



UTMACH

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

CARRERA DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN

Implementation of a low-cost ad-hoc IoT mesh network for home automation systems.

**GUEVARA VILLACRES ALLAN ROGER
INGENIERO EN TECNOLOGIAS DE LA INFORMACION**

**MORAN GUEVARA HECTOR EDUARDO
INGENIERO EN TECNOLOGIAS DE LA INFORMACION**

**MACHALA
2022**



UTMACH

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

CARRERA DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN

Implementation of a low-cost ad-hoc IoT mesh network for home automation systems.

**GUEVARA VILLACRES ALLAN ROGER
INGENIERO EN TECNOLOGIAS DE LA INFORMACION**

**MORAN GUEVARA HECTOR EDUARDO
INGENIERO EN TECNOLOGIAS DE LA INFORMACION**

**MACHALA
2022**



UTMACH

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

CARRERA DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN

ENSAYOS O ARTÍCULOS ACADÉMICOS

Implementation of a low-cost ad-hoc IoT mesh network for home automation systems.

**GUEVARA VILLACRES ALLAN ROGER
INGENIERO EN TECNOLOGIAS DE LA INFORMACION**

**MORAN GUEVARA HECTOR EDUARDO
INGENIERO EN TECNOLOGIAS DE LA INFORMACION**

HERNANDEZ ROJAS DIXYS LEONARDO

**MACHALA
2022**

Nombre de la revista: IEEE Latin America Transactions

Título del artículo: Implementation of a low-cost ad-hoc mesh network for home automation systems.

Autores:

- Guevara Allan
- Moran Hector
- Hernandez Dixys
- Cartuche Joffre

Constancia de la recepción del artículo

[IEEE LAT AM T] Editor Decision 

 Ilse Cervantes via <noreply@latamt.ieee9.org>     

Para:  Allan Roger Guevara Villacres;  Hector Eduardo Moran Guevara **y 2 más** Lun 06/03/2023 13:09

Allan Guevara Villacres, Hector Moran Guevara, Dixys Leonardo Hernandez Rojas, Joffre Jeorwin Cartuche Calva (Author):

We have reached a decision regarding your submission to IEEE Latin America Transactions, "Implementation of a low-cost ad-hoc IoT mesh network for home automation systems".

Based on the reviewers' comments (see below), we decided to: **Decline Submission**. Please constructively study the comments below. I thank you for submitting your research to this Journal and hope that you continue your association with IEEE Latin America Transactions as an author or reviewer despite the outcome of this paper.

Prof. Ilse Cervantes PhD
Editor-in-Chief
IEEE Latin America Transactions
IlseCervantes@ieee.org

Workflow **Publication**

Submission Review Copyediting Production

Round 1

Round 1 Status

Awaiting responses from reviewers.

Review Discussions

Add discussion

Name	From	Last Reply	Replies	Closed
No Items				

My Queue 2

Archives 3

Help

My Assigned

Search

Filters

New Submission

7949 **Guevara Villacres et al.**

Implementation of a low-cost ad-hoc IoT mesh network for home automation systems

0/4

Review

View

0/4

Assigned reviews completed

0

Revisions submitted

0

Open discussions

Last activity recorded on Monday, February 27, 2023.

7915 **Cujilema Paguay et al.**

Secure home automation system based on ESP-NOW mesh network, MQTT and Home Assista...

1/3

Review

View

Submissions

My Queue 2

Archives 3

Help

My Assigned

Search

Filters

New Submission

7949 **Guevara Villacres et al.**

Implementation of a low-cost ad-hoc IoT mesh network for home automation systems

0/4

Review

View

0/4

Assigned reviews completed

0

Revisions submitted

0

Open discussions

Last activity recorded on Monday, February 27, 2023.

7915 **Cujilema Paguay et al.**

Secure home automation system based on ESP-NOW mesh network, MQTT and Home Assista...

1/3

Review

View

CLÁUSULA DE CESIÓN DE DERECHO DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL

Los que suscriben, GUEVARA VILLACRES ALLAN ROGER y MORAN GUEVARA HECTOR EDUARDO, en calidad de autores del siguiente trabajo escrito titulado Implementation of a low-cost ad-hoc IoT mesh network for home automation systems., otorgan a la Universidad Técnica de Machala, de forma gratuita y no exclusiva, los derechos de reproducción, distribución y comunicación pública de la obra, que constituye un trabajo de autoría propia, sobre la cual tienen potestad para otorgar los derechos contenidos en esta licencia.

Los autores declaran que el contenido que se publicará es de carácter académico y se enmarca en las disposiciones definidas por la Universidad Técnica de Machala.

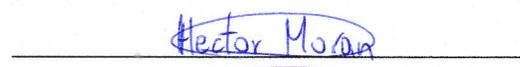
Se autoriza a transformar la obra, únicamente cuando sea necesario, y a realizar las adaptaciones pertinentes para permitir su preservación, distribución y publicación en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Técnica de Machala.

Los autores como garantes de la autoría de la obra y en relación a la misma, declaran que la universidad se encuentra libre de todo tipo de responsabilidad sobre el contenido de la obra y que asumen la responsabilidad frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros de manera exclusiva.

Aceptando esta licencia, se cede a la Universidad Técnica de Machala el derecho exclusivo de archivar, reproducir, convertir, comunicar y/o distribuir la obra mundialmente en formato electrónico y digital a través de su Repositorio Digital Institucional, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico.


GUEVARA VILLACRES ALLAN ROGER

0706510955


MORAN GUEVARA HECTOR EDUARDO

0707044129

Implementation of a low-cost ad-hoc IoT mesh network for home automation systems.

A. Guevara-Villacres , H. Morán-Guevara , D. Hernández-Rojas , J. Cartuche-Calva 

Abstract—Currently, IoT systems have had great relevance in the world of technology, due to the ease of connecting everyday objects to the Internet, automating a home, controlling lighting and security for a home in order to provide comfort and well-being. Within the home, Wifi is the most widely used wireless technology, where the Internet router generally creates such a network. To which Wifi-IoT devices, cell phones, laptops and home appliances are connected. Therefore, it increases traffic, packet loss and connection losses especially for those devices that are far away from a router, access point or without line of sight. This paper proposes an ad-hoc mesh network prototype using MQTT protocol and the Home Assistant platform. The mesh network runs over low-cost IoT devices such as the ESP32 family and allows extending the coverage and interconnection of all IoT devices without interfering with the conventional home wifi network. The mesh network was implemented and tested in a real home with different line-of-sight scenarios, distance between nodes and with different time intervals for message transmission. The test results indicate that the optimal sampling time is 1 minute with an average latency of only 1.62 seconds and 93% of packets received. The source code for the nodes and gateway are available on Github.

