

# Topología de Malla para la Simulación, Resiliencia a Fallos y Optimización de Redes Virtuales en IoT

## Mesh Topology for Simulation, Failure Resilience and Optimization of Virtual Networks in IoT

Diego Portilla, Wendy Quintana y Matthew Salazar

Departamento de Ciencias de la Computación, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE,  
Sangolquí 171103, Ecuador  
{daportilla1, waquintana, emsalazar1}@espe.edu.ec

### Resumen

Actualmente, el Internet de las Cosas (IoT) está revolucionando la forma en que los dispositivos interactúan y se conectan, aumentando la complejidad en la gestión y optimización de estas redes. Este estudio explora la aplicación de la topología de malla como una solución efectiva para estos desafíos, particularmente en la simulación, optimización de redes virtuales dentro del IoT y resiliencia a fallas. La topología de malla se distingue por su capacidad para conectar todos los dispositivos en una red, ya sea directamente o a través de otros nodos, creando múltiples caminos para la transmisión de datos. Este diseño proporciona ventajas notables, como la reducción de la latencia y el aumento de la resiliencia a fallos, al ofrecer rutas alternativas en caso de que una conexión falle. A lo largo del estudio, se realizaron simulaciones para examinar el comportamiento de esta topología bajo diversas condiciones y configuraciones. Los resultados obtenidos son alentadores: la topología de malla no solo mejora la conectividad y el flujo de datos, sino que también optimiza el consumo de energía, un aspecto crucial en aplicaciones IoT donde la eficiencia es fundamental. Además, se desarrolló un modelo de optimización que ajusta dinámicamente la red, permitiéndole adaptarse a los cambios en la demanda y las condiciones operativas. Este modelo asegura que la red opere de manera óptima, maximizando su rendimiento y minimizando el uso de recursos.

**Palabras Claves:** *Internet de las Cosas (IoT), topología de malla, simulación, latencia, resiliencia, conectividad, flujo de datos, consumo de energía, modelo de optimización.*

### Abstract

Currently, the Internet of Things (IoT) is revolutionizing the way in which devices interact and connect to each other by increasing the complexity in the management and optimization of these networks. This study explores the application of mesh topology as an effective solution to these challenges, particularly in the simulation, optimization of virtual networks within the IoT and fault resilience. This topology is distinguished by its ability to connect all devices in a network, either directly or through other nodes by creating multiple paths for data transmission. This design provides notable benefits, such as reduced latency and increased resilience to failures by offering alternative paths in the event of a connection failure. Throughout the study, simulations were performed to examine the behavior of this topology under various conditions and configurations. The results obtained are encouraging: the mesh topology not only improves connectivity and data flow, but also optimizes energy consumption, a crucial aspect in IoT applications where efficiency is critical. In addition, an optimization model was developed that dynamically adjusts the network by allowing it to adapt to changes in demand and operating conditions. This model ensures that the network operates optimally, maximizing its performance and minimizing the use of resources.

**Keywords:** *Internet of Things (IoT), mesh topology, simulation, latency, resilience, connectivity, data flow, energy consumption, optimization model.*



Fecha de Recepción: 20/09/2024 - Aceptado: 24/09/2024 – Publicado: 30/09/2024  
ISSN: 2477-9253 – DOI: <http://dx.doi.org/10.24133/RCS.D.VOL09.N03.2024.04>

## I. Introducción

El término 'IoT', o Internet de las cosas, se refiere a la red colectiva de dispositivos conectados y a la tecnología que facilita la comunicación entre los dispositivos y la nube, así como entre los propios dispositivos. (Rawat, 2019).

El Internet de las cosas (IoT) es un arquetipo computacional que se expande y se extiende más y más junto con el número de dispositivos conectados a la red. Sin embargo, depende de la transmisión de la información de forma precisa y segura para poder utilizar todo el volumen computacional de los dispositivos que la componen. Además, examinar los datos generados, es uno de los grandes desafíos que se intenta solucionar bajo la arquitectura computacional y la optimización mediante redes Virtuales (Osorio, 2020).

Si bien el Internet de las Cosas (IoT) ofrece una gran comodidad al conectar dispositivos, también plantea serios riesgos de seguridad y privacidad que a menudo ignoramos. Para abordar esto, es crucial encontrar un equilibrio entre la información que comparten los usuarios y la optimización de las redes virtuales en IoT. Esto implica mejorar continuamente las características de seguridad y privacidad, al mismo tiempo que se educa a los usuarios sobre los riesgos potenciales y cómo proteger su información (Protick, 2024).

La topología de malla es una configuración en la que cada nodo de la red está conectado a varios otros nodos, formando una red donde múltiples rutas de comunicación están disponibles entre los nodos. Esto significa que, en una red de malla, los dispositivos IoT pueden comunicarse directamente entre sí, lo que aumenta la redundancia y la resiliencia de la red.

A medida que la adopción de IoT continúa acelerándose en todos los dominios, comprender el panorama de las plataformas de código abierto maduras es importante para orientar la selección y evolución de la tecnología. Varios estudios han comparado las plataformas de IoT de código abierto y de propiedad privada en términos de diferentes capacidades (Sapavath, 2020).

La principal contribución de este estudio es la implementación y evaluación de un modelo de optimización para redes virtuales en entornos IoT basadas en una topología de malla. Este modelo permite la adaptación dinámica de la red a cambios en la demanda y condiciones operativas, maximizando la eficiencia en la transmisión de datos y minimizando el consumo de recursos. A través de simulaciones en NS-3, se demostró que la topología de malla mejora significativamente la conectividad, la resiliencia a fallos y la latencia en comparación con otras topologías tradicionales. Además, la investigación proporciona un enfoque metodológico para la simulación y análisis de redes IoT, integrando herramientas como Wireshark para la evaluación del tráfico y la detección de posibles cuellos de botella. Estos hallazgos contribuyen a la optimización de redes virtuales, facilitando su implementación en aplicaciones de IoT con altos requerimientos de disponibilidad y eficiencia.

