight*, Neela Jacques, para quien el contexto SDN se refiere a la creación de redes virtuales, lógicas que son desvinculadas del hardware. Para ello propone dos modelos de virtualización: modelo *Overlay-Based* y modelo *Fabric-Based* los cuales definen la forma en la que operan las SDN's (Citrix Systems, 2015). Para los entornos IoT es fundamental reconocer sobre cuál modelo está diseñada la SDN; dependiendo de este diseño se pueden presentar mayores retos en la adopción de la tecnología y el despliegue de las funcionalidades.

**Modelo *Overlay-Based*:** consiste en el diseño de virtualización de red basado en la superposición, que funciona a partir de la generación de los túneles. Uno de los componentes de la solución son *switches* virtuales que se despliegan en toda la red y hacen túneles entre ellos, no en los dispositivos físicos. También despliega la red subyacente que es un conjunto de redes virtuales consistentes en túneles que corren en una capa lógica superior llamada *overlay*. Esto a menudo se conoce como red superpuesta y se utiliza para encapsular el tráfico que transita por los dispositivos desde los equipos de acceso hasta los equipos de enrutamiento. Este tipo de diseño utiliza protocolos de encapsulación incluyen VXLAN, NVGRE y STT y su plano de control de implementa sobre motores de orquestación VCloud (Citrix Systems, 2015). ¿Este diseño de superposición de red cumple con las expectativas de red para soluciones IoT?

**Modelo *Fabric-Based*:** se conoce como un diseño de virtualización de red con la visión que tiene ONF sobre SDN. Este modelo se aplica a través de una aplicación que se ejecuta en un controlador SDN, la cual se comunica con los dispositivos de red subtendidos. En este modelo propuesto las redes virtuales se definen por políticas que asignan flujos a la red virtual apropiada basándose en las porciones L1-4 (etiquetas de cabecera). El controlador SDN implementa estas redes virtuales mediante la configuración de reenvío de tablas de flujo en dispositivos físicos de red utilizando un protocolo común hacia el sur, como Open Flow (Citrix Systems, 2015). ¿el modelo basado en protocolo Open Flow satisface las necesidades de red de una solución IoT?

Una vez conocidos los criterios de selección y sus niveles jerárquicos el siguiente paso es definir las alternativas propuestas para la evaluación con el método AHP. Para cumplir con esta actividad se dispuso a seleccionar los 3 fabricantes más reconocidos en el sector de

las tecnologías SDN sustentado por el cuadrante mágico de Gartner en su versión 2021. Las alternativas seleccionadas cumplen con las condiciones mínimas de evaluación de fabricantes para productos SDN conocidos como SD-Branch según (Andrew Lerner, 2021) de *Gartner*.

Los productos *SD-branch* permiten gestionar múltiples funciones de red en diferentes o nodos y los productos SD-branch deben ser compatibles con:

- Funciones de red; Puertas de enlace WAN, conmutación por cable, WLAN y cortafuegos.
- Configuración, políticas, informes, visibilidad y automatización unificados en las funciones, a través de una sola consola.
- Configuración sin contacto para el aprovisionamiento inicial y tareas operativas automatizadas, como solución de problemas, informes movimientos, adiciones, cambios típicos.
- Una API totalmente respaldada, documentada y publicada.

Las soluciones SD-branch pueden ser de un solo proveedor o de múltiples proveedores; sin embargo, en la práctica, anticipamos que la mayoría de las empresas finalmente intentarán que las implementaciones sean de un solo proveedor.

Partiendo de las premisas del estudio de mercado y asociándolas en conjunto con las necesidades mínimas de una arquitectura de red para IoT a continuación se describen las alternativas seleccionadas.

**SDN Fortinet:** esta solución ofrece un enfoque amplio, integrado y automatizado para servicios de red y seguridad, permite la expansión de la SDN sin problemas ofreciendo un rendimiento y fiabilidad en los servicios. La SDN de *Fortinet* proporciona un punto de control centralizado, su propuesta de diseño está enmarcada sobre el modelo *overlay-based* que consiste en la superposición de la redes virtualizadas a través de túneles, cuenta con funciones de seguridad robustas y calidad de servicio a partir del mecanismo de *aware routing* que consiste en la técnica de inspección de paquetes para priorizar y asegurar el tráfico de red. Los principales beneficios de la solución *Fortinet SD-Branch* provienen de mejorar la seguridad en los nodos y las políticas globales que se aplican en todos los nodos y para todos los dispositivos. La solución SDN de *Fortinet* acelera la convergencia de red y seguridad de las organizaciones, el enrutamiento avanzado, Firewall de última generación, proxy de acceso, *Zero Trust Network Access (ZTNA)*. (Fortinet INC, 2021).

**SDN VMware:** ofrece una arquitectura de red SDN controlada de forma centralizada que implementa funciones de seguridad, de red virtualizadas y define la calidad de servicio a partir de la modificación de las tablas de flujo. Su propuesta está enmarcada en el modelo *fabric-Based* el cual adapta el protocolo *Open Flow* a sus servicios de red desacoplando el plano de control del plano de datos. Entre sus principales beneficios esta su ambiente

100% virtualizado con despliegue de infraestructura en nube o en premisas de la organización bajo el mecanismo de instancias virtuales, esto permite seleccionar diferentes fabricantes de hardware para el despliegue de su tecnología, su modelo de arquitectura está basada como servicio, ofrece confiabilidad y alto rendimiento incluyendo la flexibilidad de automatizar aplicaciones de red a través de API's. La solución SDN Velocloud potencia el rendimiento de la red a partir de la orquestación y observabilidad de los servicios de basados en técnicas de *machine learning*. Para más información ver (Sanjay et al., 2018).

**SDN Cisco:** esta solución es una superposición de la red tradicional, que Integra completamente componentes de red como el enrutamiento, la seguridad, la política centralizada y la se define bajo la orquestación a gran escala. Esta arquitectura es multi inquilino, desplegada en la nube de cisco, altamente automatizado, escalable y consciente de las aplicaciones con análisis enriquecidos. Su propuesta de diseño está enmarcada sobre el modelo *overlay-based* que consiste en la superposición de la redes virtualizadas a través de túneles con la capacidad de conexión del plano de datos con el plano de control que está en la nube, permite la flexibilidad en la implementación, cuenta con funcionalidades de seguridad como cifrado sólido de datos, segmentación de red de extremo a extremo, identidad de certificado de controlador y enrutador con un modelo de seguridad de confianza cero, protección del plano de control, firewall de aplicaciones e inserción de *Cisco Umbrella*, firewalls. La solución SDN de Cisco (ACI y SDWAN) permite la visibilidad y reconocimiento de aplicaciones bajo reglas consientes de análisis enriquecido. Para más información ver (Gooley Jason, 2021).

**SDN Opendaylight:** esta solución es un proyecto de código abierto GPL por sus siglas en inglés, con el objetivo de acelerar el desarrollo de las redes definidas por software, el proyecto Opendaylight (ODL) pretende convertirse en la plataforma abierta más utilizada por las organizaciones cuando deseen adoptar las tecnologías SDN, su arquitectura está definida por la virtualización en nube, incluye un controlador SDN *Open Flow* que consiste en un conjunto de módulos que contienen *plugins*, encargados de la comunicación de los protocolos de red y las aplicaciones. El nivel de abstracción de ODL se consigue usando un conjunto de tecnologías externas encargadas de la arquitectura digital por modelos. Para la conexión con el plano de datos cuenta con la optimización del protocolo *Open Flow* adecuando un sistema operativo para los equipos de red. Su propuesta está enmarcada en el modelo *fabric-Based* el cual adapta el protocolo *Open Flow* a sus servicios de red desacoplando el plano de control del plano de datos. Los principales beneficios de la solución ODL provienen de la posibilidad de programar y desarrollar la SDN de acuerdo con las necesidades de la organización o el caso de uso específico, la solución SDN de *opendaylight* trabaja con el lenguaje YANG utilizado para modelar los datos de configuración y estado de los dispositivos de red, también incluye el protocolo RESTCONF el cual proporciona una interfaz sobre HTTP para acceder a los datos definidos por YANG. Para más información ver (BERNAT, 2015).

Una vez estructurado jerárquicamente el problema se procede a representar gráficamente el árbol de decisión para el inicio de los cálculos matemáticos de la metodologías AHP, en el proceso de representación gráfica se debe determinar los niveles jerárquicos y definir

las conexiones para el análisis comparativo posterior a continuación en la Figura 21 se presenta el árbol de decisión para este procedimiento de evaluación técnica de una red definida por software orientada a un entorno IoT.

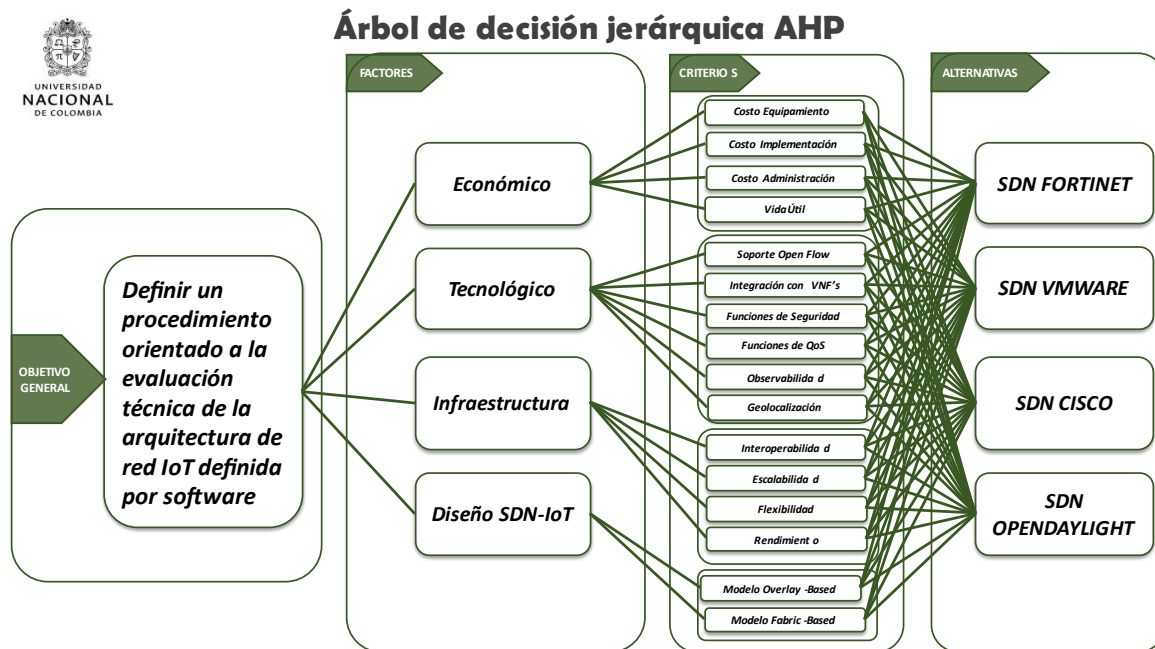


Figura 21. Árbol de decisión AHP

### Establecimiento de las prioridades entre los criterios

En este paso incluye dos actividades: la primera es la construcción de las matrices de comparación para la ponderación de los factores con referencia al objetivo general y la segunda, la ponderación de los criterios con relación a cada uno de los factores. Para ello se llevó a cabo la generación de las matrices recíprocas y posteriormente se realizó la normalización de las matrices con el fin de encontrar el vector de prioridad tal como lo explica la teoría de Saaty en la metodología AHP que se encuentra en la sección de aspectos metodológicos en la pág. 29. Esta etapa consiste en la valoración de importancia que tienen cada uno de los factores para la resolución del problema general y establece el proceso matemático para la obtención de la ponderación. El análisis matemático se encuentra definido en la metodología.