Index Terms—Mesh network, Wi-Fi, IoT, Home assistant, MQTT, Home Assistant, XP methodology.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el mundo de la informática ha evolucionado notoriamente, surgiendo lo que hoy conocemos como Internet que es denominada como la red más grande a nivel mundial, lo que ha permitido a las personas aprovechar de las grandes innovaciones tecnológicas como navegar en la web, comercio electrónico, redes sociales, etc [1]. Dentro de esto las redes inalámbricas han contribuido exponencialmente la forma de comunicación en la sociedad, incluso en el ámbito de la economía es muy bien vista, debido a que la misma se la realiza a través de ondas, es decir, no se necesita cables para su conexión lo que significa un ahorro de dinero. Además, este tipo de herramientas están siendo adoptadas en diferentes entornos como lo son hogares, zonas rurales, parques, centros comerciales, etc.

Entre los diferentes tipos de redes en una infraestructura TI, existe la LAN, sin embargo, son de elevado costo debido

A. Guevara-Villacres. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Técnica de Machala. Machala, El Oro, Ecuador. aguevara2@utmachala.edu.ec.

H. Moran-Guevara. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Técnica de Machala. Machala, El Oro, Ecuador. hmoran2@utmachala.edu.ec

D. Hernández-Rojas. Grupo de investigación AutoMathTIC, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Técnica de Machala. Machala, El Oro, Ecuador. dhernandez@utmachala.edu.ec.

J. Cartuche-Calva. Grupo de investigación AutoMathTIC, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Técnica de Machala. Machala, El Oro, Ecuador. jcartuche@utmachala.edu.ec.

al cableado, aparatos electrónicos y otras características que son tomadas en cuenta para su ejecución. Por otra parte, las WLAN en comparación con las LAN brindan mejores ventajas, se pueden efectuar a un precio inferior y los más resaltante de esta red es que son idóneas en lo referente a terminales inalámbricos, particularidad importante hoy en día por el gran uso de dispositivos móviles. En mención a lo anterior, es allí donde surge las Redes Mesh, las cuales son de fácil implementación, fácil configuración, dinámica y coste pequeño. Además, brindan un recurso muy importante a la eficacia de conectividad y cobertura de la red, por su característica de ser descentralizada y la capacidad de vincularse externamente del Access Point (AP) o punto de acceso mediante un nodo inalámbrico, lo que permite ampliar la cobertura ofrecida por el punto de acceso, lo que la vuelve más llamativa y que puede ser incorporada en distintas áreas como en la salud, gestión de desastres, educación, redes de domésticas de banda ancha, entre otros [2]. En la Fig. 1, se puede observar una red mallada.

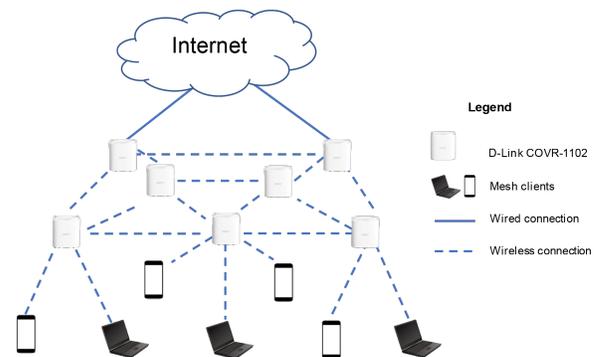


Fig. 1: Red mallada con conexión a Internet.

En una red mallada, lo único que tiene que estar conectado de forma física es un nodo a la conexión de una red WAN, y este nodo que es cableado se encarga de compartir inalámbricamente su conexión a Internet con el resto de los nodos cercanos. Además, la red mesh puede redirigir de mejor manera el tráfico que pasa por una red y poder conseguir siempre la mejor señal de la misma.

El Internet de las Cosas (IoT) en la actualidad es un avance muy importante en el mundo informático y el gran beneficiario es la sociedad en general. La tecnología es útil como una herramienta para la mejora de colaboración y toma de decisiones en un mundo donde confluye la parte física con la digital [3].

Se puede definir que IoT es un conjunto de objetos o

tipo de red que permite la recolección de datos en tiempo real de diferentes dispositivos electrónicos como sensores y actuadores los mismos que son capaces de interactuar entre sí a través de Internet, permitiendo la mejora de la calidad de vida de las personas, así mismo facilitando el acceso a información específica desde cualquier lugar y a cualquier hora [4] [5].

Las primeras tecnologías domóticas se empezaron a desarrollar en los años 70 y han ido evolucionando permitiendo al usuario apagar, encender o configurar ciertos dispositivos de su hogar. Como lo indica Ruwaida, Minkinen [6], muchos dispositivos electrónicos ahora tienen Wi-Fi y pueden interactuar con otros dispositivos domésticos, aplicaciones de teléfonos inteligentes y computadoras. Sin embargo, existen problemas, por ejemplo, no pueden comunicarse entre sí o requieren un dispositivo adicional para hacerlo y necesitan una aplicación individual en el smartphone para ser controlados. Además, los dispositivos conectados en el hogar no dejan de multiplicarse y en ocasiones el router no puede abarcar con todo, debido a que el Wi-Fi tradicional es una configuración de punto a multipunto en la que solo se tiene un nodo conectado con todos los demás nodos, y los otros nodos conectados se los denominan estaciones. Por tanto, es complicado detectar dichos problemas, porque existe gran diversidad de terminales y protocolos [7]. Los AP están sobrecargados con la responsabilidad de transmitir y proporcionar acceso a la red a todas las estaciones, esto limita el área de cobertura ya que todas las estaciones deben estar en el rango del AP y esto también limita el número de estaciones que se pueden conectar a un único punto de acceso.

Lo que se consiguió en este trabajo es extender la cobertura de la red mediante la implementación exitosa de una red mallada, la cual se conformó con los protocolos de comunicación Wi-Fi Mesh, MQTT y Bluetooth Low Energy (BLE). La implementación de esta red permitió conectar múltiples nodos en una única red, logrando una cobertura más amplia y confiable. Además, se utilizó Node-RED para el uso de BLE, PlatformIO para la codificación de microcontroladores, lo que permitió una integración más sencilla y eficiente de los sensores y actuadores en la red.

El trabajo consta de secciones: primera sección I. Introducción, donde se redactan los trabajos relacionados y contribuciones. Además, de la revisión de literatura. En la sección II, se redacta la Fundamentación teórica del prototipo. En la sección III, se centra en el Desarrollo del prototipo, siguiendo las fases de la metodología XP. En la sección IV, se analizan los resultados de los experimentos. La sección V, concluye este trabajo.

A. Trabajos Relacionados y Contribuciones

La estrategia de búsqueda de trabajos relacionados incluyó una búsqueda automática donde se seleccionaron los trabajos relacionados a través de una revisión sistemática de la literatura [8]. Las bases de datos digitales seleccionadas y consultadas fueron: Science Direct, SpringerLink, IEEE Xplore, IEEE Latin America Transactions y Scopus. En la Fig. 2, se muestra el proceso y sintaxis empleada.