El resto del artículo ha sido organizado como sigue. En el Capítulo 2, se presentan los materiales y métodos utilizados en el estudio, incluyendo una revisión de los trabajos relacionados, la fundamentación teórica, topología de malla y virtualización de redes, la descripción del entorno de simulación y el proceso de optimización de la red. El Capítulo 3 detalla la implementación de la topología de malla en máquinas virtuales, los comandos y herramientas utilizadas, y presenta los resultados obtenidos en las simulaciones y pruebas, incluyendo una comparación con otras topologías. Finalmente, en el Capítulo 4, se discuten los resultados, se presentan las conclusiones principales del estudio y se proponen posibles líneas de trabajo futuro.

## II. Materiales y Métodos

### 2.1. Trabajos Relacionados

El estudio propuesto por de Sapavath y Rawat (2019) presenta una arquitectura de virtualización inalámbrica diseñada para redes IoT emergentes o aplicaciones de redes 5G, utilizando un modelo de teoría de juegos de tres capas. La virtualización inalámbrica es considerada como una tecnología emergente clave, para mejorar la utilización del espectro de radio frecuencia (RF) y el rendimiento general de la red, al mismo tiempo que se soporta la conectividad de un número masivo de dispositivos IoT (Turki, 2024). El modelo propuesto en este trabajo incluye tres capas:

- **Proveedores de Recursos Inalámbricos (WRPs):** Actúan como líderes de la capa 1 y subarriendan sus recursos inalámbricos a operadores virtuales de redes móviles (MVNOs) a través de la segmentación del espectro RF y estableciendo precios adaptativos para el subarrendamiento.
- **Operadores Virtuales de Redes Móviles (MVNOs):** Actúan como líderes de la capa 2, estableciendo precios competitivos para atraer a más usuarios finales (dispositivos IoT) con el objetivo de maximizar sus utilidades.
- **Usuarios Finales (dispositivos IoT):** Son los seguidores en el juego de tres capas, quienes buscan maximizar sus tasas de datos cumpliendo con los requisitos de calidad de servicio (QoS) y las restricciones presupuestarias.

El estudio realiza un análisis formal de la existencia y unicidad del punto de equilibrio en este modelo de juego de tres capas. Los resultados numéricos demuestran que este enfoque maximiza las utilidades para WRPs, MVNOs y los dispositivos IoT.

El trabajo propuesto por Rawat, et. Al (2020) aborda el problema de la congestión y el bajo rendimiento de las redes inalámbricas debido al crecimiento exponencial de dispositivos IoT conectados y al aumento de datos transmitidos en la red. Propone la virtualización de redes inalámbricas, dividiendo los recursos de frecuencia entre los operadores de redes virtuales móviles (MVNOs) y los usuarios finales mediante un enfoque de tres capas.

El estudio destaca que el modelo tradicional de licenciamiento estático de espectro radioeléctrico está limitando el desarrollo de aplicaciones emergentes como el Internet de las Cosas (IoT) y los sistemas ciber físicos (CPS). Para abordar este desafío, el artículo propone un marco de virtualización en el que los proveedores de infraestructura inalámbrica (WIPs) dividen sus bandas de frecuencia y subarriendan estas porciones a los MVNOs, quienes a su vez ofrecen estos recursos a los usuarios finales. El enfoque central de este trabajo es un juego de tres capas:

- **WIPs:** Proveedores que controlan los recursos físicos y dividen las frecuencias para subarrendarlas a los MVNOs.
- **MVNOs:** Operadores virtuales que alquilan el espectro a los WIPs y lo ofrecen a los usuarios finales.
- **Usuarios finales (IoT Devices):** Los dispositivos o usuarios finales que consumen estos recursos inalámbricos.

Cada capa maximiza su *payoff* o beneficio mediante una estrategia óptima. Para los WIPs, esto implica subarrendar las bandas de frecuencia a precios competitivos para maximizar su rendimiento. Los MVNOs ajustan sus precios para atraer a los usuarios finales, y estos últimos buscan maximizar su tasa de datos al menor costo posible (Rawat, 2019).

El artículo concluye que la virtualización de redes inalámbricas a través de una estrategia de juego de tres capas, puede ser una solución eficaz para optimizar el rendimiento de las redes en entornos IoT, mitigando los problemas actuales de congestión y baja calidad de servicio.

## 2.2. Fundamentación Teórica

### 2.2.1. Internet de las cosas (IOT)

El Internet de las Cosas (IoT) es un concepto que se refiere a la interconexión de dispositivos físicos a través de redes digitales, permitiendo que estos dispositivos recojan, transmitan y reciban datos. Esta interconexión se traduce en una mayor capacidad para recopilar y analizar datos en tiempo real, lo que impulsa la automatización y mejora la eficiencia en diversos sectores. La rápida expansión del IoT está impulsada por la proliferación de dispositivos conectados y la creciente demanda de aplicaciones inteligentes en áreas como el hogar, la salud y la industria (Protick, 2024).

La expansión del IoT está impulsada por el aumento de la capacidad de los dispositivos y la reducción de los costos asociados con la conectividad. Las aplicaciones de IoT abarcan desde sistemas de gestión del hogar inteligente, que incluyen dispositivos como termostatos y cámaras de seguridad conectadas, hasta aplicaciones más complejas en el sector industrial, como el mantenimiento predictivo y la optimización de la cadena de suministro. Esta proliferación de dispositivos conectados está transformando industrias al mejorar la eficiencia operativa y proporcionar nuevos servicios basados en datos.

### 2.2.2. Topología en Malla

La topología de malla es una arquitectura de red en la que cada nodo está interconectado con varios otros nodos, creando múltiples rutas posibles para la transmisión de datos. Esta configuración presenta varias ventajas clave:

1. **Redundancia y Resiliencia:** La topología de malla ofrece alta redundancia, ya que los datos pueden ser enviados por diferentes caminos, si uno de los enlaces falla, aumentando así la resiliencia de la red (Turki, 2024). La principal ventaja de la topología de malla es su capacidad para proporcionar redundancia. Dado que cada nodo está conectado a múltiples nodos, la red puede seguir operando incluso si uno o más enlaces fallan. Esta redundancia aumenta la resiliencia de la red frente a fallos y garantiza la disponibilidad continua del servicio (Sapavath, 2020).
2. **Mejora en la Calidad del Servicio (QoS):** La disponibilidad de múltiples rutas permite una mejor optimización del tráfico, reduciendo la latencia y mejorando la QoS, fundamental para aplicaciones que requieren alta disponibilidad y baja latencia (Sapavath, 2020). La topología de malla permite la optimización del tráfico al ofrecer múltiples rutas para la transmisión de datos. Esto reduce la congestión en la red y mejora la calidad del servicio (QoS) al minimizar la latencia y las pérdidas de paquetes. La capacidad de redirigir el tráfico a través de rutas alternativas es crucial para aplicaciones sensibles al tiempo, como las que se encuentran en el ámbito de la salud y la industria.