Matriz de comparación de factores por pares:

OBJETIVO GENERAL	FACTORES	Económico	Tecnológico	Infraestructura	Diseño SDN for IoT
	Económico	1	1/2	1/2	3
	Tecnológico	2	1	2	2

<b>Infraestructura</b>	2	1/2	1	2
<b>Diseño SDN for IoT</b>	1/3	1/2	1/2	1
	5,33	2,50	4,00	8,00

Tabla 15. Matriz de factores

Matriz de normalización de factores:

<b>Matriz Normalizada (N)</b>				<b>Vector prioridad (w)</b>
<b>Económico</b>	<b>Tecnológico</b>	<b>Infraestructura</b>	<b>Diseño SDN for IoT</b>	
<b>0,1875</b>	0,2000	0,1250	0,3750	0,2219
<b>0,3750</b>	0,4000	0,5000	0,2500	0,3813
<b>0,3750</b>	0,2000	0,2500	0,2500	0,2688
<b>0,0625</b>	0,2000	0,1250	0,1250	0,1281
<b>1,00</b>	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabla 16. Matriz normalizada de factores

Una vez obtenido el vector de prioridad se realizó el análisis de consistencia y posteriormente se estableció la ponderación por peso para cada factor.

### Análisis de Consistencia

	<b>MxW</b>	<b>R</b>	<b><math>\lambda</math> máx</b>	<b>CI</b>	<b>CR=CI/RI</b>	
<b>FACTORES</b>	<b>Económico</b>	0,9313	4,1972	4,2177	0,0726	8,23%
	<b>Tecnológico</b>	1,6188	4,2459			
	<b>Infraestructura</b>	1,1594	4,3140			
	<b>Diseño SDN for IoT</b>	0,5271	4,1138			
<b>Suma</b>	<b>4,24</b>	<b>4</b>	4,217715	0,072572	8,228074	

Tabla 17. Consistencia de los factores

Según el cálculo de consistencia realizado bajo la metodología AHP, para una matriz de 4X4, cuyo cálculo matemático del resultado del *ratio* de consistencia CI sea inferior al 10% se define la matriz como consistente. Esta evaluación se debe realizar para garantizar que los juicios emitidos sean coherentes.

El peso obtenido para cada uno de los factores es el siguiente:

FACTORES			
Económico	Tecnológico	Infraestructura	Diseño SDN for IoT
<b>22%</b>	<b>38%</b>	<b>27%</b>	<b>13%</b>

Tabla 18. Ponderación de factores

Para la segunda actividad se procedió a realizar la ponderación de los criterios bajo la misma metodología aplicada en la primera actividad, pero esta vez con el análisis de segundo nivel frente a cada uno de los factores, paso seguido, se relacionan las tablas con las diferentes matrices de comparación en el orden de factores.

Factor Económico	Matriz Normalizada Criterios				
	Equipamiento	Implementación	Administración	Vida Útil	Vector Prom $\bar{w}$
Equipamiento	0,23	0,35	0,38	0,21	0,291
Implementación	0,03	0,05	0,03	0,07	0,044
Administración	0,05	0,15	0,08	0,09	0,090
Vida Útil	0,69	0,45	0,53	0,63	0,574
Total	1,00	1,00	1,00	1,00	100

Tabla 19. Matriz F. Económico/Criterios

Tecnológico	Matriz Normalizada Criterios						
	Open Flow	VNF's	Seguridad	QoS	Observabilidad	Geolocalización	Vector Prom $\bar{w}$
Open Flow	0,14	0,54	0,07	0,06	0,13	0,19	0,172
VNF's	0,03	0,11	0,64	0,06	0,13	0,19	0,210
Seguridad	0,42	0,04	0,21	0,56	0,26	0,37	0,307
QoS	0,42	0,32	0,07	0,19	0,13	0,19	0,249
Observabilidad	0,05	0,04	0,04	0,06	0,04	0,01	0,045
Geolocalización	0,05	0,04	0,04	0,06	0,30	0,06	0,045
Total	1,09	1,07	1,00	1,00	1,00	1,00	100

Tabla 20. Matriz F. Tecnológico/Criterios

Infraestructura	Matriz Normalizada Criterios				
	Interoperabilidad	Rendimiento	Flexibilidad	Escalabilidad	Vector Prom $\bar{w}$
Interoperabilidad	0,21	0,20	0,24	0,33	0,244



<b>Rendimiento</b>	0,62	0,60	0,02	0,54	0,446
<b>Flexibilidad</b>	0,10	0,09	0,12	0,02	0,083
<b>Escalabilidad</b>	0,07	0,12	0,61	0,11	0,227
<b>Total</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	100

Tabla 21. Matriz F. Infraestructura/Criterios

Diseño SDN-IoT	Matriz Normalizada Criterios		
	Modelo Overlay-Based	Modelo Fabric-Based	Vector Prom $\bar{w}$
Modelo Overlay-Based	0,25	0,25	0,250
Modelo Fabric-Based	0,75	0,75	0,750
<b>Total</b>	1,00	1,00	1,00

Tabla 22. Matriz F. Diseño SDN-IoT/Criterios

Los pesos obtenidos para los criterios, una vez generadas las matrices de comparación pareadas, son los siguientes:

	FACTORES															
	Económico				Tecnológico						Infraestructura				Diseño SDNIoT	
PESO	29 %	4 %	9 %	57 %	17 %	20 %	30 %	24 %	5 %	5 %	24 %	45 %	8 %	23 %	25 %	75 %
<u>CRITERIOS</u>	Costo del equipamiento	Costo de implementación	Costo de administración	Vida Útil	Soporte protocolo <i>Open Flow</i>	Integración con VNF's	Funciones de seguridad	Funciones de calidad en servicio	Observabilidad	Geolocalización de componentes	Interoperabilidad	Rendimiento	Flexibilidad	Escalabilidad	Modelo Overlay-Based	Modelo Fabric-Based

Tabla 23. Tabla de ponderación de criterios

### 3.2 Análisis pareado de alternativas

Mediante el mismo mecanismo de evaluación de factores y de criterios se realizó la construcción de las 16 matrices de comparación para las 4 alternativas, frente a los 16 criterios de selección.

Una vez se obtuvieron, se construyeron las matrices de normalización y se calcularon los vectores promedio siguiendo la teoría de análisis usada; la consistencia de estas matrices fue evaluada, reformulando las decisiones con base en la tabla de valoración directa que suministra Saaty en su metodología AHP. La ponderación matemática de cada una de las alternativas estuvo sujeta a la evaluación de cumplimiento de cada uno de los criterios de decisión, en la Tabla 24 se entrega el resumen de ponderación a cada una de las alternativas.

FACTORES	CRITERIOS	<u>ALTERNATIVAS</u>	SDN FORTINET	SDN VMWARE	SDN CISCO	SDN OPENDAYLIGHT
		Económico	Costo del equipamiento	15%	23%	56%
Tecnológico	Costo de implementación	15%	22%	18%	44%	
	Costo de administración	7%	14%	48%	31%	
	Vida Útil	22%	32%	29%	17%	
	Soporte protocolo <i>Open Flow</i>	5%	38%	22%	35%	
	Integración con VNF's	9%	27%	9%	55%	
	Funciones de seguridad	57%	13%	23%	7%	
	Funciones de calidad en servicio	26%	24%	34%	16%	
Infraestructura	Observabilidad	30%	55%	10%	4%	
	Geolocalización de componentes	35%	30%	21%	15%	
	Interoperabilidad	9%	27%	9%	55%	
Diseño SDN-IoT	Rendimiento	17%	48%	30%	5%	
	Flexibilidad	14%	26%	11%	49%	
	Escalabilidad	49%	31%	13%	8%	
	Modelo Overlay-Based	51%	10%	30%	10%	
	Modelo Fabric-Based	6%	33%	10%	51%	

Tabla 24. Tabla de ponderación de alternativas

### Determinación de la mejor alternativa

En esta etapa se realizan 3 análisis definidos por la metodología AHP, el primero consiste en construir una matriz de priorización a partir de los pesos ponderados en la evaluación de cada una de las alternativas propuestas frente a la matriz de los pesos ponderados por cada criterio de selección, una vez se construya la matriz se realiza una suma producto de las dos matrices relacionadas a esto se le denomina el vector de priorización del análisis según AHP, con este vector es posible interpretar la alternativa que cumple las expectativas propuestas bajo todos los criterios de selección expuestos en la metodología, es importante resalta que el puntaje arrojado arroja la dominancia de la alternativa sobre las otras.

ALTERANTIVAS	PRIORIZACION
SDN FORTINET	0,870
SDN VMWARE	1,170
SDN CISCO	0,937
SDN OPENDAYLIGHT	1,023

Tabla 25. Tabla de priorización resumida

El segundo análisis consiste en la determinación de la mejor tecnología utilizando el software de análisis de sensibilidad *Expert Choice*, esta herramienta es opcional y sirve como alternativa para observar la jerarquía del modelo AHP, entregando la dominancia de cada uno de los criterios, este análisis tiene la misma valides que la metodología anteriormente aplicada y sirve como apoyo para la convalidación del método, por razones de licenciamiento de esta herramienta no fue posible ejecutar el escenario propuesto pero se invita a la organización que estime aplicar el procedimiento anteriormente definido a que se incluya como parte del presupuesto la adquisición del software. Este análisis de sensibilidad es importante para diferenciar gráficamente los picos que deslumbran con cada fortaleza que tenga las tecnologías evaluadas.

El tercer análisis es la entrega del resultado final y las conclusiones que responden a la alternativa seleccionada.

**Análisis del resultado final:** como parte final del método aplicado se presenta un gráfico con las ponderaciones realizadas a través de la metodología, el cual tiene el fin de mostrar al lector gráficamente la mejor alternativa brindando la posibilidad de visualizar los elementos de decisión que llevaron a la misma. En este punto cabe resaltar que todas las alternativas evaluadas cumplían con las condiciones mínimas de una SDN y los elementos de decisión estuvieron con mayor peso orientados hacia la necesidad de una arquitectura IoT que por sus características requiere unas condiciones mínimas de red para su correcto desempeño.

Las condiciones de red necesarias para un entorno IoT, configuran un reto importante en la selección de tecnologías SDN y la definición de un procedimiento que las asegure es

fundamental para cualquier organización que despliegue una solución de internet de las cosas. Los puntos importantes que se consideraron a lo largo de este trabajo sustentan las fortalezas del procedimiento, donde el pilar de los criterios de decisión estuvo orientado por las categorías conceptuales definidas en la SLR, eliminando la necesidad de la evaluación por parte de expertos multidisciplinares que normalmente deberían seleccionados dichas categorías.

La alternativa que arrojó el método jerárquico de selección multicriterio de Saaty es la SDN del fabricante Vmware, esta tecnología cumple cabalmente con las especificaciones para el caso de uso evaluado, cumple con la condición de interoperabilidad, permite incluir funciones de seguridad y calidad de servicio QoS, además de contar con una madurez tecnológica que le otorga liderazgo actual en el mercado. Esta decisión realizada a través del método AHP confirma la confianza que han tenido en los últimos años las organizaciones de diferentes sectores en este fabricante y reafirma que los estudios de mercado de *Gartner* son una herramienta muy orientadora para la selección de tecnologías, así como la tendencia de los investigadores a desplegar nuevas funcionalidades para las SDN's

Para finalizar se presenta el gráfico de decisión, ver Figura 22.