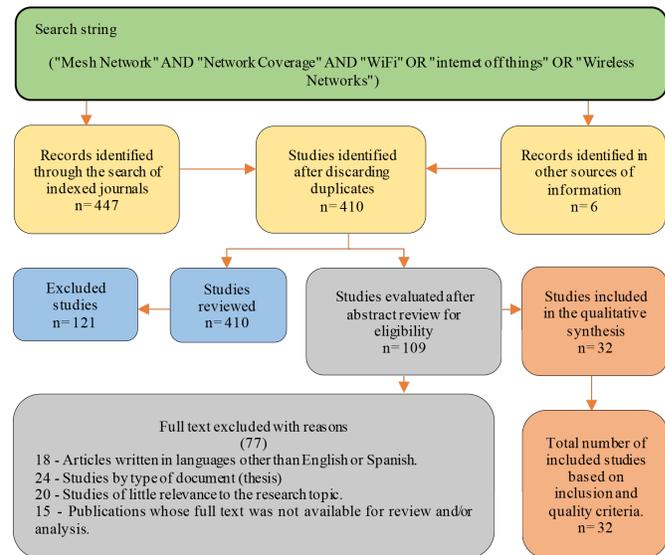


Fig. 2: Diagrama de flujo de trabajos relacionados.

Luego de realizar la búsqueda e implementar la inclusión y exclusión treinta y dos dieron como resultado para la lectura completa y proceder con la síntesis.

Seguidamente, se redacta transitoriamente los trabajos previos relacionados al trabajo de investigación.

Las redes de área local inalámbricas son ampliamente utilizadas gracias a sus grandes ventajas sobre las redes cableadas. Entre ellas, WiFi es popular por su capacidad de trabajo eficiente. Sin embargo, debido al rango de soporte limitado de WiFi, su desarrollo se limita hasta cierto punto. En el caso de no agregar infraestructura cableada y expandir los costos, considere usar dispositivos inalámbricos en Internet como enrutadores, reenviar datos continuamente y conectarse en red a través de múltiples saltos inalámbricos, las redes Mesh son una gran solución de conectividad ya que con su tecnología Mesh configurable y auto-regenerables se puede implementar en áreas urbanas, rurales y campus universitarios ofreciendo favorables resultados a miles de usuarios [9].

Como lo indica Islam, *et al.* [10], la red LoRa (Lon-Range) se ha convertido en una herramienta ideal con el Internet de las cosas para proporcionar recursos satisfactorios. Proponen una arquitectura idónea para automatizar un hogar de corto como para largo alcance, implementando varias tecnologías como LoRaWAN, Wi-Fi y Bluetooth, permitiendo controlar efectivamente diferentes aparatos electrónicos del hogar y manteniendo una gestión inteligente entre ellos.

El sistema que plantea Ye, *et al.* [11], es sobre el control de iluminación con el módulo TLSR8258. La comunicación de los dispositivos electrónicos es por medio de una red mallada Bluetooth Low Energy (BLE), la conexión del sistema es a través de un ESP32 en base a la puerta de enlace Bluetooth para que exista conexión a Internet. Si el usuario desea monitorear el estado de la luz de los módulos, puede utilizar el protocolo de mensajería MQTT y obtener la comunicación con la puerta de enlace Bluetooth Low Energy.

Los problemas que existen actualmente sobre el uso de metodologías de preparación tradicional y la escasa finan-

ciación para la instrucción deportiva en universidades, ha hecho que Wang, Cao y Tan [12], desarrollen un sistema de entrenamiento ágil con Wireless MESH Networks. La examinación de la topología de la red se la realiza en un ambiente de red mallada, donde se evalúan los tiempos de muestreo de los nodos y la tasa de pérdida de paquetes con el fin de exponer que las redes autoorganizadas tienen la capacidad de transmitir información en tiempo real. Los resultados obtenidos evidencian que cuando una determinada cantidad de nodos salta, el tiempo promedio de los nodos es menor a 300 ms y el porcentaje de pérdida de paquetes es aproximadamente del 0%. Finalmente, se evidencia que la red mallada inalámbrica es mucho más efectiva que las redes WiFi tradicionales.

La confiabilidad y latencia lo indica Gokalgandhi [13], como métricas que pueden ser utilizadas en el proceso de optimización del árbol de enrutamiento para WiFi Mesh. A diferencia de los métodos de optimización de enrutamiento que se utilizan en la actualidad, la propuesta que se plantea implica optimizar directamente tasas de datos de los enlaces de malla individuales de acuerdo con las condiciones del canal subyacente, de modo que se satisfagan los requisitos de confiabilidad y latencia para rutas de malla completas. Además, para mitigar el problema de contención de canales que es común en las redes WiFi, se plantea un método de asignación multicanal (MC). En este método, el ancho de banda se asigna a los nodos de malla individuales en función de la carga de tráfico esperada que se espera que manejen. Una vez que se determina el ancho de banda para cada nodo, se asignan canales específicos de forma que se evite la interferencia cocanal.

En el artículo perteneciente al autor Sánchez, *et al.* [14], plantea el diseño de una red Mesh para optimizar la calidad del servicio de internet vía WiFi en las instalaciones educativas universitarias, debido a que las redes Mesh son una gran solución de conectividad ya que con su tecnología Mesh configurable y auto-regenerables se puede implementar en áreas urbanas, rurales y campus universitarios ofreciendo favorables resultados a miles de usuarios. Obteniendo como resultado el diseño de la red Mesh y la optimización de la calidad del servicio de Internet a través WiFi con la ayuda de la herramienta de simulación Riverbed Modeler Academic Edition 17.5, la misma que permite mostrar resultados viables por medio de módulos y gráficos para una futura implementación beneficiando a los estudiantes docentes y administrativos de la institución universitaria.

B. Contribuciones

Las principales contribuciones de este trabajo son:

- Exploración sistemática, acerca del estado del arte de Internet of Things, Redes Inalámbricas y WiFi Mesh, a través de bases de datos indexadas.
- Desarrollar un prototipo de una red mallada mediante los protocolos Wi-Fi Mesh y MQTT para la mejora de la comunicación de los dispositivos de un hogar inteligente.
- Conectar dispositivos domésticos que estén fuera de alcance.

- Realizar diferentes tipos de pruebas que permitan determinar la eficiencia de la red mallada con los distintos tipos de muestras en un ambiente doméstico real promiscuo donde integrantes del hogar usan diferentes dispositivos en la misma red Wi-Fi.

C. Revisión de Literatura

En este apartado se implementó la metodología denominada Systematic Literature Review (SLR), semejante al estudio de Mazón, Pan [15]. Aplicando la búsqueda y sintaxis anteriormente mencionadas.

En Fig. 3, se visualiza el número de estudios publicados en Scopus entre el año 2018 y 2022, en relación a Internet of Things, WiFi y WiFi Mesh. Se observa que en el año 2018 y 2019 existieron mayores trabajos en comparación a los demás años.