3. Escalabilidad: Las redes de malla pueden escalar de manera eficiente añadiendo nodos sin necesidad de cambiar la infraestructura existente, lo cual es ideal para entornos IoT con un rápido crecimiento (Sapavath, 2020). Las redes de malla son altamente escalables, ya que la adición de nuevos nodos no requiere cambios significativos en la infraestructura existente. Esto es especialmente útil en entornos IoT, donde el número de dispositivos puede crecer rápidamente (Rawat, 2019). La capacidad de expandir la red de manera eficiente permite soportar un aumento en el número de dispositivos sin comprometer el rendimiento de la red.

### 2.2.3. Virtualización de Redes En IoT

La virtualización de redes permite la creación de redes virtuales independientes sobre una infraestructura física común. En el contexto de IoT, esta técnica se utiliza para optimizar la gestión de recursos y mejorar la eficiencia, de la red de la siguiente forma:

1. Optimización del Espectro: La virtualización del espectro permite una asignación dinámica de recursos, adaptándose a las necesidades de los dispositivos conectados y mejorando la utilización del espectro radioeléctrico (Rawat, 2019).
2. Segmentación y Aislamiento: La virtualización facilita la segmentación de la red en diferentes dominios virtuales, lo que proporciona una mejor gestión y seguridad de los datos, además de la capacidad de aislar diferentes tipos de tráfico (Sohrabi, 2013).
3. Gestión Dinámica de Recursos: La capacidad de ajustar dinámicamente los recursos según la demanda ayuda a mitigar problemas de congestión y sobrecarga en la red, garantizando un rendimiento óptimo (Chen, 2016).

Aunque la virtualización de redes ofrece numerosos beneficios, también enfrenta varios desafíos:

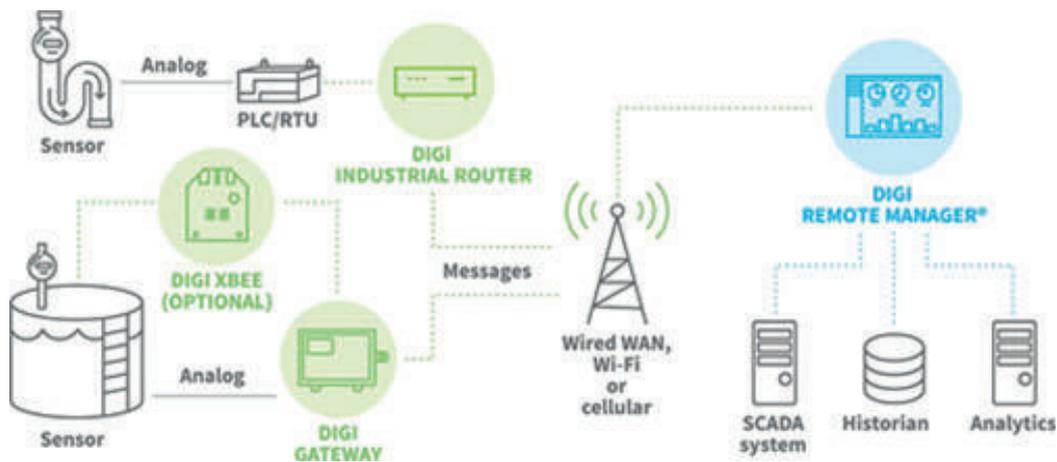
- Complejidad en la Gestión: La administración de recursos virtuales puede ser compleja debido a la necesidad de coordinar entre múltiples redes virtuales sobre una infraestructura compartida.
- Problemas de Seguridad: La virtualización puede introducir vulnerabilidades adicionales que deben ser gestionadas adecuadamente para evitar problemas de seguridad.
- Rendimiento Variable: La carga dinámica y la compartición de recursos entre múltiples redes virtuales pueden afectar el rendimiento general si no se gestiona correctamente.

### 2.2.4. NS-3: Simulación de Redes

NS-3 es un simulador de redes de código abierto ampliamente utilizado para la investigación y desarrollo en redes de comunicación. Permite la simulación de redes y protocolos, lo que es crucial para el análisis de redes IoT y la evaluación de nuevas tecnologías.

NS-3 ofrece una arquitectura modular que permite la simulación de una amplia gama de protocolos de red y dispositivos. Se utiliza para modelar redes de sensores, redes móviles y redes de malla, entre otros, proporcionando una plataforma robusta para la investigación en IoT (véase Figura 1). Finalmente, NS-3 puede integrarse con herramientas como Wireshark para el análisis de tráfico en la red.

**Figura 1:** Diagrama de IoT (Internet de las Cosas). Fuente: (Jahnke, s. f.)



### 2.2.5. Wireshark: Análisis de tráfico de redes y protocolos

Wireshark es una herramienta de análisis de protocolos de red que permite capturar y examinar el tráfico de red en tiempo real. Su uso es esencial para la depuración y el análisis de redes IoT y la evaluación de la eficiencia de la topología y la virtualización de redes. Wireshark permite la captura detallada de paquetes y la inspección de datos en diferentes niveles del modelo OSI. Es útil para detectar problemas en la red, analizar el rendimiento y verificar la correcta implementación de protocolos.