### Determinación de la mejor alternativa

FACTORES																	
16	Económico				Tecnológico					Infraestructura			Diseño SDN for IoT				
Vector prioridad (w)	22%				38%					27%			13%				
CRITERIOS																	
PONDERACION	29%	4%	9%	57%	17%	20%	30%	24%	5%	5%	24%	48%	8%	23%	25%	75%	
ALTERNATIVAS	Costo del equipamiento	Costo de implementación	Costo de administración	Vida Útil	Soporte protocolo Openflow	Integración con VNF's	Funciones de seguridad	Funciones de calidad en servicio	Observabilidad	Geolocalización de componentes	Interoperabilidad	Rendimiento	Flexibilidad	Escalabilidad	Modelo Overlay-Based	Modelo Fabric-Based	PRIORIZACIÓN
SDN FORTINET	0,153	0,155	0,069	0,220	0,053	0,094	0,571	0,256	0,300	0,352	0,094	0,173	0,143	0,490	0,505	0,062	0,870
SDN VMWARE	0,232	0,216	0,141	0,322	0,378	0,270	0,128	0,242	0,552	0,296	0,270	0,482	0,262	0,305	0,097	0,328	1,170
SDN CISCO	0,555	0,185	0,476	0,288	0,217	0,090	0,231	0,341	0,105	0,206	0,090	0,298	0,107	0,126	0,298	0,096	0,937
SDN OPENDAYLIGHT	0,060	0,444	0,314	0,170	0,352	0,546	0,071	0,161	0,044	0,146	0,546	0,047	0,488	0,079	0,101	0,513	1,023

Figura 22. Tabla de decisión

**Conclusiones y resultado final:** A lo largo del capítulo se trabajó con un método cuantitativo descrito por la metodología AHP, reforzando el análisis cualitativo de selección de la base conceptual a través de la metodología SLR. Desde el inicio del proceso de investigación de este trabajo se fueron esbozando ciertas características que definirían la tecnología a utilizar para solucionar el problema de despliegue de una arquitectura de red definida por software en entornos IoT.

El método presentado en este capítulo es el procedimiento de evaluación técnica producto de esta investigación y al seguirlo rigurosamente fue posible obtener una decisión de carácter multicriterio. Finalmente es un producto que podrá ser aplicado para la toma de decisiones y podría apoyar diferentes desafíos que se planteen sobre las arquitecturas IoT.

Como conclusión se determinó que la alternativa de SDN con software libre aún tiene muchos retos por superar, pero cuenta con el espíritu de colaboración mundial al ser software de libre desarrollo, muy posiblemente si los fabricantes apoyan este tipo de proyectos se podría prescindir del factor económico que conlleva a los altos costos de la implementación de nuevas tecnologías. En cuanto a la alternativa SDN del fabricante Cisco había una expectativa mayor en este análisis, pero la adopción de su modelo de arquitectura SDN basada en la superposición y los túneles, mostraron una valoración que no corresponde a tal expectativa para la selección; al ser unos de los fabricantes más consolidados en el mercado sus costos asociados lo hacen una tecnología poco accesible para cualquier proyecto.

Finalmente el competidor con más alto puntaje obtuvo después de la alternativa seleccionada fue la SDN de *Fortinet* que cuenta con unas fortalezas enormes en los servicios de seguridad y conoce muy bien los servicios de red por ser un fabricante de equipos y seguridad tradicional, sabe cómo manejar el tráfico y aplicar la calidad de servicio, sin embargo, tiene algunos puntos desfavorables como sus falencias de interoperabilidad, no implementa el protocolo *Open Flow* en su arquitectura y aún es usa tecnología poco flexible. No obstante, al no estar orientada a servicios IoT, es una excelente opción como red definida por software en el mercado, con madurez y confianza.

## 4 Emulación de una red SDN adaptada a un entorno de comunicación IoT

Este capítulo tiene el objetivo de validar a través del proceso de emulación una red SDN, bajo el escenario un sistema IoT, para este fin se evaluaron diferentes alternativas de simulación que fueron encontradas en la SLR. El análisis de las herramientas se ubica en el Estado del Arte, sección Revisión sistemática de la literatura, en la página 32 fase de reporte y análisis de resultados; puntualmente la SLR responde a la pregunta si los investigadores emplean herramientas de simulación para validar las SDN, encontrando que durante los años 2013 a 2021 se tuvieron 6 contribuciones enfocadas a la simulación de redes IoT las cuales serán evocadas como soporte teórico para la selección de la herramienta de simulación utilizada.

### 4.1 Definición de la herramienta de simulación

Teniendo en cuenta las contribuciones de los autores, se identificó que la comunidad de investigadores que trabaja el área de las SDN ha construido simuladores como mininet y MaxiNet. La primera herramienta de simulación resuelve a nivel lógico la simulación de una red SDN con conmutadores fijos, controladores programables SDN y desacoplan el plano de control del plano de datos, característica inexorable de este tipo de red, lo que brinda un soporte experimental con mínimos pasos para su ejecución lógica y virtualizada de *clusters* SDN (Lantz & O'Connor, 2015). Por otro lado, la segunda herramienta es una modificación de la herramienta mininet, pero se emplea para grandes escalas, donde ofrece la capacidad de construir de manera virtualizada topologías de centros de datos en un tiempo razonable optimizando los recursos de cómputo disponibles (Wette et al., 2014). Sin embargo, ninguna de las dos herramientas simula entornos de IoT.

Indagando más sobre las herramientas de simulación se encontró una contribución que se planteó demostrar de manera teórica práctica el funcionamiento de un modelo SDN-IoT denominado CORAL-SDN, el cual consiste en satisfacer los desafíos de IoT como lo son la interoperabilidad, la seguridad y la flexibilidad, explorando arquitecturas de redes inalámbricas para sensores adaptadas sobre la SDN (Theodorou & Mamatas, 2017).

Al encontrar este artículo se determinó que el documento sería la hoja de ruta para validar el objetivo propuesto en este trabajo, sin embargo, al revisar detalladamente los autores construyeron un *framework* de simulación de uso específico para una SDN sobre WSN's, utilizando el protocolo *Open Flow*. Su modelo propuesta se apoyó en el desarrollo de una aplicación a la medida para satisfacer sus objetivos de investigación sin publicar a la comunidad la herramienta de software desarrollada para la simulación.

Este documento reconoce que las WSN's son las redes idóneas para servicios IoT, por sus características de movilidad, conexión sobre medios inalámbricos y dedicadas a la

conectividad de sensores. Para el proceso de simulación planteado fue el punto de partida, aceptando artículos que relacionaban simulaciones en redes inalámbricas. Entre ellos se encontró la particularidad que todos usaban la herramienta SDN-WISE, Software de uso libre, probado en proyectos de investigación; Anadiotis et al., 2016 presento un estudio relacionado con el procesamiento de grandes volúmenes de datos sobre una SDN validando su investigación sobre la herramienta de simulación SDN-WISE. En este mismo orden se relaciona la investigación que desarrollo la herramienta SDN-WISE ampliando la información de uso de este software (Galluccio et al., 2015).

### Descripción de la herramienta de simulación

La herramienta de simulación seleccionada para evaluar una red SDN-IoT es SDN-WISE y a continuación se procede a describir brevemente los componentes que conforman este paquete de software, según Galluccio et al., 2015 la herramienta se constituye de los siguientes componentes:

Existen 3 tipos de nodos o motes:

- **Nodo *goals*:** Elemento que almacena preferencias de usuario
- **Nodo *Skills*:** Elemento que tiene la capacidad de modificar el entorno de los nodos *goals*.
- **Nodo *Sink*:** Elemento con perfil de controlador que agrupa los nodos *goals* y realiza los cálculos de red.

**Paquetes SDN-WISE:** como toda herramienta de simulación de red, los nodos cuentan con la capacidad de enviar y recibir paquetes los más usados en esta herramienta son:

- ***Beacon*:** se utiliza para observar que nodos hay en la red y contiene los campos de *Header* (cabecera del paquete) y *Distance* (distancia desde el nodo *sink*)
- ***Data*:** principalmente usado para el envío de información desde el *sink* a los *goals* contiene los campos *Header* (cabecera del paquete) y *Payload* (contenido)
- ***Battery*:** paquete de respuesta que se envía a los nodos *sink*.

La SDN-WISE tiene la capacidad de identificar las siguientes cabeceras en los paquetes:

- **NET:** identificador de red
- **LEN:** identifica tamaño de bytes del paquete
- **DST:** identifica nodo destino del paquete
- **SRC:** identifica nodo de origen del paquete
- **TTL:** identifica tiempo de vida del paquete
- **NXH:** identifica dirección del próximo salto

La herramienta SDN-WISE cuenta con los siguientes módulos para su uso:

- ***File*:** Sirve para crear, guardar o abrir simulaciones

- **Simulation:** modulo para parametrizar las funciones de la simulación
- **Motes:** modulo para la agregación de nodos
- **Tool:** modulo con herramientas útiles para la simulación
- **Settings:** modulo para modificar la configuración de la simulación, cambiar parámetros de orden y de tipo
- **Help:** donde se encuentran los documentos de apoyo de la herramienta

## 4.2 Escenario simulado sobre SDN-WISE

Para esta simulación lo primero que se realizó fue la instalación del paquete de simulación *contiki* el cual está definido como una instancia que se lanza desde una máquina virtual desplegable desde el paquete de software *vmware work station*. Como se muestra en la Figura 23 ya ejecutando la herramienta de simulación se procede a crear el proyecto de simulación de red.

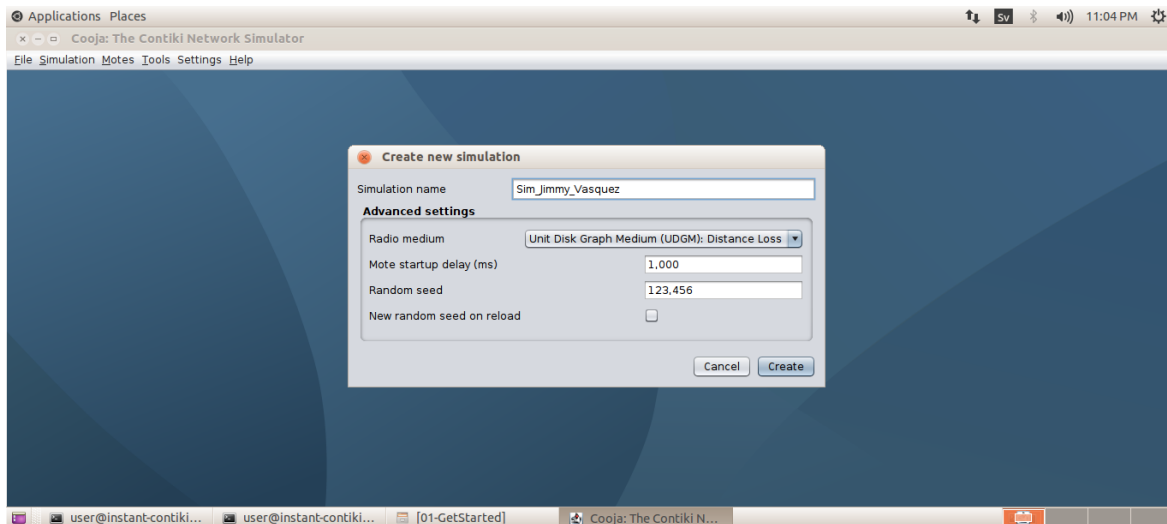


Figura 23. Creación de la simulación

El siguiente paso es definir los parámetros de la simulación como el tiempo de parada, la cantidad de motes, la creación del nodo controlador, la configuración del puerto controlador y la caracterización de las preferencias de los nodos. En la Figura 24, Figura 25, Figura 26, Figura 27, Figura 28, se las propiedades definidas para la simulación.