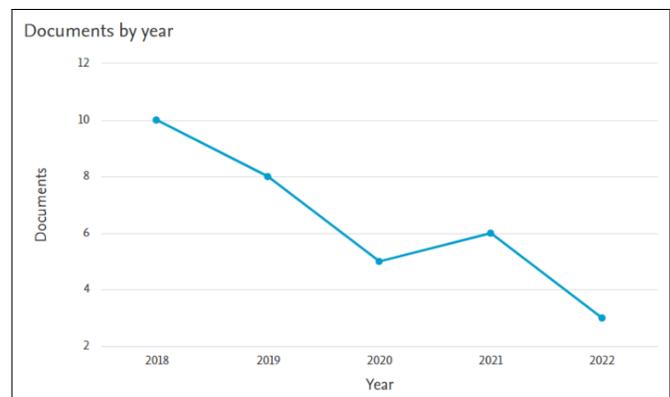


Fig. 3: Diagrama de líneas de publicaciones, años 2018 – 2022 Elaborado en [16]

En Fig. 4, se observa un análisis biométrico realizado en la herramienta VOSviewer, en relación a “Internet of Things”, “WiFi”, “Mesh Networking”, etc.

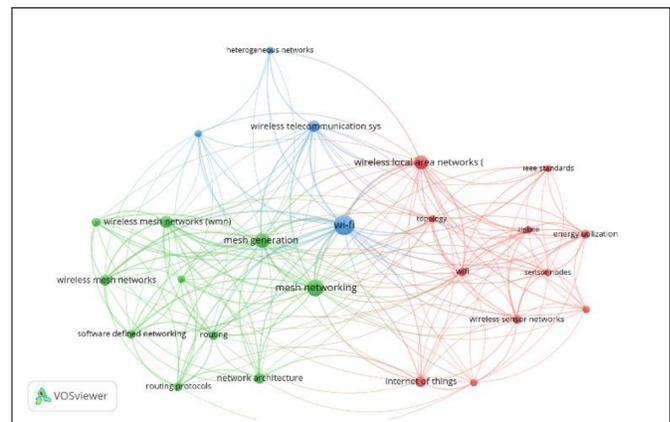


Fig. 4: Análisis biométrico. [Elaborado en [17]]

II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DEL PROTOTIPO

En esta sección se presentan los temas relevantes al prototipo.

A. Red de malla inalámbrica

Red de malla inalámbrica [18], se trata sobre una red de comunicación constituida por nodos de estación que interactúan entre sí a través de una topología mallada. Cada nodo posee la capacidad de interactuar uno al otro, siempre y cuando estén dentro del rango; básicamente crean una malla inteligente de AP, lo que permite la comunicación entre ellos para dirigir el tráfico de forma eficaz por medio de la red.

B. Tecnologías inalámbricas para IoT

Las tecnologías de comunicación inalámbricas tienen la capacidad de permitir conectar dispositivos, máquinas y sensores. La comunicación de los datos de los dispositivos IoT a cualquier circuito electrónico es muy importante para la toma de decisiones en un sistema IoT [19]. Las principales Tecnologías son las siguientes: RFID, LoraWAN, SigFox, Bluetooth, IEEE 802.15.4, Wireless Fidelity (Wi-Fi), 6LoWPAN, ZigBee, Z-Wave, LTE, NFC, UWB, M2M, Onda Z, WiMax, LTE-A [20], [21], [22], [23], [24].

C. Protocolos de mensajería de datos

Los protocolos de mensajería de datos se dividen en los niveles de Capa de Aplicación Constrained Application Protocol (CoAP), Message Queuing Telemetry Transport (MQTT), MQTT for Sensor Networks (MQTT-SN), Representational State Transfer (REST), Extensible Messaging and Presence Protocol (XMPP), Data Distribution Service (DDS), Advanced Message Queuing Protocol (AMQP), y Capa de Infraestructura Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks (RPL), 6LoWPAN, IEEE 802.15.4, Bluetooth Low Energy, EPCglobal, Long Term Evolution—Advanced (LTE-A), Z-Wave [21], [25], [26], [27], [28], [29].

D. MQTT

MQTT es un protocolo de comunicación diseñado para la transmisión de datos en redes de sensores y IoT. Fue creado con el objetivo de ser una solución eficiente y fácil de usar para la conexión de dispositivos y aplicaciones en tiempo real. Con un enfoque en la eficiencia de los recursos, MQTT utiliza un modelo de publicación/suscripción que permite a los dispositivos publicar y recibir mensajes de manera asíncrona. Esto significa que los dispositivos pueden recibir información de manera constante sin tener que establecer una conexión activa. Además, el protocolo utiliza una estructura de paquetes pequeños, lo que significa que puede ser utilizado en dispositivos con recursos limitados.

E. Home Assistant

Home Assistant es una plataforma de automatización del hogar de código abierto que permite a los usuarios controlar y automatizar sus dispositivos inteligentes y electrónicos en el hogar. Con Home Assistant, los usuarios pueden unificar el control de sus dispositivos en una sola aplicación, lo que les permite tener una visión centralizada de su hogar conectado. Además, Home Assistant permite la integración

con una amplia variedad de dispositivos y plataformas, lo que significa que los usuarios pueden controlar sus dispositivos inteligentes, incluyendo termostatos, luces, cámaras, etc. a través de una sola aplicación.

F. PlatformIO

PlatformIO es un entorno de desarrollo integrado (IDE) de código abierto para la programación de microcontroladores y sistemas embebidos. Es una plataforma que brinda a los desarrolladores una solución completa para el desarrollo de proyectos de hardware y software, lo que les permite centrarse en la lógica del sistema en lugar de perder tiempo en la configuración del entorno de desarrollo.

G. Gateway IoT

Es un módulo físico que posee un software de control que opera como una brecha, dando un acceso confiable a Internet a las redes de sensores. Una puerta de enlace o Gateway, en general, es un dispositivo desarrollado para conectar diferentes sistemas IoT. Además, se debe saber que sus funcionalidades y componentes internos depende de lo que se va a ensamblar [30]. En una arquitectura IoT el Gateway opera como un elemento importante, por lo que brinda diferentes resultados como: centra la conectividad y transformación de protocolos, a través de varias tecnologías de dispositivos autónomos y en el centro de proceso de información remoto. Un Gateway puede estar fijamente situado en un ordenador o en un Smartphone, en ambos entornos se puede realizar la comunicación del mote y una plataforma IoT. De igual manera, el Gateway tiene la capacidad de recibir la información de los dispositivos IoT situados en las redes de sensores inalámbricos, los tramita y acopla transitoriamente, para posteriormente direccionarlos, enrutarlos y remitirlos, por medio de un protocolo de comunicación, al entorno IoT [15], [31].

III. DESARROLLO DEL PROTOTIPO

En esta sección se analizaron tres tipos de metodologías, metodología Scrum, metodología Cascada y metodología Programación Extrema (XP). En base al análisis de las definiciones y fases de cada una de las metodologías, se optó por elegir la que mejor se adapte al objetivo y problemática de este trabajo, dando como resultado la elección de la metodología XP que cuenta con 4 fases que son las siguientes:

- Planificación - Fase 1
- Diseño - Fase 2
- Codificación - Fase 3
- Test - Fase 4

A continuación se presentan los detalles de la planificación de la investigación para el desarrollo del prototipo.