## 2.3. Topología de simulación

### 2.3.1. Descripción del Entorno de Simulación

- **Simulador NS-3:** El simulador NS-3 fue seleccionado para llevar a cabo las simulaciones debido a su capacidad para modelar redes de comunicación. NS-3 permite la simulación de la topología de malla, proporcionando un entorno robusto para evaluar el rendimiento de las redes IoT en condiciones controladas.
- **Parámetros de Simulación:** Se establecieron varios parámetros críticos para las simulaciones: (i) Número de nodos: Se utilizaron diferentes números de nodos para evaluar la escalabilidad de la topología; (ii) Tasa de transmisión de datos: Se definieron varias tasas de transmisión para analizar cómo la topología de malla maneja diferentes cargas de tráfico; (iii) Latencia y pérdida de paquetes: Estos parámetros fueron medidos para evaluar la resiliencia y la calidad del servicio (QoS) en la red.
- **Modelo de Red:** Se implementó un modelo de red basado en la topología de malla, donde cada nodo se conecta con múltiples nodos vecinos. Este modelo fue comparado con otras topologías (estrella, árbol, etc.) para demostrar la superioridad de la topología de malla en términos de redundancia, resiliencia y optimización del tráfico.

### 2.3.2. Proceso de Optimización de la Red

- **Algoritmo de Optimización:** Se desarrolló un algoritmo de optimización para mejorar el rendimiento de la red. Este algoritmo ajusta dinámicamente la configuración de la red (rutas de datos, asignación de ancho de banda) basándose en las condiciones actuales de la red y las demandas de los dispositivos IoT.

- Estrategias de Enrutamiento: Se implementaron y probaron diferentes estrategias de enrutamiento para balancear la carga de tráfico y minimizar la latencia. El algoritmo de enrutamiento utilizado fue diseñado para redistribuir el tráfico de manera eficiente, evitando congestiones y mejorando la calidad de servicio.

### 2.3.3. Simulaciones y pruebas

Las simulaciones se realizaron bajo diferentes condiciones, incluyendo:

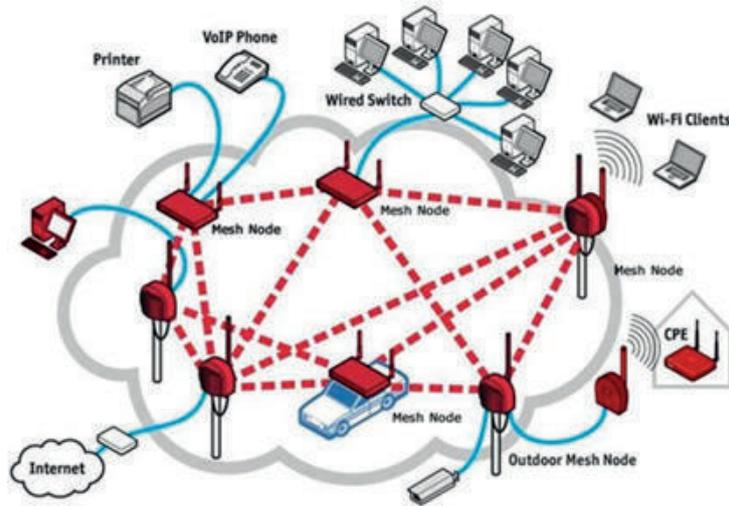
- Variación en la cantidad de nodos: Para probar la escalabilidad.
- Simulación de fallos en nodos: Para evaluar la resiliencia de la red.
- Cargas de tráfico variadas: Para observar el comportamiento del algoritmo de optimización bajo diferentes niveles de tráfico.

Los datos de la simulación fueron recolectados y analizados para medir parámetros clave como latencia, pérdida de paquetes, y eficiencia en el consumo de energía. Las métricas obtenidas permitieron evaluar la efectividad de la topología de malla y del modelo de optimización propuesto.

### 2.3.4. Justificación de la elección de la topología de malla

1. Alta redundancia y resiliencia: En aplicaciones IoT, la fiabilidad es crítica, especialmente cuando se despliegan en entornos donde la conectividad puede ser impredecible. La topología de malla asegura que, incluso si un nodo falla, la red sigue funcionando porque hay múltiples rutas de comunicación alternativas disponibles. Esto es vital para aplicaciones IoT que requieren alta disponibilidad.
2. Flexibilidad en la comunicación: La naturaleza distribuida de la topología de malla permite una mayor flexibilidad en la comunicación. Los dispositivos pueden elegir la mejor ruta para transmitir datos, lo que es especialmente útil en redes IoT dinámicas, donde las condiciones de la red pueden cambiar con frecuencia.
3. Escalabilidad: A medida que se añaden más dispositivos IoT a la red, la topología de malla permite escalar de manera eficiente sin comprometer la integridad de la red. Cada nuevo nodo puede integrarse fácilmente al sistema, expandiendo la cobertura y mejorando la conectividad general de la red.
4. Optimización del Tráfico de Red: En una red de malla, la distribución del tráfico se puede optimizar dinámicamente. Los algoritmos de enrutamiento pueden ser diseñados para balancear la carga entre los nodos, evitando cuellos de botella y mejorando el rendimiento general de la red (ver Figura 2). Esto es especialmente importante en aplicaciones IoT que generan grandes cantidades de datos.

**Figura 2:** Topología malla, Red Mesh inalámbrica con nodos interconectados para conectividad extendida y redundancia. Fuente: (Navas, 2018)



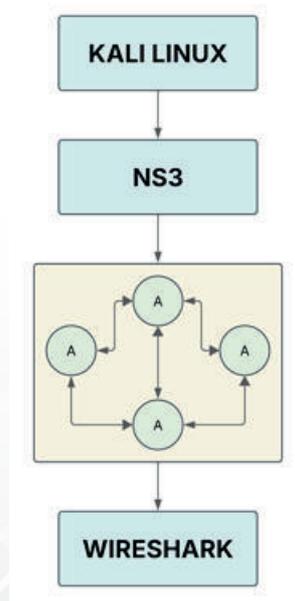
### III. Evaluación de Resultados y Discusión

#### 3.1. Comandos y herramientas para implementar la topología de malla en máquinas virtuales (Ubuntu)

Para implementar y simular una topología de malla en un entorno virtual, se investigó cómo realizar la simulación de redes utilizando herramientas como Mininet o NS-3 (ver Figura 3).