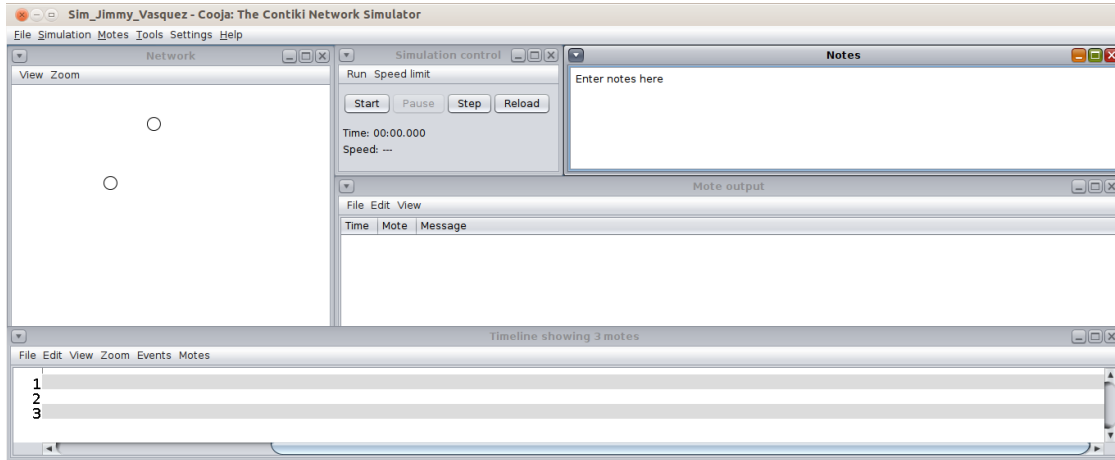


Figura 24. simulación parametrizada

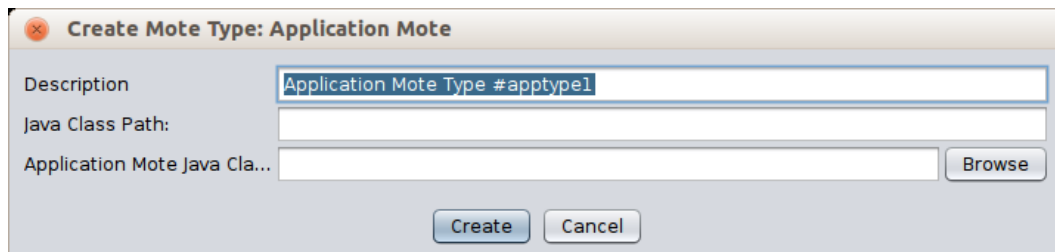


Figura 25. creación de motes

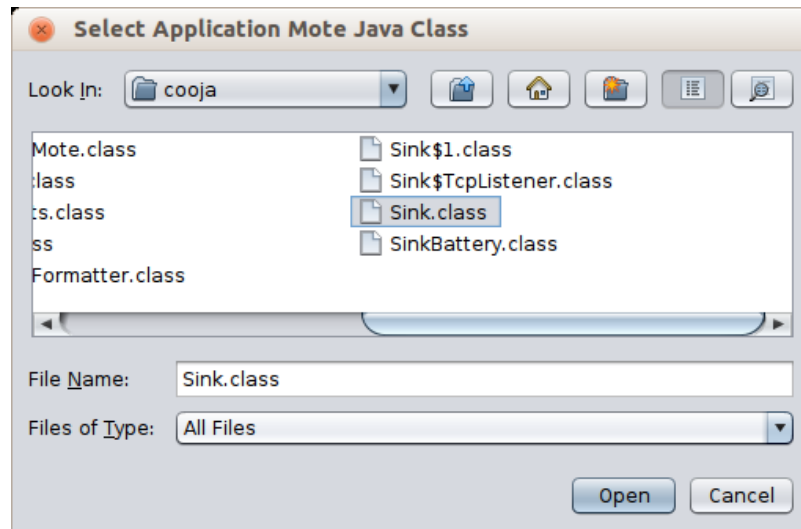


Figura 26. creación del controlador SDN

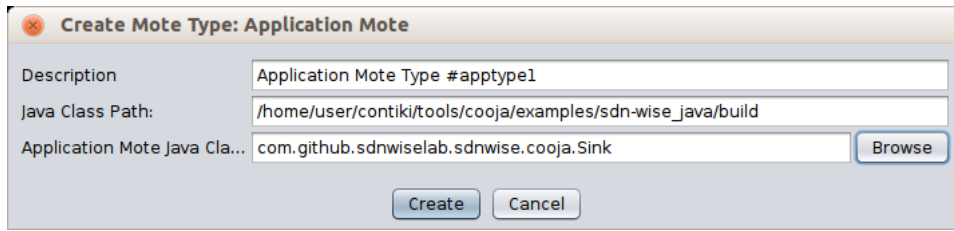


Figura 27. configuración del SDN sink

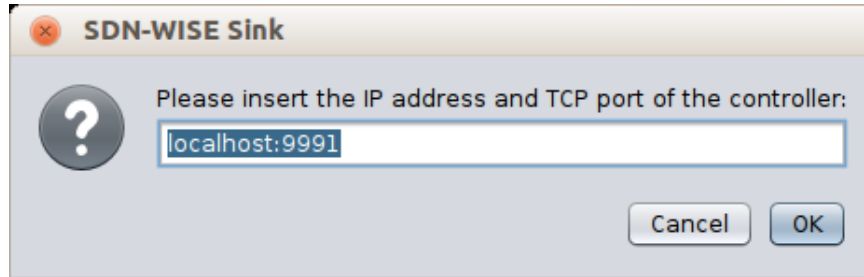


Figura 28. configuración de puerto

En los parámetros de la simulación se configuro que la distancia de los nodos estuviera a 10 metros a razón de simular una conexión inalámbrica bluetooth, dando un parámetro más real de una red inalámbrica a la simulación.

### Elaboración de la simulación

Ya en este punto comienza la simulación de la red SDN-WISE la cual se divide en dos etapas.

1. La herramienta de simulación requiere un tiempo para descubrir todos los nodos y establecer la diagramación o mapa de red SDN, el controlador debe mapear cada uno de los nodos enviando paquetes de prueba de conexión. Ver Figura 29

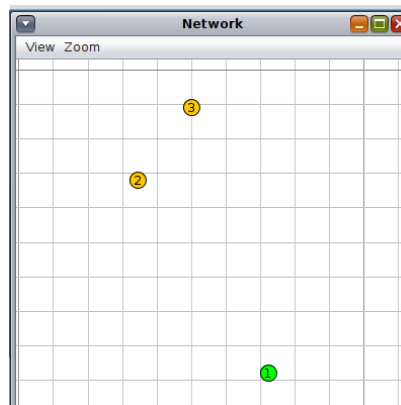


Figura 29. Descubrimiento de red

2. Una vez el nodo *sink* o controlador SDN tenga mapeado todos sus nodos, envía paquetes de tipo Data para preparar la red para el envío de información. Ver Figura 30

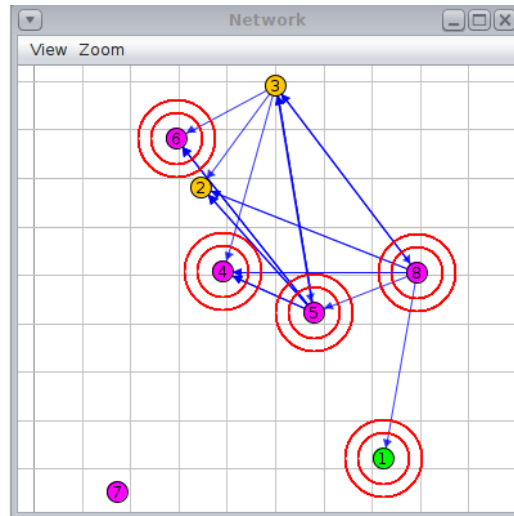


Figura 30. Red mapeada por el SDN

Para la identificación de los nodos en la gráfica es pertinente indicar en que color se ver representados cada uno de los nodos.

**Los nodos *goal*:** son de color naranja y en ellos se permite incluir los atributos de usuario, como temperatura, volumen, luminosidad, energía.

**Los nodos *skill*:** son de color púrpura y son los encargados de recibir los datos de los nodos sink correspondiente al contexto, para un escenario real, este nodo sería la comparación del Gateway IoT o equipo de borde

**Los nodos *sink*:** son de color verde, son el controlador de la red y son los que se encargan de la inteligencia de la red.

Con la red lista para operar se procede a parametrizar los requisitos y propiedades de la red simulada SDN, de esta manera se parametriza la información que envían los nodos IoT. Este paso se realiza para posteriormente analizar la transmisión de paquetes y poder modelar el tráfico bajo mediciones simples como el overhead y la eficiencia de la red.

Dado que la herramienta de simulación SDN-WISE tiene implementado Contiki OS, se usó el protocolo de recopilación disponible en este sistema operativo llamado ETX. Este

protocolo ese utiliza como métrica de enlace y es frecuentemente usado para redes Mesh.<sup>7</sup>

Se detalla que el controlador *sink* determina la ruta más corta entre los nodos usando el algoritmo de Dijkstra, que después de recibir el paquete de reporte, establece una ruta con el costo al menos un 10% inferior. Este umbral está definido por default en la herramienta y evita modificaciones en la tabla de flujo innecesarias debido a la inestabilidad temporal de una red inalámbrica.

En las Tabla 26, Tabla 27 y Tabla 28 se resumen los parámetros utilizados en la simulación aplicados a la topología definida.

**Parámetros SDN-IOT**

<b>Tiempo de espera de retransmisión</b>	60s
<b>Protocolo ND</b>	Collect-based
<b>Métrica de enlace</b>	EXT
<b>Paquete de vecindad</b>	1 por minuto
<b>Algoritmo de cálculo de ruta</b>	Dijkstra
<b>Recalculo de ruta</b>	10%
<b>Tabla de flujo</b>	15 a 20 entradas

Tabla 26. Parámetros de red

**Parámetros de simulación**

<b>topología</b>	<i>Mesh</i>
<b>Numero de nodos</b>	1, 2 ,3, 4, 8, 16, 32, 64, 128
<b>Intervalo de arranque</b>	0,1 s
<b>Numero de sink</b>	1
<b>Tasa del paquete data</b>	1 paquete/segundo CBR
<b>Tamaño del paquete payload</b>	10 bytes
<b>Tiempo de simulación</b>	(2,5) minutos
<b>Contiki MAC check rate</b>	16 Hz

Tabla 27. parámetros de simulación

**Parámetros de consumo de energía**

<b>Corriente de transmisión</b>	21.7 mA
<b>Corriente de recepción</b>	22 mA
<b>Corriente de procesamiento</b>	2.33 mA
<b>Corriente <i>standby</i></b>	0.180 mA
<b>Voltaje de operación</b>	3V

Tabla 28. parámetros de energía del nodo

De las tablas presentadas anteriormente los parámetros de consumo de energía del nodo se usaron los ofrecidos por ejemplos de simulación incluidos en la herramienta, el análisis

<sup>7</sup> ETX. Es una métrica de conteo de transmisión de esperada y se basa en el conteo del numero de beacons enviados y recibidos

de comportamiento del consumo de energía no es objeto de interés para esta investigación; pero se hace necesario mencionar que estos parámetros son modificables.

La Figura 31 presenta la simulación ya ejecutándose en la herramienta SDN-WISE.