A. Planificación - Fase 1

En esta primera fase es importante conocer la información que se transmitirá. Además, se estudiaron las bases fundamentales para el desarrollo de la red mallada. Por tanto, dado que este trabajo pretende realizar un prototipo de red mallada,

optamos por elegir protocolos basados en la comunicación de varios módulos.

Se estableció en utilizar el IDE PlatformIO, con el objetivo de realizar la codificación de microcontroladores y sensores. En base a esos dispositivos IoT, se instaló el broker Mosquitto integrado en la plataforma Home Assistant (HASSIO), implementando los protocolos MQTT y WiFi Mesh, con esto de logrará el manejo de entidades en Hassio y el intercambio de información entre varios nodos. Para una mayor interacción entre ellos, se utilizarán los datos tipos JSON.

Posteriormente, se definió el funcionamiento de Bluetooth Low Energy (BLE) en la lectura y escritura de datos. De igual manera, se empleó el software basado en flujos Node-RED situado en una Raspberry Pi, que contendrá los nodos BLE y MQTT que servirán en la interacción de datos entre el sistema domótico y los dispositivos de la WiFi Mesh.

Finalmente, las pruebas se realizaron a través de escenarios donde se midieron las siguientes métricas: latencia y pérdida de paquetes.

B. Diseño - Fase 2

En esta segunda fase se puso en práctica aquellos elementos que intervienen directamente en la creación de los diseños óptimos para la implementación del prototipo de la red mallada.

- Arquitectura IoT

En la Fig. 5 los dispositivos IoT que conforman la WiFi Mesh son: 2 ESP32 (tarjetas DIY), 2 Lopy4 (equipo comercial que integra un ESP32 y Sonoff (equipo comercial que integra un ESP8266)). Estos son los encargados de recibir y enviar datos en forma de estructuras de mensajes de los sensores y actuadores a la red mallada. De igual manera, esa información es receptada por un Gateway BLE que tiene comunicación bidireccional con la herramienta de programación visual Node-Red, además, esa información es enviada al bróker MQTT. Finalmente, los resultados serán visualizados en dashboard dentro de HASSIO como se muestra en la Fig 6

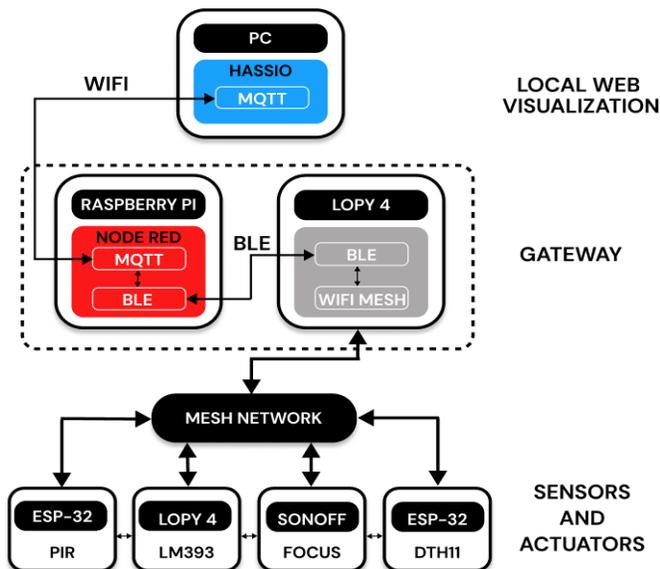


Fig. 5: Arquitectura IoT del sistema propuesto.

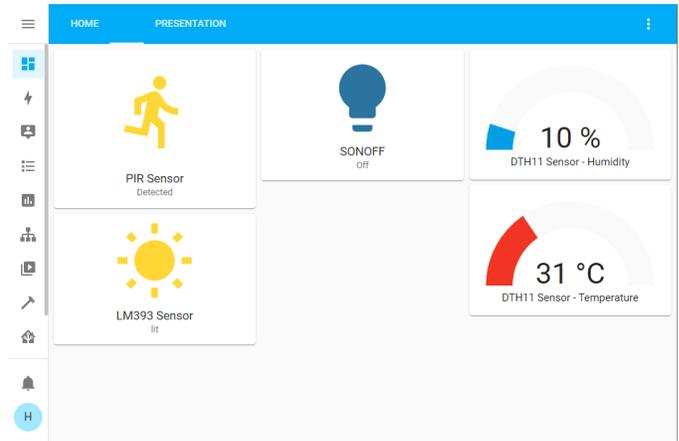


Fig. 6: Panel de control en Home Assistant para supervisar y controlar los dispositivos IoT en la red mallada.

- Hardware

En la implementación de una red mallada y los experimentos a evaluar es necesario el uso de varios microcontroladores y sensores. Aquellos elementos mencionados serán utilizados en función del circuito. En la Table I se especifican los componentes indispensables para la construcción del proyecto.

TABLE I: Requisitos del Hardware

Hardware	Definición
Módulo ESP32	Los dos ESP32 se utilizarán en la red WiFi Mesh.
LoPy4	Los dos LoPy4 se utilizarán en la red WiFi Mesh.
Raspberry Pi 3 Modelo B	Permite la conexión BLE y MQTT.
Módulo Sensor de Temperatura DHT11	Idóneo para medir la temperatura y humedad del ambiente.
Módulo Ldr Fotoresistencia Lm393	Idóneo para medir la intensidad de la luz ambiental.
Portátil	8 GB RAM - Procesador Intel Core i7.
Smartphone	8 GB RAM - Androi 11.
Módulo Sensor de Movimiento PIR	Capaz de detectar movimiento.
Protoboard	Es la placa de prueba donde se insertarán los dispositivos IoT y cables dupont para construir los circuitos electrónicos.
Cable USB A / micro-USB B	Permite la conexión entre los módulos ESP32, LoPy4 y Raspberry Pi 3 y la portátil.
Cables Dupont	Establece una conexión entre los dispositivos.

A continuación, se muestran los diseños de cada uno de los escenarios de pruebas.

En la Fig. 7 se puede observar los circuitos usados para replicar escenarios de L.D. (Long Distance), L.O.S. (Light of sight), No L.O.S. (No light of sight) y que más adelante se podrá observar en un escenario real dentro de un domicilio. El diseño L.D es para la recolección de datos de temperatura y humedad en tiempo real. El diseño L.O.S es para medir los datos de intensidad de luz. El diseño No L.O.S es para la recolección de movimiento y por último SON OFF que es para

encender o apagar un foco. Aquellos datos serán procesados y enviados a la red Mes.