La figura 3 representa la arquitectura de simulación de red en malla utilizando Kali Linux, el cual actúa como sistema operativo donde se ejecuta NS-3, un simulador de redes que permite modelar la topología en malla compuesta por varios nodos interconectados. Esta topología permite la comunicación entre múltiples nodos y los datos enviados son capturados y analizados mediante Wireshark lo que facilita la inspección de tráfico en red y análisis de paquetes.

**Figura 3:** Topología de malla en Kali Linux a través de NS3 y Wireshark



### 3.1.1. Paso 1: Preparar el entorno en Ubuntu Desktop

- Actualizar el Sistema: `$ sudo apt update && apt upgrade -y`
- Instalar Mininet: Mininet es la primera herramienta que se utilizó para la simulación de redes: `$ sudo apt-get install mininet -y`
- Instalar NS-3 (Alternativa a Mininet): NS-3 es la segunda herramienta poderosa que utilizamos para la simulación de redes, especialmente para simulaciones a nivel de paquetes:

```
$ sudo apt-get install gcc g++ python3 cmake -y
```

```
$ sudo wget https://www.nsnam.org/releases/ns-allinone-3.36.1.tar.bz2
```

```
$ sudo tar xjf ns-allinone-3.36.1.tar.bz2
```

```
$ sudo cd ns-allinone-3.36.1/ns-3.36.1
```

```
$ sudo ./waf conFigura
```

```
$ sudo ./waf build.
```

### 3.1.2. Paso 2: crear y configurar la topología de malla

1. Crear una Topología de Malla Simple en Mininet: Se inicia creando la topología de malla utilizando el siguiente script en Mininet:

```
$ sudo mn --topo linear,4 --mac
```

```
$ --switch ovsk --controller remote
```

Con este ejemplo, `linear,4` se debe crear una topología con 4 nodos conectados en una línea, pero podemos personalizarla para que cada nodo se conecte a varios otros, formando una malla.

2. Configurar la Topología de Malla en NS-3:

En NS-3, se crea una topología de malla usando un script en C++.

3. Algoritmo para la simulación de una red mesh utilizando NS3

El algoritmo presentado describe el proceso de configuración y simulación de una red en malla utilizando NS-3, permitiendo el análisis del comportamiento de redes inalámbricas autoorganizadas. Se inicia con la declaración de variables y la creación de un conjunto de nodos, seguido de la configuración de la capa física inalámbrica y el establecimiento de la red mesh mediante la clase `MeshHelper`, que implementa el protocolo IEEE 802.11s. Se configura la movilidad de los nodos para simular escenarios realistas luego se ejecuta la simulación. Este procedimiento es fundamental para evaluar el rendimiento de redes en malla en distintos entornos, facilitando el estudio de parámetros como la latencia, la conectividad y la eficiencia en la transmisión de datos.

*1. Inicio*

*2. Declarar variables:*

3. *Crear contenedor de nodos: nodes*
4. *Crear objeto wifiPhy de clase YansWifiPhyHelper*
5. *Crear objeto mesh de clase MeshHelper*
6. *Crear contenedor de dispositivos de red: meshDevices*
7. *Crear objeto mobility de clase MobilityHelper*

*8. Creación de nodos:*

9. *Especificar número de nodos (5)*
10. *nodes.Create()*

*11. Configuración de capa física inalámbrica:*

12. *wifiPhy = YansWifiPhyHelper::Default()*

*13. Configuración de red mesh:*

14. *mesh = MeshHelper::Default()*
15. *mesh.SetStackInstaller("ns3::Dot11sStack")*
16. *mesh.SetSpreadInterfaceChannels(MeshHelper::SPREAD\_CHANNELS)*

*17. Instalación de la red mesh:*

18. *meshDevices = mesh.Install(wifiPhy, nodes)*

*19. Configuración de movilidad:*

20. *mobility.SetPositionAllocator("ns3::GridPositionAllocator", ...)*
21. *mobility.SetMobilityModel("ns3::ConstantPositionMobilityModel")*
22. *mobility.Install(nodes)*

*23. Simulación:*

24. *Simulator::Run()*

*25. Finalización:*

26. *Simulator::Destroy()*

*27. Fin*

### 3.1.3. Optimización y monitoreo

Para el monitoreo del rendimiento se utilizó Wireshark para capturar y analizar el tráfico de red en tu simulación de Mininet o NS-3. Wireshark permite inspeccionar el comportamiento de la red, detectar problemas de tráfico, y ajustar parámetros de la red para optimizar el rendimiento.

Antes de analizar los resultados obtenidos en la simulación, es importante contextualizar la relevancia de la configuración y optimización de la topología de malla en entornos de redes. La simulación de redes IoT en herramientas como Mininet y NS-3 permite evaluar el comportamiento de la comunicación entre nodos y ajustar parámetros clave para mejorar el rendimiento y la fiabilidad de la red.

En este sentido, los resultados obtenidos permitirán comprender cómo se desempeñó la red de malla bajo las condiciones establecidas, identificar posibles mejoras y validar la efectividad de las configuraciones implementadas. A continuación, se presentan y analizan los principales hallazgos.

### 3.2. Pruebas y Evaluación de resultados

Las pruebas de la red en topología de malla se realizaron con cuatro nodos utilizando el simulador NS-3. Los nodos se conectaron entre sí mediante enlaces punto a punto, con un ancho de banda de 5 Mbps y un retardo de 2 ms. Se instaló un servidor UDP Echo en el nodo 4 y un cliente UDP Echo en el nodo 1. El cliente fue configurado para enviar 10 paquetes de 1024 bytes al servidor, con un intervalo de 1 segundo entre cada paquete.

Los resultados de la simulación demostraron que la topología de malla configurada fue altamente efectiva en la transmisión de datos entre los nodos. El servidor en el nodo 4 respondió correctamente a todos los paquetes enviados por el cliente en el nodo 1, lo que indica que la red pudo mantener una conectividad constante y sin interrupciones. Este comportamiento es fundamental en redes IoT, donde la capacidad de los nodos para comunicarse de manera confiable es esencial para el correcto funcionamiento de aplicaciones distribuidas.

Además, se observó que la latencia promedio entre el envío y la recepción de los paquetes estuvo en línea con la configuración de retardo de 2 ms en los enlaces, sin que se registraran variaciones significativas. Esto sugiere que el rendimiento de la red fue consistente y predecible, lo cual es crucial en entornos donde la sincronización y la baja latencia son necesarias.