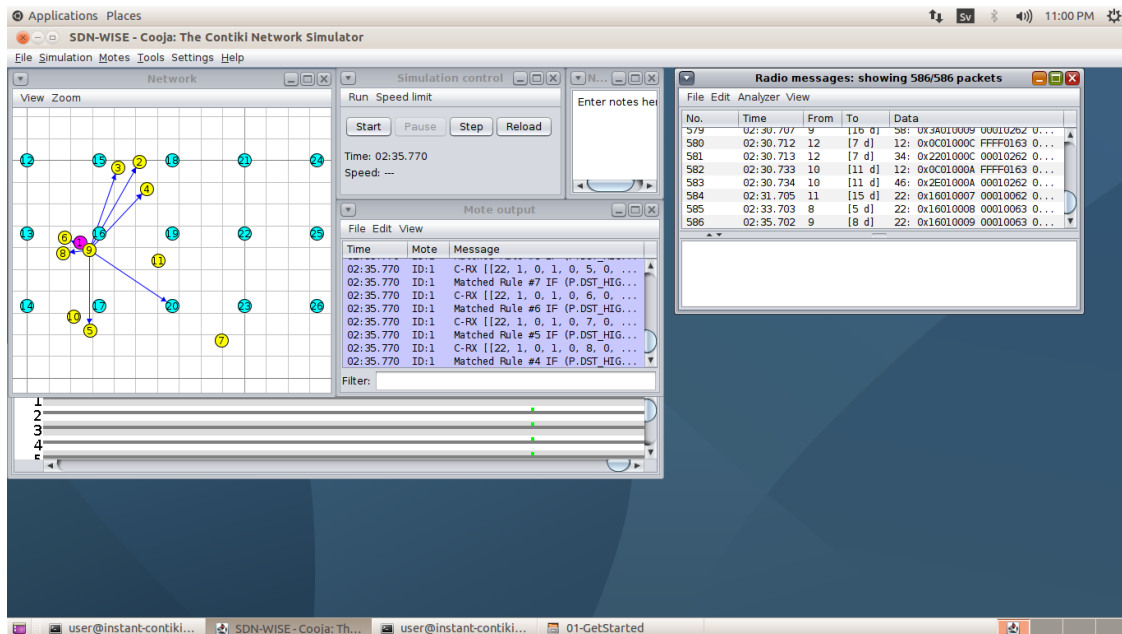


Figura 31. Grafica de simulación

### 4.3 Análisis de resultados

Dentro de la simulación realizada se apreció algunos factores de desempeño de las SDN que son un aporte importante para el entendimiento del funcionamiento de una SDN-IoT. El concepto SDN afirma que las tablas de flujo *Open Flow* del controlador baza el reenvío de paquetes en la comunicación, programado reglas de enrutamiento que se configuran en el plano de control, mecanismo que distribuye el tráfico de red y garantiza el desempeño de esta. Para efecto del análisis en esta simulación se realizó la revisión de las tablas de flujo que se guardan en los reportes de la herramienta, esto representa el log que genera el tráfico en la red SDN.

#### Análisis de sobrecarga en la SDN

El objetivo de este análisis es obtener la tabla de *overhead* de la red que permite medir la cantidad de bytes procesados durante simulación, este análisis permite observar los cambios que se puedan presentar en las redes WSN en relación con la cantidad de nodos y si el porcentaje de procesamiento llega al 95% se considera confiable la red.

SKILL	NODOS								
	1	2	3	4	8	16	32	64	128
1	1419	1535	5247	4430	8436	21410	21062	17434	18853

2	2164	3625	4717	7698	15990	19277	28748	94545	96709
3	2577	7653	9824	3528	7297	15513	35367	25153	27730
4	3869	3644	4409	5515	7744	19409	18445	35700	39569

Tabla 29. Overhead SDN-IoT

A simple vista es posible identificar en la tabla de datos las variaciones para cada nodo Gateway (skill) con relación a los nodos de sensores, esta variaciones son incrementales, pero no de forma exponencial y esto se relaciona con la movilidad y cambios de distancia de los nodos goal con relación a cada Gateway, mostrando el retraso de los paquetes en la red.

También es posible identificar en la gráfica que el nodo skill 4, tiene un alto procesamiento por que tiene que esperar que el controlador busque la ruta más corta para enviar el paquete de modificación de las tabla de flujo cambiando el costo de la distancia para sus nodos agrupados y el crecimiento en el procesamiento de paquetes se incrementa sustancialmente después de asociar 8 nodos goal. Ver Figura 32.

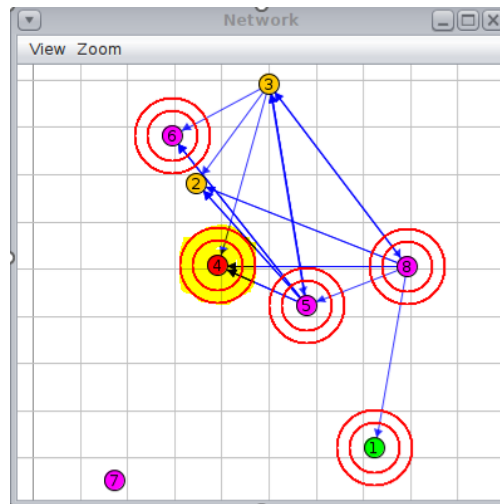


Figura 32. Cambios de enrutamiento

Con la Tabla 29. Overhead SDN-IoT es posible calcular el intervalo de confianza y al modelar estos datos en una gráfica se obtiene el siguiente resultado:

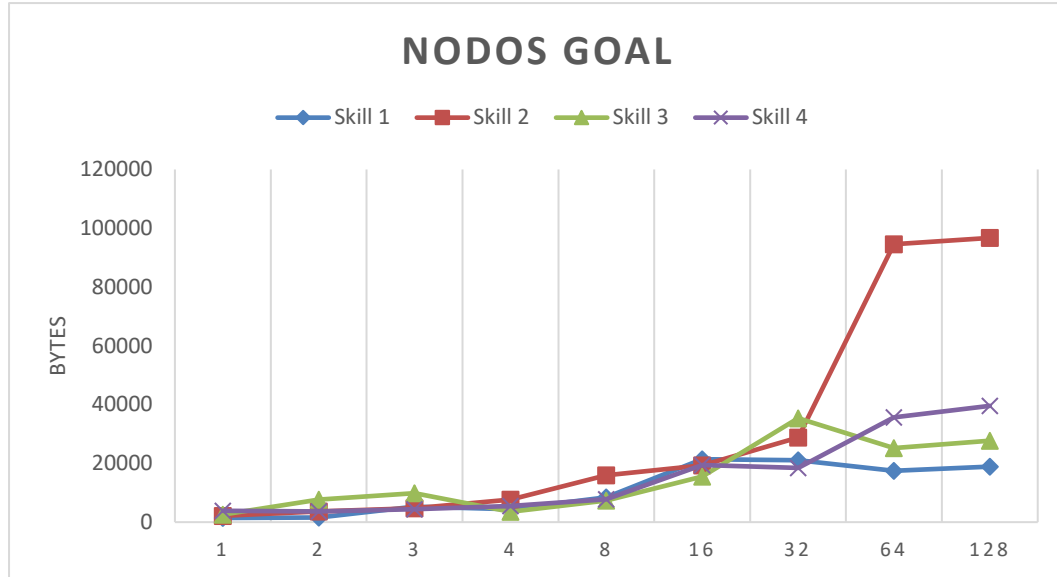
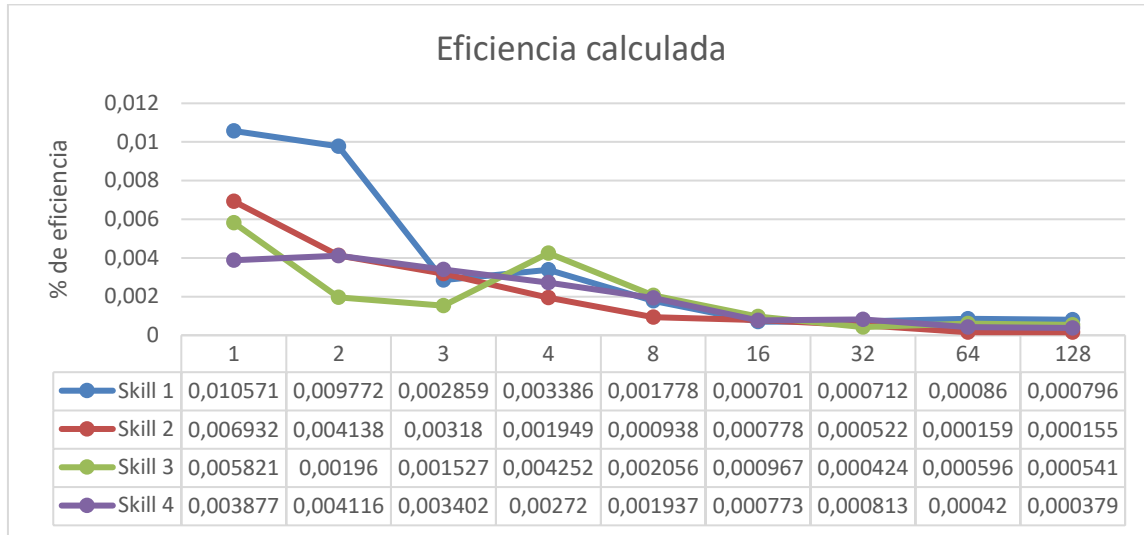


Figura 33. Análisis de sobrecarga

Como se muestra en la Figura 33, a mayor cantidad de nodos, se observa un mayor procesamiento de Bytes en la red, inclusive si estos cambian de nodo *skill*. Este comportamiento para una red inalámbrica es normal, se espera que una vez la red este ordenada se pueda mejorar el procesamiento de datos por cada *skill*. Este procesamiento también traduce en mayor consumo de energía en la red, pues cada nodo tiene un consumo de 2.33 mA por procesamiento. También es posible evaluar en la gráfica que la red se mantiene estable hasta los 32 nodos una vez se supera este umbral el procesamiento se dispara y esto puede deberse a la cantidad de rutas que debe recalcularse el algoritmo Dijkstra para modificar las tablas de flujo *Open Flow*.

### Análisis de eficiencia en la SDN-IoT

Con los datos obtenidos de la simulación se procede a calcular la eficiencia realizando la operación de la cantidad de bytes referentes al perfil creado, dividido sobre el total de bytes enviados por la red. En este caso la eficiencia puede mostrar variaciones dependiendo de que tan cercano se encuentren los nodos y cómo influye si los nodos salen del rango de distancia de la mesh.



**Figura 34. Eficiencia calculada**

En primera instancia los datos obtenidos son almacenados en el proyecto de la simulación. Para el realizar el cálculo de la eficiencia debemos revisar los paquetes enviados hasta que el reporte muestre que empieza a recibir información de contexto como se observa en la Figura 34, a partir del reporte 24 se puede tomar la información útil que envían los nodos *goal* y recibe el nodo *sink*, por lo que se puede apreciar en este escenario existe un total de 15 *bytes* útiles y en el marco del análisis se calcula  $15/4430$  para el *sink* 1 con 4 nodos lo que resulta en la eficiencia con un valor de 0,00339.

```

23 24,1,0.6,0.1,2,98,0.1,1,1,213,29,3
24 24,1,0.6,0.1,2,97,0.1,2,1,213,15,3
25 24,1,0.6,0.1,2,96,0.1,3,1,213,25,3
26 24,1,0.6,0.1,2,95,0.1,4,1,213,5,3
27 21,1,0.3,0.1,2,98,0.1,1,2,213,25,2
28 21,1,0.3,0.1,2,97,0.1,2,2,213,255,2

```

**Figura 35. Reporte de data**

En consecuencia, se calcula la eficiencia con la ecuación matemática propuesta y se muestra los valores obtenidos en la Figura 34. El valor observado para la eficiencia cercano al 0,02 evidencio una eficiencia baja en relación con el perfil de los usuarios y esto se debe a que el controlador *synk* debe realizar de manera constante el mapeo de red en la WSN, consumiendo 2 bytes por reporte. Un análisis adicional concluye que la red tiene una mayor eficiencia hasta los 4 nodos y esto se debe nuevamente al procesamiento que genera una mayor cantidad de nodos.