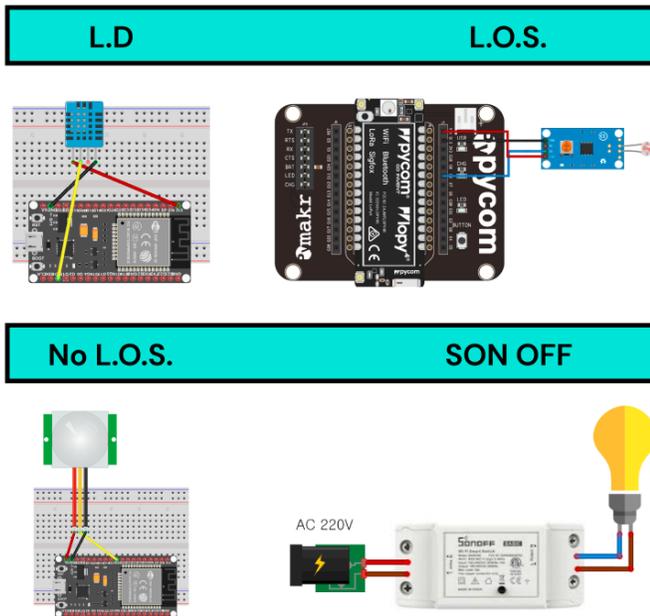


Fig. 7: Dispositivos IoT utilizados en los diferentes escenarios de pruebas

- Software

Para cumplir con algunas actividades es fundamental el uso de programas basados en el desarrollo de componentes lógicos, en la Table II se describen los softwares que se utilizan para el objetivo de este trabajo.

TABLE II: Requisitos del Software

Software	Definición
Visual Studio Code	Brinda las herramientas esenciales para desarrollar varios tipos de programas debido a que es un editor de código fuente.
C++	Es un lenguaje de programación que sirve para la programación de los microcontroladores y sensores.
PlatformIO	Es una herramienta multiplataforma, multiarquitectura para el desarrollo C++ en dispositivos integrados .
Raspberry PI OS Lite	Es una versión de SO Raspberry Pi.
Home Assistant	Sirve como Gateway del bróker MQTT y la visualización de sus datos.

C. Codificación - Fase 3

En esta tercera fase se realizó la codificación de los microcontroladores, implementando sensores y actuadores. Así mismo, se desarrollo la red mallada, se configuró Home Assistant y se realizaron los flujos de programación visual en la herramienta Node-Red.

Cabe mencionar que en nuestro repositorio de GitHub [32] se alojan todos los códigos desarrollados e implementados para cada uno de los dispositivos IoT anteriormente mencionados. De igual forma se encuentra los archivos de configuración de HASSIO y los flujos realizados en la herramienta de programación visual Node-Red.

Un elemento importante de nuestra solución es el Gateway IoT implementado. Como se puede apreciar en la Fig 8, esta formado por un Rpi 3 y un Lopy 4. El Rpi 3 se conecta por a la plataforma HASSIO por medio de la red Wi-fi convencional del hogar, lo cual además permite acceso remoto a dicha plataforma via internet si fuese necesario. Además a través de su módulo BLE integrado se conecta al módulo BLE correspondiente del lado del Lopy4, cuyo módulo wifi es usado para formar parte de la red mallada ad-hoc.

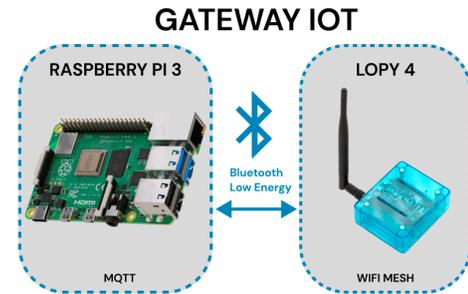


Fig. 8: Gateway IoT

Los flujos de node-red, que corren sobre el Rpi 3 para una comunicación bidireccional a través de BLE se muestran en las figs 9 y 10.

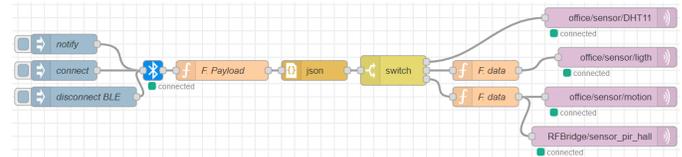


Fig. 9: Flujo de lectura BLE en nodo-red implementado en el gateway Rpi

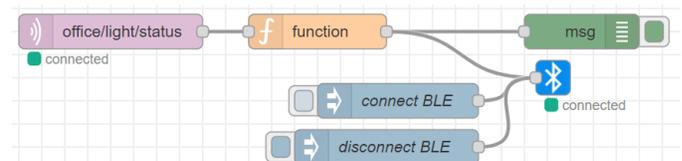


Fig. 10: Flujo de escritura BLE en nodo-red implementado en el gateway Rpi

D. Test - Fase 4

En esta última fase que son las pruebas del prototipo, los objetivos de este punto son la medición de la latencia y la pérdida de paquetes, para cumplir con aquellos objetivos se utilizaron los recursos de hardware y software anteriormente mencionados y, un escenario de pruebas en un domicilio real como se lo puede observar en la Fig 11.

- Escenario

En la Fig. 11 muestra el escenario de pruebas en un domicilio real con todos los nodos de la red mallada, los cuales estarán ubicados en diferentes puntos estratégicos de un domicilio para evaluar la latencia y pérdida de datos dentro de la arquitectura.

- **Line of Sight (L.O.S):** prueba sin obstáculo. - **No - L.O.S:** prueba con obstáculo. - **Long distance:** prueba de distancia larga para ver el comportamiento de la Mesh.

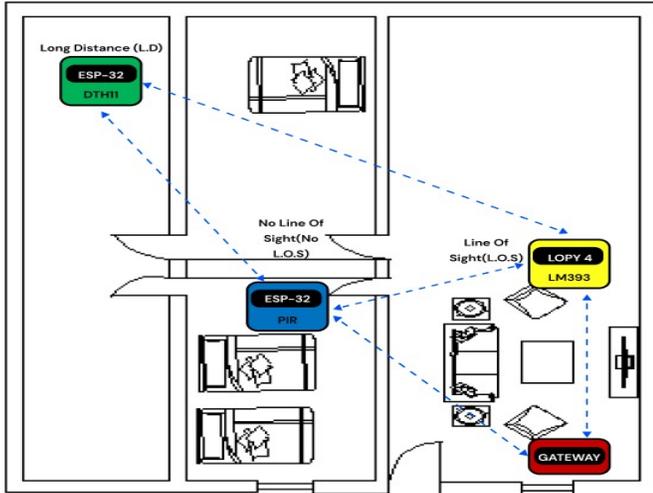


Fig. 11: Escenario de prueba con la ubicación real de los nodos en una domicilio

IV. RESULTADOS

En la Table III se puede visualizar que el mejor promedio de latencia se encuentra en el escenario L.O.S con 1,56 seg, mientras que el peor promedio se encuentra en el escenario L.D con 2,14 seg. El escenario con mejor tiempo mínimo es el No L.O.S, y del tiempo máximo está en el escenario L.D. Finalmente el mejor panorama de los paquetes recibidos está en el escenario No L.O.S. De igual forma, en los paquetes perdidos.