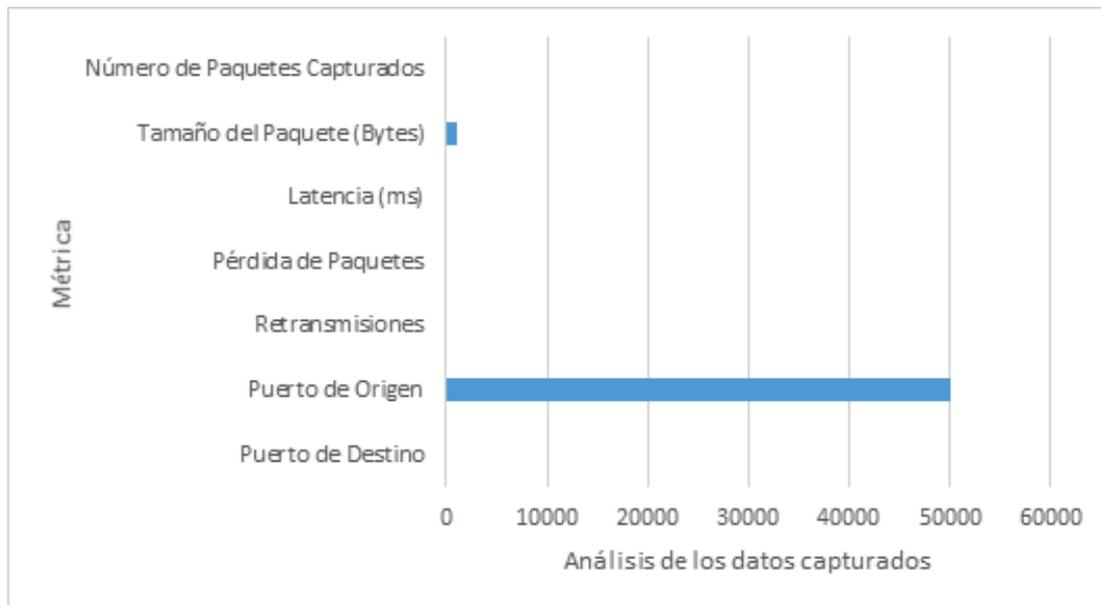
Para validar aún más estos resultados, se utilizó Wireshark, una herramienta de análisis de tráfico de red, para capturar y analizar los paquetes transmitidos durante la simulación. El análisis de los datos capturados con Wireshark confirmó que todos los paquetes enviados por el cliente llegaron al servidor sin pérdidas, y que las respuestas del servidor fueron enviadas de vuelta al cliente sin retrasos adicionales. Esto valida la eficacia de la red de malla configurada en términos de fiabilidad y entrega de paquetes.

**Tabla 1:** “Análisis de Wireshark”

| Métrica                       | Análisis de los datos capturados |
|-------------------------------|----------------------------------|
| Puerto de Destino             | 0                                |
| Puerto de Origen              | 50000                            |
| Retransmisiones               | 0                                |
| Pérdida de Paquetes           | 0                                |
| Latencia (ms)                 | 0                                |
| Tamaño del Paquete (Bytes)    | 1000                             |
| Número de Paquetes Capturados | 0                                |

Asimismo, el análisis de Wireshark permitió corroborar que no hubo retransmisiones ni fragmentaciones de paquetes, lo que indica que la red fue capaz de manejar eficientemente el tráfico generado, sin que se produjeran cuellos de botella o congestión en los enlaces (Ver Tabla 1 y 2, Figura 5). Este resultado es particularmente relevante para aplicaciones IoT donde la integridad de los datos y la eficiencia en la transmisión son críticas.

**Figura 5:** Comprobación de enlace de nodos NS -3 con Wireshark



La Tabla 2 se obtuvo mediante la captura y análisis del tráfico de red generado durante la simulación en NS-3. Durante la ejecución de la simulación, Wireshark registró los paquetes UDP enviados y recibidos entre los nodos, permitiendo evaluar métricas clave de desempeño de la red de malla configurada. Esta tabla describe diversas métricas relevantes, como el número total de paquetes capturados, el tamaño de los paquetes, la latencia en la comunicación, la tasa de pérdida de paquetes y la cantidad de retransmisiones. Además, incluye información sobre las direcciones IP de origen y destino, así como los puertos utilizados en la transmisión.

La importancia de esta tabla radica en que permite validar el correcto funcionamiento de la red de malla simulada, asegurando que la comunicación entre los nodos sea eficiente y confiable. Al comparar los resultados obtenidos con los valores esperados, se puede verificar que no hubo pérdidas de paquetes, retrasos significativos o retransmisiones innecesarias, lo que es crucial para garantizar un rendimiento óptimo en redes IoT y sistemas distribuidos.