## Conclusiones

Como el resultado más importante de esta simulación, es posibilidad implementar una SDN en los entornos IoT a través de herramientas de emulación, con las diferentes variaciones que tienen en su comportamiento, a continuación, se relación las conclusiones del escenario validado:

- Con la herramienta SDN-WISE fue explorar el proceso de comunicación que realizan las redes inalámbricas usadas para entornos IoT implementado controladores SDN, realizando la simulación con parámetros definidos manualmente.
- La herramienta muestra que el procesamiento aun es un factor crítico en las redes WSN y que al adaptar una SDN sobre estas redes se debe ser cuidadoso con los cambios de ubicación de los nodos sobre la red pues podría generar problemas de sobrecarga, lo que genera degradación del servicio.
- Con la simulación realizada fue posible identificar que los entornos IoT aún tienen un grado alto de complejidad a nivel de red y asegurar la calidad del servicio mejora la eficiencia del comportamiento de esta.
- La herramienta SDN-WISE no cuenta con la posibilidad de configurar parámetros de seguridad en los proyectos de simulación, construir una herramienta que permita emular el comportamiento de una red con condiciones de seguridad, garantiza una futura orientación en el desarrollos de aplicaciones para las SDN.
- Bajo las limitaciones que tiene la herramienta de simulación es posible afirmar que una solución de red para servicios de internet de las cosas deberá ser interoperable, pues estos servicios están enfocados a condensar una gran cantidad de sensores y requieren flexibilidad para que sean interconectados.
- La simulación, aunque un poco restringida en su modificaciones, demostró que las tablas de flujo son la evolución para la inteligencia de la red.

## 5 Conclusiones y recomendaciones

El mundo de las tecnologías de la información se enfrenta constantemente a procesos de selección y adquisición de nuevas tecnologías, debido a la constante evolución

tecnológica que se ha dado en los últimos 50 años. Aunque existen diferentes mecanismos para el análisis técnico, económico y operacional relacionados con la adquisición de tecnologías, proponer un procedimiento de evaluación es un modelo innovador para las organizaciones, siendo posible proyectarlo a futuro como un servicio de consultoría que sirva de apoyo formal para los procesos de selección y toma de decisiones.

## 5.1 Resultados obtenidos

Esta sección se enfoca a presentar los resultados del proceso de investigación realizado a lo largo de este trabajo, validando el cumplimiento a los objetivos propuestos.

Como objetivo general de este trabajo se planteó: ***definir un procedimiento orientado a la evaluación técnica de la arquitectura de red IoT definida por software***, y el mecanismo para obtenerlo se derivaba en los siguientes objetivos específicos:

### Objetivo específico 1

**En los protocolos de enrutamiento para las SDN se identificará las especificaciones que satisfacen la interoperabilidad, seguridad y calidad de los datos orientados a entornos IoT.**

Este objetivo se cumplió completamente realizando la revisión de la literatura bajo la metodología de Kitchenham, 2007 ubicado en el capítulo del Estado del Arte en la sección 2.1 permitiendo identificar plenamente que los aspectos de interoperabilidad son importantes en los sistemas IoT y confirmando que las funcionalidades de seguridad y calidad de servicio aplicadas a los datos se programan en las redes definidas por software. Por último, se logró satisfacer que para los entornos IoT eran necesarias las SDN's las demostrando que su proceso inherente de abstracción del plano de control y utiliza tablas de flujo para la administración de los paquetes de datos y permite realizar modificaciones en la red asociadas a cada función.

### Objetivo específico 2

***Proponer un procedimiento de evaluación técnica a una arquitectura de red IoT definida por software que cumpla con las expectativas en diseño y atributos.***

Este objetivo fue desarrollado en el capítulo 3 y se logró determinar a través de la metodología AHP, aplicando el modelado del problema específico. No obstante, un componente fundamental para el procedimiento fue la revisión de la literatura previa ya que ella sustentó el análisis del juicio experto necesario para el proceso de evaluación técnica de la SDN. Permitiendo identificar las expectativas y atributos de diseño que debía ofrecer una tecnología SDN para poder ser desplegada en un entorno IoT.

### **Objetivo específico 3**

***Validar el procedimiento desarrollado para una arquitectura de red IoT definida por software.***

Este objetivo se obtuvo en dos etapas la primera consistió en realizar el análisis y selección de una tecnología SDN partiendo de las premisas de diseño mencionadas en el objetivo anterior. El cumplimiento a esta etapa se logró en la sección 3.2, validando la selección de la mejor alternativa actual de SDN y evidencia que el método empleado contempla los criterios de interoperabilidad, funciones de seguridad y calidad de los datos

La segunda etapa se demostró construyendo una simulación que se encuentra en el capítulo 4 como ambiente de prueba, representando de maneja lógica las condiciones de una red SDN en un entorno IoT y demostrando las condiciones de red analizadas a través de los resultados obtenidos.

### **Pregunta de investigación 1**

***¿Las redes definidas por software podrían incrementar la interoperabilidad, seguridad y calidad de la información en las arquitecturas de red IoT?***

Una vez realizado todo el proceso de investigación que recoge este trabajo la respuesta a esta pregunta es contundente. Las redes definidas por software SI incrementan la interoperabilidad, seguridad y calidad de la información, todos estos requisitos se demuestran en el procedimiento de evaluación técnica y en el análisis conceptual de la tecnología SDN.

La posibilidad de hacer una red interoperable es una necesidad que está resuelta con las SDN, que también satisfacen la integración de funcionalidades de red en la SDN, como la seguridad en los datos que representa muchas veces adquirir equipos de propósito específico, costosos y poco escalables.

La capacidad que tiene las SDN de ser programables incrementa las posibilidades de mejoran el desempeño de la red, convirtiéndose en un valor diferencial para los entornos IoT otorgando un mayor rendimiento y eficiencia en la red. Un trabajo futuro de investigación podría relacionarse con la exploración de aplicación de técnicas de inteligencia artificial para la administración de las tablas de flujo con las que se pueda controlar de forma autónoma los servicios de red, dar este paso a nivel en el paradigma de las SDN's elimina la complejidad de programación de la red y permite a los ingenieros enfocarse en otras tareas menos técnicas para la resolución de problemas en redes de datos.

### **Pregunta de investigación 2**

***¿Cuáles son los parámetros técnicos sensibles de evaluación de una arquitectura de red IoT definida por software?***

Los parámetros técnicos sensibles de la evaluación de una arquitectura de red para sistemas IoT fueron identificados mediante la metodología SLR ubicada en la sección 2.1 de este trabajo.

Los parámetros técnicos sensibles de evaluación de una arquitectura son los siguientes:

- Calidad del servicio QoS
- Emuladores de red SDN
- Internet of Things
- Interoperabilidad en SDN
- Protocolo *Open Flow*
- Seguridad sobre SDN
- Software-Defined Network
- Virtualización (Cloud, FOG, Computing)
- VNF(Network Function)

Cada uno de estos parámetros son determinantes al momento de realizar una evaluación técnica de una arquitectura de red SDN-IoT y esto se demuestra con el rendimiento que ofrezca la red, su capacidades y funcionalidades técnicas para su correcto desempeño.

## 5.2 Conclusiones

- La conclusión principal que arroja este proceso de investigación se encuentra en que la comunidad científica enfocada a las arquitecturas IoT, no ha desarrollado procedimientos de evaluación técnicos para las redes SDN que satisfacen las necesidades de un entorno IoT.
- Del procedimiento propuesto se concluye que es un método ideal para la evaluación técnica de redes SDN en escenarios específicos, este método proporciona rigurosidad en la selección de criterios de la evaluación técnica que se realice a la tecnología.
- SDN-IoT es el resultado de la unión contextual de las redes SDN en el paradigma IoT que busca integrar las bondades de una red definida por software a las arquitecturas de IoT, las cuales deben proporcionar perfiles definidos con preferencias definidas por los usuarios y denomina una arquitectura IoT bajo redes definidas por software.
- Incluir el análisis de la literatura proporciona el juicio experto del proceso de decisión, debido a que los investigadores realizan estudios previos de la literatura que fortalecen el análisis conceptual de los criterios evaluados.
- La validación del procedimiento arrojó conclusiones como la selección de la tecnología SDN ideal para un sistema IoT, otorgando la mayor puntuación al fabricante *vmware*, que ha demostrado que su solución de SDN cuenta con los parámetros sensibles al entorno IoT ofreciendo posibilidades de integración con otros proveedores, suministrando paquetes de *software* que pueden ser

desplegados en cualquier hardware que soporte *open Flow* y determinado que cuenta con la madurez para la asociación de NFV's que potencian los servicios de red ofrecidos.

- Considerar la evaluación del estado de la tecnología a través de la revisión de la literatura fue un acierto pues se logró encontrar las categorías conceptuales que soportaron el proceso de investigación y el desarrollo del procedimiento de evaluación técnica. Esta metodología permite valorar científicamente todo el trabajo realizado.
- El uso de las categorías conceptuales como el juicio experto en el diseño del procedimiento formulado permitió afrontar el desarrollo de la metodología de Saaty sin perder en contexto multidisciplinario y propone un método consultivo desde la óptica de la investigación que asegura la fortaleza en los criterios de decisión técnicos.

### 5.3 Recomendaciones

- La recomendación principal para las futuras líneas de investigación es afrontar el desafío de implementar técnicas de *machine learning* y la inclusión de inteligencia artificial en el modelamiento de las tablas de flujo de las SDN, bajo estas técnicas sería posible ofrecer a las SDN autonomía propia para mejorar el desempeño de la red y minimizar la intervención humana en los procesos de gestión de la red enfocando a los ingenieros a resolver temas diferentes a la operación técnicas de las red de datos
- Los entornos IoT requieren mayor investigación en el desarrollo de servicios soportados sobre las SDN's, de esta manera se podrían obtener diferentes parámetros sensibles a las arquitecturas definidas en la actualidad.
- Se requiere desarrollar herramientas de simulación que encaminen sus esfuerzos a crear escenarios de tráfico de red específicos y aseguren que la información procesada en la red es muy cercana a la realidad.
- Se considera que la comunidad científica debe aumentar el interés en el desarrollo de las SDN proponiendo laboratorios de red físicos para construir ambientes de pruebas que permitan desarrollar nuevas aplicación con usabilidad en este tipo de red.

## Bibliografía

- Aggarwal, S., & Kumar, N. (2019). Fog Computing for 5G-Enabled Tactile Internet: Research Issues, Challenges, and Future Research Directions. *Mobile Networks and Applications*. <https://doi.org/10.1007/s11036-019-01430-4>
- Ahmed, A. I. A., Gani, A., Hamid, S. H. A., Abdelmaboud, A., Syed, H. J., Habeeb Mohamed, R. A. A., & Ali, I. (2019). Service management for iot: Requirements, taxonomy, recent advances and open research challenges. *IEEE Access*, *7*, 155472–155488. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2948027>
- Ahmed, E., Yaqoob, I., Hashem, I. A. T., Khan, I., Ahmed, A. I. A., Imran, M., & Vasilakos, A. v. (2017). The role of big data analytics in Internet of Things. *Computer Networks*, *129*, 459–471. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2017.06.013>
- Alaba, F. A., Othman, M., Hashem, I. A. T., & Alotaibi, F. (2017). Internet of Things security: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, *88*, 10–28. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2017.04.002>
- Al-Hubaishi, M. (2019). *Integrating SDN-Enabled Wireless Sensor Networks Into the Internet*. <http://www.iotlab.sakarya.edu.tr/http://www.iotlab>.
- Anadiotis, A.-C. G., Morabito, G., Palazzo, S., & Member, S. (2016). An SDN-Assisted Framework for Optimal Deployment of MapReduce Functions in WSNs; An SDN-Assisted Framework for Optimal Deployment of MapReduce Functions in WSNs. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, *15*. <https://doi.org/10.1109/TMC.2015.2496582>
- Andrew Lerner. (2021). *SD-BRANCH Gartner 2021*. Hype Cycle for Enterprise Networking, 2020 . <https://blogs.gartner.com/andrew-lerner/2020/07/09/sd-branch/>
- Baktir, A. C., Ozigovde, A., & Ersoy, C. (2017). How Can Edge Computing Benefit from Software-Defined Networking: A Survey, Use Cases, and Future Directions. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, *19*(4), 2359–2391. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2717482>
- Bello, O., Zeadally, S., & Badra, M. (2017). Network layer inter-operation of Device-to-Device communication technologies in Internet of Things (IoT). *Ad Hoc Networks*, *57*, 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2016.06.010>
- Bera, S., Misra, S., & Vasilakos, A. v. (2017). Software-Defined Networking for Internet of Things: A Survey. *IEEE INTERNET OF THINGS JOURNAL*, *4*(6). <https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2746186>
- BERNAT, R. (2015). OpenDaylight SDN controller platform. *Tesis*.