TABLE III: Latencias con tiempo de muestreo de 1 seg

Métricas	Escenarios		
	No L.O.S	L.O.S	L.D
Promedio Latencia (seg)	1,90	1,56	2,14
Tiempo Mínimo (seg)	0,47	0,51	0,51
Tiempo Máximo (seg)	3,50	3,52	3,93
Paquetes Recibidos (%)	22	21	21
Paquetes Perdidos (%)	78	79	79

En la Table IV que corresponde al tiempo de muestreo de 1 minuto, se observa que el mejor promedio de latencia esta ubicado en el escenario No L.O.S y el peor está en el escenario L.O.S. En lo referente al tiempo mínimo y máximo el mejor panorama se encuentra en el escenario No L.O.S. El escenario L.O.S representa la mejor opción para los paquetes recibidos y perdidos.

TABLE IV: Latencias con tiempo de muestreo de 1 min

Métricas	Escenarios		
	No L.O.S	L.O.S	L.D
Promedio Latencia (seg)	1,47	1,62	1,51
Tiempo Mínimo (seg)	0,29	0,39	0,30
Tiempo Máximo (seg)	3,39	3,79	5,31
Paquetes Recibidos (%)	89	93	89
Paquetes Perdidos (%)	11	7	11

En la Table V que es el último tiempo de muestreo de 3 minutos correspondiente a L.D, se puede observar que el mejor panorama para el promedio de latencia se encuentra en el escenario No L.O.S. El tiempo mínimo y máximo la mejor opción es en el escenario No L.O.S. Finalmente, para los paquetes recibidos y pedidos el mejor escenario es el L.O.S.

TABLE V: Latencias con tiempo de muestreo de 3 min

Métricas	Escenarios		
	No L.O.S	L.O.S	L.D
Promedio Latencia (seg)	3,34	3,36	3,47
Tiempo Mínimo (seg)	0,53	0,17	0,10
Tiempo Máximo (seg)	29,74	29,78	29,74
Paquetes Recibidos (%)	50%	45%	51%
Paquetes Perdidos (%)	50%	55%	49%

A. Añálisis de Resultados

En la Fig. 12 se muestra el promedio de los escenarios para cada uno de los tiempos de muestreo. El peor es de 1 seg, porque existen muchas pérdidas, no se aconseja para aplicaciones donde se requiere una actualización de los datos de forma inmediata, lo cual no afecta a este proyecto ya que en domótica 1 min de tiempo de muestreo es suficiente para las variables típicas obtenidas con humedad, temperatura, estatus de las luminarias, etc.

Practicamente no hay diferencia entre los escenarios para cada tiempo de muestreo, para el tiempo de muestreo de 3 min, las latencias de No L.O.S, L.O.S y LD son practicamente las mismas. Lo mismo sucede con los de paquetes perdidos.

Finalmente, el tiempo de muestreo óptimo para este prototipo es de 1 min, ya que se obtienen tanto la misma latencia como la misma pérdida de paquetes.

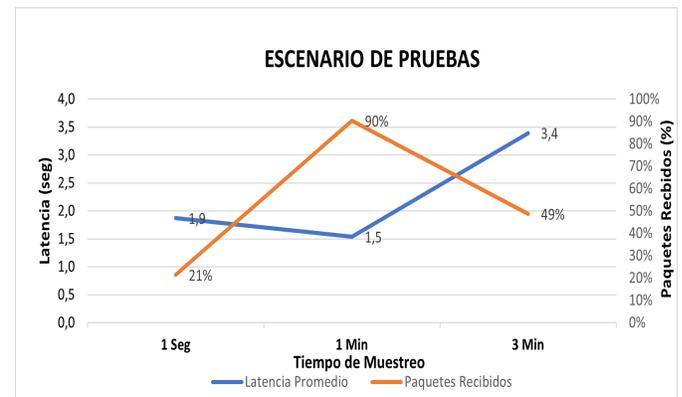


Fig. 12: Relación entre latencias y paquetes recibidos promedio en los escenarios para cada tiempo de muestreo.

V. CONCLUSIÓN

En aplicaciones IoT donde se monitoreen variables con tiempos de respuestas superiores a 1 segundo, como la temperatura, humedad, calidad del aire, entre otras, como es el caso de la domótica y edificios inteligentes, la implementación de redes tipo mesh es una excelente alternativa a las redes wifi convencionales. La red mesh implementada permitió crear una solución viable y escalables a bajo costo, permitiendo

umentar la cobertura e interconectividad de dispositivos inteligentes heterogéneos. En nuestro caso, para crear la red wifi-mesh se utilizaron diferentes plataformas de hardware basado en ESP32 y ESP8266, incluso dispositivos comerciales como Sonoff y Lopy4, los cuales fueron integrados a la plataforma domótica Home Assistant a través del protocolo MQTT.