**Tabla 2:** “Resultados esperados del análisis de Wireshark en la simulación”

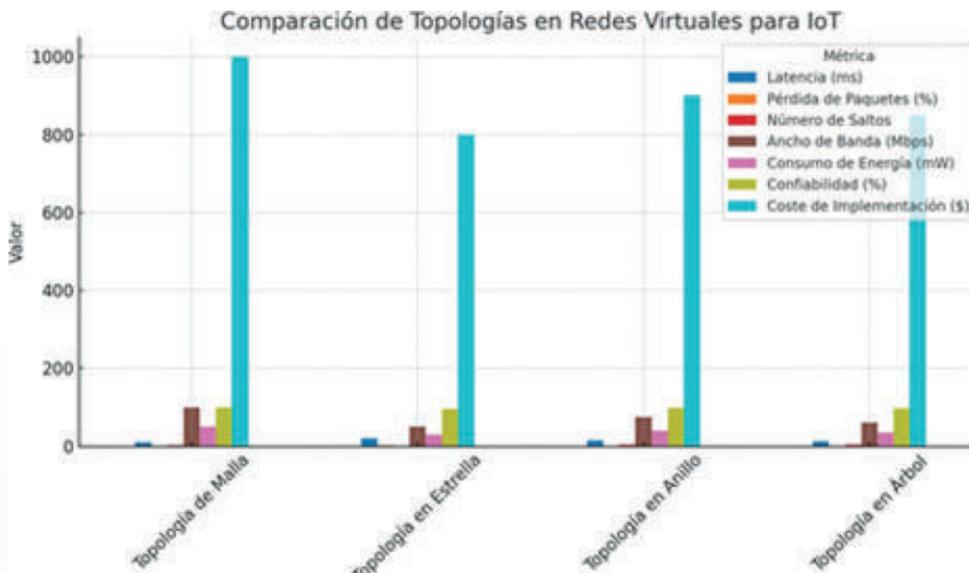
| Métrica                              | Descripción   | Resultado Esperado                       |
|--------------------------------------|---|--|
| <b>Número de Paquetes Capturados</b> | Total de paquetes UDP capturados en Wireshark durante la simulación.                            | 20 paquetes (10 envíos y 10 respuestas). |
| <b>Tamaño del Paquete (Bytes)</b>    | Tamaño de cada paquete UDP enviado desde el cliente al servidor.                                | 1024 bytes.                              |
| <b>Latencia (ms)</b>                 | Tiempo entre el envío del paquete desde el cliente y la recepción de la respuesta del servidor. | 4 ms (2 ms de ida y 2 ms de vuelta).     |

|                                |   |  |
|--------------------------------|---|--|
| <b>Pérdida de Paquetes</b>     | Número de paquetes enviados desde el cliente que no fueron recibidos por el servidor. | 0 paquetes perdidos.                                     |
| <b>Retransmisiones</b>         | Número de retransmisiones de paquetes debido a pérdidas o errores en la transmisión.  | 0 retransmisiones.                                       |
| <b>Dirección IP de Origen</b>  | Dirección IP del nodo cliente (Nodo 1).   | 10.1.1.1.  |
| <b>Dirección IP de Destino</b> | Dirección IP del nodo servidor (Nodo 4).  | 10.1.1.4.  |
| <b>Puerto de Origen</b>        | Puerto usado por el cliente para enviar paquetes.                                     | Aleatorio, asignado por el sistema (por ejemplo, 49152). |
| <b>Puerto de Destino</b>       | Puerto del servidor donde se reciben los paquetes.                                    | 9 (Puerto del Servidor UDPEcho).                         |

### 3.3. Discusión

La topología de malla se destaca por su alta redundancia y tolerancia a fallos, características que la hacen especialmente adecuada para entornos donde la fiabilidad es crítica. A diferencia de la topología en estrella, en la cual todos los nodos dependen de un único punto central, la malla permite que cada nodo esté interconectado con múltiples nodos, eliminando así el riesgo de un único punto de fallo. Sin embargo, esta ventaja viene acompañada de una mayor complejidad en la implementación y un costo significativamente más elevado debido a la cantidad de conexiones y hardware necesarios. La Figura 6 muestra una comparación con otras topologías.

**Figura 6:** Comparación con Otras Topologías



En comparación con la topología en árbol, la malla ofrece una mayor resiliencia, ya que no depende de nodos de nivel superior para mantener la conectividad en toda la red. La estructura jerárquica del árbol facilita la escalabilidad y la organización, permitiendo la expansión mediante la adición de subniveles. No obstante,

los puntos de fallo en los nodos superiores pueden impactar de manera considerable la funcionalidad de grandes secciones de la red, una vulnerabilidad que la topología de malla mitiga al proporcionar múltiples rutas de comunicación.

Por otro lado, al comparar la topología de malla con la topología en anillo, la primera muestra una superioridad en cuanto a la tolerancia a fallos. En un anillo, la comunicación depende de una secuencia cerrada de nodos, y un fallo en un solo nodo puede interrumpir todo el flujo de datos. Aunque la topología en anillo es más sencilla y económica de implementar, su recuperación ante fallos es más lenta y menos eficiente en comparación con la malla, que ofrece múltiples rutas alternativas para mantener la conectividad.

Finalmente, frente a la topología en bus, la topología de malla nuevamente demuestra su ventaja en términos de resiliencia. Mientras que la topología en bus es fácil de implementar y económica, especialmente en redes pequeñas, su rendimiento y confiabilidad disminuyen considerablemente en redes más grandes, ya que todos los dispositivos comparten un único canal de comunicación. Un fallo en el cable principal puede colapsar toda la red en un bus, un riesgo que la topología de malla evita al ofrecer múltiples caminos para la transmisión de datos, aunque a un costo mayor y con una mayor complejidad de implementación.

Aunque la topología de malla presenta un costo y una complejidad más altos que otras topologías como estrella, árbol, anillo y bus, sus beneficios en términos de redundancia, fiabilidad y tolerancia a fallos la hacen una opción ideal para redes que requieren alta disponibilidad y continuidad del servicio.

La topología de malla es ideal para la simulación y optimización de redes IoT en entornos virtuales debido a su alta resiliencia, flexibilidad y escalabilidad. Al utilizar herramientas como Mininet o NS-3 en máquinas virtuales Ubuntu, puedes crear un entorno robusto para probar y mejorar las aplicaciones de IoT. La implementación y optimización de una red de malla te permitirá explorar diferentes estrategias para mejorar la fiabilidad y el rendimiento, lo que es esencial para aplicaciones IoT en escenarios del mundo real.

Asimismo, implementar una topología de malla puede reducir la latencia en la transmisión de datos al permitir la selección de rutas óptimas y directas entre nodos. Esto es especialmente beneficioso para aplicaciones IoT que requieren un tiempo de respuesta rápido, como las aplicaciones en el sector de la salud y el control industrial. La capacidad de elegir rutas menos congestionadas y más eficientes contribuye a una mejora notable en la calidad del servicio, facilitando una experiencia más fluida y eficiente para los usuarios finales.

Este enfoque no solo proporciona una red confiable y eficiente para tus simulaciones, sino que también te ofrece una plataforma para experimentar con nuevas ideas y optimizaciones, contribuyendo al avance del campo de las redes virtuales y la Internet de las Cosas.