- Biolchini, J., Gomes Mian, P., Candida Cruz Natali, A., & Horta Travassos, G. (2005). *Systematic Review in Software Engineering*.
- Bizanis, N., & Kuipers, F. A. (2016). SDN and Virtualization Solutions for the Internet of Things: A Survey. *IEEE Access*, 4, 5591–5606. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2607786>
- Boer, S. J. de (Sirp J. (1989). *Decision methods and techniques in methodical engineering design*. [https://books.google.com/books/about/Decision\\_methods\\_and\\_techniques\\_in\\_methodical\\_engineering\\_design.html?hl=es&id=VnmxAAAACAAJ](https://books.google.com/books/about/Decision_methods_and_techniques_in_methodical_engineering_design.html?hl=es&id=VnmxAAAACAAJ)
- Bojacá Acosta, Jorge. (2004). *XYZ investigación pedagógica. Estado del arte. Semilleros*. Logos-edit.
- Borgia, E. (2014). The internet of things vision: Key features, applications and open issues. *Computer Communications*, 54, 1–31. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2014.09.008>
- Bröring, A., Seeger, J., Papoutsakis, M., Fysarakis, K., & Caracalli, A. (2020). Networking-aware IoT application development. *Sensors (Switzerland)*, 20(3). <https://doi.org/10.3390/s20030897>
- Centeno, A. G., Manuel, C., Vergel, R., & Calderón, C. A. (2014). Controladores SDN , elementos para su selección y evaluación. *Revista Telem@tica*, 13(3), 10–20.
- Chen, B., Wan, J., Shu, L., Li, P., Mukherjee, M., & Yin, B. (2017). Smart Factory of Industry 4.0: Key Technologies, Application Case, and Challenges. *IEEE Access*, 6, 6505–6519. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2783682>
- Chica Pedraza, G. (2012). Estudio y Analisis de la Viabilidad de la Implementacion de Tecnologia PLT UNAL. *Tesis Universidad Nacional de Colombia*.
- Citrix Systems. (2015). *sdn-role-of-application-delivery-network-services-citrix*. Citrix Systems, Inc.
- Čolaković, A., & Hadžialić, M. (2018). Internet of Things (IoT): A review of enabling technologies, challenges, and open research issues. *Computer Networks*, 144, 17–39. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.07.017>
- Creswell, J. W., & Garrett, A. L. (2008). The “movement” of mixed methods research and the role of educators. In *South African Journal of Education*.
- Darabseh, A., & Freris, N. M. (2019). A software-defined architecture for control of IoT cyberphysical systems. *Cluster Computing*, 22(4), 1107–1122. <https://doi.org/10.1007/s10586-018-02889-8>
- Das, R. K., Ahmed, N., Pohrmen, F. H., Maji, A. K., & Saha, G. (2020). 6LE-SDN: An Edge-Based Software-Defined Network for Internet of Things; 6LE-SDN: An Edge-Based

- Software-Defined Network for Internet of Things. *IEEE INTERNET OF THINGS JOURNAL*, 7(8). <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2990936>
- Das, S., Talayco, D., & Sherwood, R. (2013a). Software-Defined Networking and OpenFlow. In *Handbook of Fiber Optic Data Communication: A Practical Guide to Optical Networking: Fourth Edition*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-401673-6.00017-9>
- Das, S., Talayco, D., & Sherwood, R. (2013b). Software-Defined Networking and OpenFlow. In *Handbook of Fiber Optic Data Communication: A Practical Guide to Optical Networking: Fourth Edition* (pp. 427–445). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-401673-6.00017-9>
- DeCusatis, C. (2013). Network Architectures and Overlay Networks. *Handbook of Fiber Optic Data Communication: A Practical Guide to Optical Networking: Fourth Edition*, 321–337. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-401673-6.00013-1>
- El-Mougy, A., Ibnkahla, M., & Hegazy, L. (2015). *Software-defined wireless network architectures for the Internet-of-Things; Software-defined wireless network architectures for the Internet-of-Things*. <https://doi.org/10.1109/LCNW.2015.7365931>
- F. Almeida. (2018). STRATEGIES TO PERFORM A MIXED METHODS STUDY (ALMEIDA). *Open Access Publishing Group*.
- Farris, I., Taleb, T., Khettab, Y., & Song, J. (2019). A Survey on Emerging SDN and NFV Security Mechanisms for IoT Systems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(1), 812–837. <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2862350>
- Felipe, D., & Gómez, B. (n.d.). *OPENFLOW: EL PROTOCOLO DEL FUTURO\** (Issue 93).
- Flauzac, O., Gonzalez, C., & Nolot, F. (2016). Developing a Distributed Software Defined Networking Testbed for IoT. *Procedia Computer Science*, 83(Ant), 680–684. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.04.151>
- Fortinet INC. (n.d.). *Soluciones Secure SD-WAN: Rápidas, escalables & flexibles | Fortinet*. Retrieved August 15, 2022, from <https://www.fortinet.com/lat/products/sd-wan>
- Fortinet INC. (2021). *SD-WAN / SD-Branch Architecture for Enterprise*. <https://blog.fortinet.com>
- Galluccio, L., Milardo, S., Morabito, G., & Palazzo, S. (2015). SDN-WISE: Design, prototyping and experimentation of a stateful SDN solution for Wireless Sensor networks; SDN-WISE: Design, prototyping and experimentation of a stateful SDN solution for Wireless Sensor networks. In *2015 IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*. <https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2015.7218418>



- Gartner. (2021). *Magic Quadrant Gartner*. <https://www.gartner.es/es/metodologias/magic-quadrant>
- Gooley Jason. (2021). Cisco Software-Defined Network. *Copyright © 2021 Cisco Systems, Inc.*
- Guan, Z., Bertizzolo, L., Demirors, E., & Melodia, T. (2021). WNOS: Enabling Principled Software-Defined Wireless Networking; WNOS: Enabling Principled Software-Defined Wireless Networking. *IEEE/ACM TRANSACTIONS ON NETWORKING*, 29(3). <https://doi.org/10.1109/TNET.2021.3064824>
- H. Tobi, & Jarl K. Kampen. (2017). *Research design the methodology for interdisciplinary (Tobi)*.
- Hajian, E., Khayyambashi, M. R., & Movahhedinia, N. (2022). *A Mechanism for Load Balancing Routing and Virtualization Based on SDWSN for IoT Applications*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3164693>
- Hatzivasilis, G., Fysarakis, K., Soultatos, O., Askoxylakis, I., Papaefstathiou, I., & Demetriou, G. (2018). The Industrial Internet of Things as an enabler for a Circular Economy Hy-LP: A novel IIoT protocol, evaluated on a wind park's SDN/NFV-enabled 5G industrial network. *Computer Communications*, 119, 127–137. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2018.02.007>
- Hu, F., Hao, Q., & Bao, K. (2014). A survey on software-defined network and OpenFlow: From concept to implementation. In *IEEE Communications Surveys and Tutorials* (Vol. 16, Issue 4, pp. 2181–2206). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/COMST.2014.2326417>
- Ibrahim Naser, J., & Jawad Kadhim, A. (2020). Multicast routing strategy for SDN-cluster based MANET. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 10(5), 4447–4457. <https://doi.org/10.11591/ijece.v10i5.pp4447-4457>
- Integrated cisco and unix network architectures. (2008). *Equal-Cost Multi-Path (ECMP) Routing*. Chapter 8. Static Routing Concepts. <http://etutorials.org/Networking/Integrated+cisco+and+unix+network+architectures/Chapter+8.+Static+Routing+Concepts/Equal-Cost+Multi-Path+ECMP+Routing/>
- Interoperabilidad - Arquitectura TI*. (n.d.). Retrieved August 5, 2022, from <https://www.mintic.gov.co/arquitecturati/630/w3-propertyvalue-8117.html>
- Jain, V., Yatri, V., Kanchan, & Kapoor, C. (2019). Software defined networking: State-of-the-art. *Journal of High Speed Networks*, 25(1), 1–40. <https://doi.org/10.3233/JHS-190601>
- Jarraya, Y., Madi, T., & Debbabi, M. (2014). A survey and a layered taxonomy of software-defined networking. In *IEEE Communications Surveys and Tutorials* (Vol. 16, Issue 4,

- pp. 1955–1980). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/COMST.2014.2320094>
- Juan.Rodrigo. (2019). *Application-aware routing y SD-WAN*. Teldat Blog - Connectando El Mundo SDWAN. <https://www.teldat.com/blog/es/application-aware-routing-y-sd-wan/>
- Juniper INC. (2014). *Understanding IEEE 802.3ad Link Aggregation*. Technical Documentation - Support - Juniper Networks. [https://www.juniper.net/documentation/en\\_US/junose15.1/topics/concept/802.3ad-link-aggregation-understanding.html](https://www.juniper.net/documentation/en_US/junose15.1/topics/concept/802.3ad-link-aggregation-understanding.html)
- Kamal, Z., Mohammed, A., Sayed, E., & Ahmed, A. (2017). Internet of Things Applications , Challenges and Related Future Technologies Internet of Things Applications , Challenges and Related Future Technologies. *World Scient Ific News*, 67(February), 126–148.
- Karagiannis, V., Chatzimisios, P., Vazquez-Gallego, F., & Alonso-Zarate, J. (2015). A Survey on Application Layer Protocols for the Internet of Things. *Transaction on IoT and Cloud Computing*, 3(1), 11–17. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.51613>
- Kirichek, R., Vladyko, A., Zakharov, M., & Koucheryavy, A. (2016). *Model networks for Internet of Things and SDN; Model networks for Internet of Things and SDN*. <https://doi.org/10.1109/ICACT.2016.7423280>
- Kitchenham, B. (2007). Source: “Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in SE”, Kitchenham et al *Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering*.
- Kitchenham, B., & Brereton, P. (2013). A systematic review of systematic review process research in software engineering. In *Information and Software Technology* (Vol. 55, Issue 12, pp. 2049–2075). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2013.07.010>
- Kobayashi, M., Seetharaman, S., Parulkar, G., Appenzeller, G., Little, J., van Reijendam, J., Weissmann, P., & McKeown, N. (2014). Maturing of OpenFlow and Software-defined Networking through deployments. *Computer Networks*, 61, 151–175. <https://doi.org/10.1016/j.bjp.2013.10.011>
- Kreutz, D., Ramos, F. M. V., Verissimo, P. E., Rothenberg, C. E., Azodolmolky, S., & Uhlig, S. (2015). Software-defined networking: A comprehensive survey. *Proceedings of the IEEE*, 103(1), 14–76. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2371999>
- Kristen Gloss. (n.d.). *IoT authentication and authorization*. How to Use IoT Authentication and Authorization for Security. Retrieved August 16, 2022, from <https://www.techtarget.com/iotagenda/feature/How-to-use-IoT-authentication-and-authorization-for-security>