REFERENCES

- [1] P. Pico-Valencia, J. A. Holgado-Terriza, and X. Quiñónez-Ku, "A brief survey of the main internet-based approaches. an outlook from the internet of things perspective," in *2020 3rd International Conference on Information and Computer Technologies (ICICT)*, 2020, pp. 536–542.
- [2] S. Mekhmoukh Taleb, Y. Meraihi, A. B. Gabis, S. Mirjalili, A. Zaguia, and A. Ramdane-Cherif, "Solving the mesh router nodes placement in wireless mesh networks using coyote optimization algorithm," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 52 744–52 759, 2022.
- [3] D. Hernández Rojas, B. Mazon Olivo, and C. Escudero, *Internet de las cosas (IoT)*, 1st ed. Machala, Ecuador: UTMACH, 2018. [Online]. Available: <http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/13325/1/CAP-2.AnalisisDeDatosAgropecuarios.pdf>
- [4] B. Wang, X. Liu, and Y. Zhang, *Internet of Things*. Singapore: Springer Singapore, 2022, pp. 71–127. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-981-16-9194-2_2
- [5] S. Villamil, C. Hernandez, and G. Tarazona, "An overview of internet of things," *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 18, no. 5, p. 2320, Oct. 2020. [Online]. Available: <http://telkomnika.uad.ac.id/index.php/TELKOMNIKA/article/view/15911>
- [6] B. Ruwaida and T. Minkinen, "Home Automation System : A cheap and open-source alternative to control household appliances," *Semantic Scholar*, p. 45, 2013.
- [7] O. Demirtaş and M. Ilyas, "Cloud assisted approach for determining wifi problems in field deployed mesh aps - a case study for quality problems," in *2020 28th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 2020, pp. 1–4.
- [8] M. M. Amoroso, R. Moraes, G. Medeiros de Araujo, and V. S. Rodrigues, "Wireless Network Technologies for Smart Homes: A Technical and Economic Analysis," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 19, no. 5, pp. 717–725, Jun. 2021. [Online]. Available: <https://latam.ieeer9.org/index.php/transactions/article/view/3916>
- [9] S. W. Nourildean, M. D. Hassib, and Y. A. Mohammed, "Internet of things based wireless sensor network: a review," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 27, no. 1, p. 246, Jul. 2022. [Online]. Available: <https://ijeecs.iaescore.com/index.php/IJECS/article/view/27227>
- [10] R. Islam, M. W. Rahman, R. Rubaiat, M. M. Hasan, M. M. Reza, and M. M. Rahman, "LoRa and server-based home automation using the internet of things (IoT)," *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, vol. 34, no. 6, Part B, pp. 3703–3712, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319157820306285>
- [11] S. Ye, X. Huang, Z. Zhong, M. You, F. He, J. Zhou, B. Zhou, H. Chen, and L. Zhao, "Research on networking technology based on ble mesh," in *2022 IEEE 5th International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT)*, 2022, pp. 540–542.
- [12] E. Wang, K. Cao, and B. Tan, "Wireless mesh networks and its application in sports agility test," in *2022 IEEE 4th Eurasia Conference on Biomedical Engineering, Healthcare and Sustainability (ECBIOS)*, 2022, pp. 102–106.
- [13] B. Gokalgandhi, M. Tavares, D. Samardzija, I. Seskar, and H. Gacanin, "Reliable low-latency wi-fi mesh networks," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 6, pp. 4533–4553, 2022.
- [14] R. Sánchez-Pinargote, M. J. Rodríguez Véliz, and E. Cedeño-Palma, "MESH Networks to Optimize the Quality of Internet Service via WiFi in University Institutions," in *Emerging Research in Intelligent Systems*, M. Botto-Tobar, H. Cruz, A. Díaz Cadena, and B. Durakovic, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2022, vol. 405, pp. 255–267, series Title: Lecture Notes in Networks and Systems. [Online]. Available: https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-96043-8_20
- [15] B. Mazon-Olivo and A. Pan, "Internet of Things: State-of-the-art, Computing Paradigms and Reference Architectures," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 20, no. 1, pp. 49–63, May 2021. [Online]. Available: <https://latam.ieeer9.org/index.php/transactions/article/view/5037>
- [16] Scopus. (2023) Scopus. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/>
- [17] VOSviewer. (2023) Vosviewer. [Online]. Available: <https://www.vosviewer.com/>
- [18] R. Kashyap, M. Azman, and J. G. Panicker, "Ubiquitous mesh: A wireless mesh network for iot systems in smart homes and smart cities," in *2019 IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICEECT)*, 2019, pp. 1–5.
- [19] S. S. Dhanda, B. Singh, and P. Jindal, "Wireless Technologies in IoT: Research Challenges," in *Engineering Vibration, Communication and Information Processing*, K. Ray, S. N. Sharan, S. Rawat, S. K. Jain, S. Srivastava, and A. Bandyopadhyay, Eds. Singapore: Springer Singapore, 2019, pp. 229–239.
- [20] A. Khanna and S. Kaur, "Evolution of Internet of Things (IoT) and its significant impact in the field of Precision Agriculture," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 157, pp. 218–231, 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169918316417>
- [21] A. Čolaković and M. Hadžialić, "Internet of Things (IoT): A review of enabling technologies, challenges, and open research issues," *Computer Networks*, vol. 144, pp. 17–39, Oct. 2018. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1389128618305243>
- [22] I. Yaqoob, I. A. T. Hashem, Y. Mehmood, A. Gani, S. Mokhtar, and S. Guizani, "Enabling communication technologies for smart cities," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 1, pp. 112–120, 2017.
- [23] M. Pareek and S. Buriya, "A Study of Link Layer Protocols in IOT," *International Journal on Future Revolution in Computer Science & Communication Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 355 – 359, Feb. 2018.
- [24] L. González, O. Sofía, D. Laguía, E. Gesto, and K. Hallar, "Internet del Futuro – Estudio de tecnologías IoT," *Informes Científicos Técnicos - UNPA*, vol. 12, no. 3, pp. 105–137, Dec. 2020. [Online]. Available: <https://publicaciones.unpa.edu.ar/index.php/ICTUNPA/article/view/744>
- [25] S. Sinche, D. Raposo, N. Armando, A. Rodrigues, F. Boavida, V. Pereira, and J. S. Silva, "A Survey of IoT Management Protocols and Frameworks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 22, no. 2, pp. 1168–1190, 2020. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8848791/>
- [26] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, "Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376, 2015. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7123563/>
- [27] J. Novillo-Vicuña, D. Hernández Rojas, B. Mazón Olivo, J. Molina Ríos, and O. Cárdenas Villavicencio, *Arduino y el Internet de las cosas*, 1st ed. Editorial Científica 3Ciencias, Oct. 2018. [Online]. Available: <https://www.3ciencias.com/libros/libro/arduino-y-el-internet-de-las-cosas/>
- [28] G. Durante, W. Beccaro, and H. Peres, "Iot protocols comparison for wireless sensors network applied to marine environment acoustic monitoring," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 11, pp. 2673–2679, 2018.
- [29] D. L. Hernández-Rojas, T. M. Fernández-Caramés, P. Fraga-Lamas, and C. J. Escudero, "A Plug-and-Play Human-Centered Virtual TEDS Architecture for the Web of Things," *Sensors*, vol. 18, no. 7, 2018. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/7/2052>
- [30] C. R. M. Silva and F. A. C. M. Silva, "An iot gateway for modbus and mqtt integration," in *2019 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, 2019, pp. 1–3.
- [31] D. Hernandez-Rojas, B. Mazon-Olivo, J. Novillo-Vicuña, C. Escudero-Cascon, A. Pan-Bermudez, and G. Belduma-Vacacela, "IoT Android Gateway for Monitoring and Control a WSN," in *Technology Trends*, M. Botto-Tobar, N. Esparza-Cruz, J. León-Acurio, N. Crespo-Torres, and M. Beltrán-Mora, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 18–32.
- [32] A. Guevara and H. Moran. (2022) Wi-fimeshprotocol. [Online]. Available: <https://github.com/HectorEdd99/MeshNetwork>



Allan Guevara Villacres , es estudiante de la Facultad de Ingeniería Civil de la carrera de Tecnología de la Información de la Universidad Técnica de Machala. Integrante del grupo de investigación AutoMathTIC.



Héctor Morán Guevara , es estudiante de la Facultad de Ingeniería Civil de la carrera de Tecnología de la Información de la Universidad Técnica de Machala. Integrante del grupo de investigación AutoMathTIC.



Dixys Hernández Rojas , es Ingeniero electrónico y Máster en Electrónica por la UCLV - Cuba. PhD en TIC-Redes Móviles por la UDC- España. Experto en sistemas embebidos full-stack. Línea de investigación actual en IoT, Realidad aumentada, Blockchain y Seguridad IoT. Profesor titular e investigador de la UTMACH donde dirige el grupo de investigación AutoMathTIC.



Joffre Cartuche Calva , es Ingeniero en sistemas informáticos por la ESPOCH. Magíster en ingeniería del software por la ESPE. Candidato a doctor en TIC-Redes móviles en la UDC, España. Líneas de investigación ingeniería de software, gestión de proyecto y seguridad IoT. Ha trabajado en empresas públicas y privadas actualmente docente titular de la UTMACH.