El modelo de optimización propuesto para redes IoT basadas en topología de malla ofrece una adaptabilidad dinámica a cambios en la demanda y en las condiciones operativas de la red. La capacidad para ajustar automáticamente la configuración de la red en función de las condiciones actuales permite un uso más eficiente de los recursos y una mejor gestión del tráfico. Esta escalabilidad es esencial para redes IoT en expansión, donde el número de dispositivos y la demanda de servicios pueden variar significativamente con el tiempo.

La virtualización de redes en entornos IoT introduce desafíos adicionales en términos de gestión y seguridad. Aunque ofrece beneficios en términos de flexibilidad y eficiencia, la administración de redes virtualizadas requiere herramientas y técnicas avanzadas para garantizar una operación eficiente. Además, la virtualización puede exponer la red a nuevas vulnerabilidades de seguridad que deben ser gestionadas cuidadosamente para proteger la integridad y la privacidad de los datos en tránsito.

## IV. Conclusiones y Trabajo futuro

En este estudio se evidencia que existen varios propósitos al implementar la topología de malla, sea por redundancia, resiliencia, por mejorar la Calidad del Servicio (QoS) y por escalabilidad. Además, la virtualización en redes permite una asignación dinámica de recursos, adaptándose a las necesidades de los dispositivos conectados, una segmentación de dominios a través de la red. Esto permite mayor seguridad de los datos y ajustar dinámicamente los recursos según la demanda, gestión y sobrecarga de la red. Uno de los problemas de las redes virtuales es la tasa de transmisión de datos, la latencia, pérdida de paquetes y complejidad en la gestión. Se implementó un modelo de red donde cada nodo se conecta con múltiples nodos vecinos. Las simulaciones y pruebas se dieron bajo a diferentes combinaciones, como la variación en la cantidad de nodal, simulación de fallo en los nodos, y carga de tráfico variadas. Los resultados muestran que la topología de malla mejora significativamente la conectividad en redes IoT al ofrecer múltiples rutas alternativas para la transmisión de datos. Esta redundancia es fundamental en entornos IoT, donde la fiabilidad es esencial para el funcionamiento continuo de dispositivos y servicios. Al proporcionar varias rutas, la topología de malla asegura que la pérdida de un enlace no afecte gravemente la conectividad general de la red, mejorando la resiliencia y la disponibilidad de los servicios.

Como trabajo futuro se planea la integración de inteligencia artificial para la gestión automática del tráfico y la resiliencia de la red. Se explorarán modelos de aprendizaje automático y redes neuronales para optimizar la selección de rutas en tiempo real, reduciendo la latencia y mejorando la distribución del tráfico. Además, se evaluará la implementación de algoritmos de detección y mitigación de fallos, permitiendo que la red pueda adaptarse de manera autónoma a cambios en la infraestructura. Asimismo, se investigará la posibilidad de aplicar técnicas de aprendizaje por refuerzo para optimizar el balanceo de carga en la red y mejorar la eficiencia energética. La combinación de inteligencia artificial con redes IoT virtualizadas permitirá desarrollar sistemas más robustos, inteligentes y adaptativos, mejorando la experiencia del usuario y garantizando una conectividad confiable en escenarios de alta demanda y entornos críticos.

## Referencias

- Amazon Web Services, Inc. (n.d.). *¿Qué es IoT? - Explicación del Internet de las cosas - AWS*. Recuperado el 27 de agosto de 2024, de <https://aws.amazon.com/es/what-is/iot/>
- An, S. R. R., & Adabala, A. H. V. (2012). Optimizing energy efficiency in wireless mesh networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 11(4), 1402–1412.
- Andren, E. M. B. M., & Sherratt, T. P. D. (2014). A survey of topology management in wireless mesh networks. *Journal of Computer Science and Technology*, 29(4), 477–492.
- Chen, D. N. C. C., & McNair, J. G. (2016). Mesh networking for wireless sensor networks. *International Journal of Computer Applications*, 68(22), 20–25.
- Kumar, P. S. D. M. K. S. (2011). Challenges in securing wireless mesh networks. *Security and Privacy Magazine*, 9(2), 38–45.
- Lee, L. L. M. G., & Turner, M. R. S. D. (2011). Adaptive routing in wireless mesh networks: A review. *Journal of Computer Networks*, 55(14), 2875–2892.

- Li, H. M. T. E. O. P. H. E. (2015). Performance evaluation of wireless mesh networks for IoT applications. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 12(1), 123–134.
- Liu, B. A. G. S. K. P. B. (2014). Energy-aware topology control in wireless mesh networks. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 10(2), 1–27.
- Osorio, C. A. C., Echeverry, G. A. I., Ossa, L. F. C., & Bedoya, O. H. F. (2020). Computational architecture of IoT data analytics for connected home based on deep learning. *Proceedings of the 10th Euro-American Conference on Telematics and Information Systems*, 1–8.
- Protick, T. I., Sabir, A., Abhinaya, S. B., Bartlett, A., & Das, A. (2024). Unveiling users' security and privacy concerns regarding smart home IoT products from online reviews. *ACM Journal on Computing and Sustainable Societies*. <https://doi.org/10.1145/3685929>
- Rawat, D. B., Alshaikhi, A., Alshammari, A., Bajracharya, C., & Song, M. (2019). Payoff optimization through wireless network virtualization for IoT applications: A three-layer game approach. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(2), 2797–2805. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2874884>
- Sapavath, N. N., & Rawat, D. B. (2020). Wireless virtualization architecture: Wireless networking for Internet of Things. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(7), 5946–5953. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2942542>
- Sohrabi, K., Woods, W., & Wang, J. K. D. L. (2013). A review of wireless mesh networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15(3), 1646–1671.
- Turki, M., El Boussaidi, G., Benzarti, I., & Mili, H. (2024). Evaluating open source IoT platforms: A GitHub analysis. *Proceedings of the ACM/IEEE 6th International Workshop on Software Engineering Research and Practices for the Internet of Things*, 12, 14–21.
- Zhang, Y., & Yang, L. (2013). Topology management in wireless sensor networks: A survey. *Journal of Computer Networks and Communications*, 2013, 1–16.
- Youssef, A. B. J. F. (2017). Wireless mesh network design for IoT applications. *IEEE Internet of Things Journal*, 4(6), 1962–1971.