- Lantz, B., & O'Connor, B. (2015). A Mininet-based Virtual Testbed for Distributed SDN Development. *Computer Communication Review*, 45(4), 365–366. <https://doi.org/10.1145/2785956.2790030>
- Le, N. T., Hossain, M. A., Islam, A., Kim, D.-Y., Choi, Y.-J., & Jang, Y. M. (2016). Survey of promising technologies for 5g networks. *Mobile Information Systems*, 2016, 1–26. <https://doi.org/10.1155/2016/2676589>
- León Garcia, O. (2000). *Tomar decisiones difíciles*. 305.
- Li, G., Wu, J., Li, J., Zhou, Z., & Guo, L. (2018). *SLA-Aware Fine-Grained QoS Provisioning for Multi-Tenant Software-Defined Networks*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2761553>
- Li, X., Li, D., Wan, J., Liu, C., & Imran, M. (2018). Adaptive Transmission Optimization in SDN-Based Industrial Internet of Things With Edge Computing; Adaptive Transmission Optimization in SDN-Based Industrial Internet of Things With Edge Computing. *IEEE INTERNET OF THINGS JOURNAL*, 5(3), 1351. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2797187>
- Liu, Y., Kuang, Y., Xiao, Y., & Xu, G. (2018). SDN-Based Data Transfer Security for Internet of Things. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(1), 257–268. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2779180>
- M. del Socorro García. (2009). *Métodos para la comparación de alternativas SAD*.
- M. Feters, & JF. Molina-Azorin. (2017). The Journal of Mixed Methods Research Starts a New Decade. *Journal of Mixed Methods Research*.
- M. S, G. (2009). *Métodos para la comparación de alternativas SAD. Tesis UPCT*.
- Maimó, L. F., Celdrán, A. H., Perales Gómez, Á. L., García Clemente, F. J., Weimer, J., & Lee, I. (2019). Intelligent and dynamic ransomware spread detection and mitigation in integrated clinical environments. *Sensors (Switzerland)*, 19(5). <https://doi.org/10.3390/s19051114>
- Malcolm Betts. (2014). TR\_SDN\_ARCH\_1.0\_06062014. *Open Networking Foundation*.
- María, J., & Jiménez, M. (2010). *EL PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP)*.
- Marsden., C. T. (2017). Network neutrality: From policy to law to regulation. In *Network neutrality: From policy to law to regulation*. Manchester University Press. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85073492282&partnerID=40&md5=68f85dfe22d42fe7ea6c21f95ec1a225>
- Martinez-julia, P., & Skarmeta, A. F. (2014). Empowering the Internet of Things with Software Defined Networking. *IPv6 for the Internet of Things*. [iot6.eu/sites/default/files/imageblock/loT6 - SDN - IoT.pdf](http://iot6.eu/sites/default/files/imageblock/loT6 - SDN - IoT.pdf)

- McKeown, N., Anderson, T., Balakrishnan, H., Parulkar, G., Peterson, L., Rexford, J., Shenker, S., & Turner, J. (2013). OpenFlow: Enabling Innovation in Campus Networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 38(2), 69. <https://doi.org/10.1145/1355734.1355746>
- Morabito, R., & Jimenez, J. (2020). IETF Protocol Suite for the Internet of Things: Overview and Recent Advancements. *IEEE Communications Standards Magazine*, 4(2), 41–49. <https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.001.1900014>
- Moreno, J. C. (2015). *Estudio de las redes definidas por software y escenarios virtuales de red orientados al aprendizaje*.
- Moreno, J. M. (2012). *EL PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP). FUNDAMENTOS, METODOLOGÍA Y APLICACIONES*.
- Mouradian, C., Naboulsi, D., Yangui, S., Glitho, R. H., Morrow, M. J., & Polakos, P. A. (2018). A Comprehensive Survey on Fog Computing: State-of-the-Art and Research Challenges. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 20(1), 416–464. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2771153>
- Nguyen, K. T., Laurent, M., & Oualha, N. (2015). Survey on secure communication protocols for the Internet of Things. *Ad Hoc Networks*, 32, 17–31. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2015.01.006>
- OSORIO, J. C. O. , J. (2008). Analitic hierarchic process and multicriteria decisión making. Application example. *UTP*.
- Perera, C., McCormick, C., Bandara, A. K., Price, B. A., & Nuseibeh, B. (2016). Privacy-by-Design Framework for Assessing Internet of Things Applications and Platforms. *Proceedings of the 6th International Conference on the Internet of Things - IoT'16*, 83–92. <https://doi.org/10.1145/2991561.2991566>
- Petticrew, M., & Roberts, H. (2005). *Systematic Reviews in the Social Sciences A PRACTICAL GUIDE*.
- R. Burke Johnson, & Anthony J. Onwuegbuzie. (2004). *A research paradigm whose time has come. Educational Researcher (Johnson, R., & Onwuegbuzie)*.
- Rashidi, B., Fung, C., & Bertino, E. (2017). A Collaborative DDoS Defence Framework Using Network Function Virtualization. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 12(10), 2483–2497. <https://doi.org/10.1109/TIFS.2017.2708693>
- Red Hat, Inc. (2018). *¿Qué es la virtualización?* <https://www.redhat.com/es/topics/virtualization/what-is-virtualization>

- Rehmani, M. H., Davy, A., Jennings, B., & Assi, C. (2019). Software Defined Networks-Based Smart Grid Communication: A Comprehensive Survey. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 21(3), 2637–2670. <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2908266>
- Saaty, T. L. (2008a). Decision making with the analytic hierarchy process. In *Int. J. Services Sciences* (Vol. 1, Issue 1).
- Saaty, T. L. (2008b). Decision making with the analytic hierarchy process. In *Int. J. Services Sciences* (Vol. 1, Issue 1).
- Saaty, T. L. (2008c). The Analytic Hierarchy/Network Process. In *Rev. R. Acad. Cien. Serie A. Mat. VOL* (Vol. 102, Issue 2).
- Salman, O., Elhadj, I., Chehab, A., & Kayssi, A. (2018). IoT survey: An SDN and fog computing perspective. *Computer Networks*, 143, 221–246. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.07.020>
- Sanjay, U., Steve. Woo, & Dan, P. (2018). *SD\_WAN\_For\_Dummies\_VMware\_2nd\_SpecialEdition. Book*.
- Serrano, D., & Guerri, J. (2015). *Redes Definidas por Software (SDN): OpenFlow*. 1–43. [https://articulosit.files.wordpress.com/2013/10/sdn.pdf%0Ahttps://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/62801/SERRANO - Redes Definidas por Software \(SDN\): OpenFlow.pdf?sequence=3](https://articulosit.files.wordpress.com/2013/10/sdn.pdf%0Ahttps://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/62801/SERRANO%20-%20Redes%20Definidas%20por%20Software%20(SDN)%20OpenFlow.pdf?sequence=3)
- Sher DeCusatis, C. J., & Carranza, A. (2013). Cloud Computing Data Center Networking. In *Handbook of Fiber Optic Data Communication: A Practical Guide to Optical Networking: Fourth Edition* (pp. 365–386). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-401673-6.00015-5>
- Sikeridis, D., Papapanagiotou, I., Rimal, B. P., & Devetsikiotis, M. (2017). *A Comparative Taxonomy and Survey of Public Cloud Infrastructure Vendors*. <http://arxiv.org/abs/1710.01476>
- Sood, K., Yu, S., & Xiang, Y. (2016). Software-Defined Wireless Networking Opportunities and Challenges for Internet-of-Things: A Review. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(4), 453–463. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2015.2480421>
- Souri, A., Norouzi, M., Asghari, P., Rahmani, A. M., & Emadi, G. (2020). A systematic literature review on formal verification of software-defined networks. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 31(2), 1–23. <https://doi.org/10.1002/ett.3788>
- Souza, R., Dias, K., & Fernandes, S. (n.d.). *NFV Data Centers: A Systematic Review*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2973568>

- Souza, R., Dias, K., & Fernandes, S. (2020). NFV Data Centers: A Systematic Review. *IEEE Access*, 8, 51713–51735. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2973568>
- Sun, X., & Ansari, N. (2016). *EdgeloT: Mobile Edge Computing for the Internet of Things*; *EdgeloT: Mobile Edge Computing for the Internet of Things*. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.1600492CM>
- Taherkordi, A., Zahid, F., Verginadis, Y., & Horn, G. (2018). Future Cloud Systems Design: Challenges and Research Directions. *IEEE Access*, 6, 74120–74150. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2883149>
- Theodorou, T., & Mamatas, L. (2017). *CORAL-SDN: A Software-Defined Networking Solution for the Internet of Things*. <https://www.ansible.com/>
- Tsai, P.-W., Piccialli, F., Tsai, C.-W., Luo, M.-Y., & Yang, C.-S. (2017). Control frameworks in network emulation testbeds: A survey. *Journal of Computational Science*, 22, 148–161. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2017.03.003>
- Vargas, M. G., Galeano Higueta, C., & Jaramillo Muñoz, A. (2015). EL ESTADO DEL ARTE-UNA METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN. *Revista Colombiana de Ciencias Sociales*, 20.
- Varyani, N., Zhang, Z.-L., & Dai, D. (2020). *QROUTE: An Efficient Quality of Service (QoS) Routing Scheme for Software-Defined Overlay Networks*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2995558>
- Velasquez, K., Abreu, D. P., Assis, M. R. M., Senna, C., Aranha, D. F., Bittencourt, L. F., Laranjeiro, N., Curado, M., Vieira, M., Monteiro, E., & Madeira, E. (2018). Fog orchestration for the Internet of Everything: state-of-the-art and research challenges. *Journal of Internet Services and Applications*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s13174-018-0086-3>
- Vučinić, M., Tourancheau, B., Rousseau, F., Duda, A., Damon, L., & Guizzetti, R. (2015). OSCAR: Object security architecture for the Internet of Things. *Ad Hoc Networks*, 32, 3–16. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2014.12.005>
- Wette, P., Dräxler, M., Schwabe, A., Wallaschek, F., Zahraee, M. H., & Karl, H. (2014). *MaxiNet: Distributed Emulation of Software-Defined Networks*. <https://doi.org/10.1109/IFIPNetworking.2014.6857078>
- Wood, T., Ramakrishnan, K. K., Hwang, J., Liu, G., & Zhang, W. (2015). *Toward a software-based network: integrating software defined networking and network function virtualization*; *Toward a software-based network: integrating software defined networking and network function virtualization*. <https://doi.org/10.1109/MNET.2015.7113223>

- Xiong, B., Yang, K., Zhao, J., Li, W., & Li, K. (2016). Performance evaluation of OpenFlow-based software-defined networks based on queueing model. *Computer Networks*, 102, 172–185. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2016.03.005>
- Xu, T., Gao, D., Dong, P., Zhang, H., Heng Foh, C., & Chao, H.-C. (2016). *Defending Against New-Flow Attack in SDN-Based Internet of Things*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2666270>
- Zerifi, M., Ezzouhairi, A., & Boulaalam, A. (2020). *Overview on SDN and NFV based architectures for IoT environments: challenges and solutions; Overview on SDN and NFV based architectures for IoT environments: challenges and solutions*. <https://doi.org/10.1109/ICDS50568.2020.9268779>
- Zhang, X., Yu, S., Zhang, J., & Xu, Z. (2019). Forwarding Rule Multiplexing for Scalable SDN-Based Internet of Things. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(2), 3373–3385. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2882855>
- Zhu, T., Dhelim, S., Zhou, Z., Yang, S., & Ning, H. (2017). An architecture for aggregating information from distributed data nodes for industrial internet of things. *Computers and Electrical Engineering*, 58, 337–349. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2016.08.018>
- Zunino, C., Valenzano, A., Obermaisser, R., & Petersen, S. (2020). Factory Communications at the Dawn of the Fourth Industrial Revolution. *Computer Standards and Interfaces*, 71. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2020.103433>