

Análisis del Rendimiento de Tecnologías Inalámbricas que Permitan el Uso de Dispositivos IoT
en Redes de Área Local.

Anderson Franco Chacón y Natalia Higinio Zapata

Trabajo de investigación para optar al título de Ingeniero Electrónico.

Director

Lizeth Dayane Cortes Hernández

Magíster en Ingeniería Electrónica

Codirector

Jaime Guillermo Barrero Perez

Magíster en Ingeniería Electrónica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Ingeniería Electrónica

Bucaramanga

2024

Tabla de Contenido

Introducción	11
1 Objetivos	14
1.1 Objetivo General	14
1.2 Objetivos Específicos	14
2 Marco de referencia	15
2.1 Problemática y relevancia	19
2.1.1 Contextualización del problema	19
2.2 Definiciones relevantes	21
2.2.1 IoT en domótica	21
2.2.2 Redes Zigbee	21
2.2.2.1 Arquitectura	22
2.2.2.2 Ventajas	23
2.2.2.3 Seguridad	24
2.2.2.4 Flexibilidad y escalabilidad	24
2.2.3 Protocolo mqtt	24
2.3 Factores de rendimiento	25
2.3.1 Software de medición de rendimiento	25

3 Implementación de la red	27
3.1 Planificación de la red	27
3.1.1 Elección de elementos	27
3.2 Diseño e implementación de la red	30
4 Metodología para estimar tiempos de respuesta	36
4.1 Selección del software para medición de tiempos de respuesta	36
4.2 Identificación de elementos en la red	37
4.3 Selección de emulador para manejo de la aplicación Smart Life	39
4.4 Cálculos de tiempos de respuesta	41
5 Análisis de la red	43
5.1 Medición de tiempo de respuesta con línea de visión	43
5.2 Medición de tiempo de respuesta sin línea de visión	49
6 Conclusiones	54
7 Recomendaciones	57
Referencias Bibliográficas	59
Apéndices	61

Lista de Figuras

Figura 1	Dispositivos Zigbee	29
Figura 2	Conexión interna del switch.	31
Figura 3	Plano de conexiones del switch Zigbee.	32
Figura 4	Montaje del switch Zigbee con las cargas.	32
Figura 5	Red para controlar dispositivos Zigbee.	34
Figura 6	Plano final.	35
Figura 7	Software Wireshark	37
Figura 8	Elementos en la red	38
Figura 9	Paquetes de la red.	39
Figura 10	Emulador BlueStacks.	40
Figura 11	Prueba de las cargas en el emulador.	41
Figura 12	Dirección IP de origen y tiempos.	42
Figura 13	Prueba del relé	43
Figura 14	Plano de las distancias recorridas para las pruebas con línea de visión.	44
Figura 15	Prueba con línea de visión.	45
Figura 16	Paquetes de la red.	46
Figura 17	Gráfica de tiempos con línea de visión.	48

Figura 18	Gráfica de tiempos promedio de cargas con línea de visión.	49
Figura 19	Plano de las distancias recorridas para las pruebas sin línea de visión.	50
Figura 20	Pruebas sin línea de visión	51
Figura 21	Gráfica de tiempos sin línea de visión.	52
Figura 22	Gráfica de tiempos promedio de cargas sin línea de visión.	53
Figura 23	Activación carga 1.	63
Figura 24	Activación carga 2.	63
Figura 25	Activación carga 3.	64
Figura 26	Activación carga 4.	64
Figura 27	Paquetes de la red tiempos de respuesta 1	65
Figura 28	Paquetes de la red tiempos de respuesta 2	66

Lista de Apéndices

Apéndice A. Instrucciones para Instalar Wireshark.	61
A.1 Windows.	61
A.1.1 Descarga del instalador.	61
A.1.2 Ejecución del instalador.	61
A.1.3 Configuración de la instalación.	62
A.1.4 Finalización de la instalación.	62
Apéndice B. Activación de cada una de las cargas por medio del emulador.	62
Apéndice C. Tiempos de respuesta.	65

Glosario

Ancho de banda. La cantidad máxima de datos que pueden ser transferidos a través de una conexión de red en un período de tiempo determinado.

Compatibilidad. La capacidad de diferentes dispositivos y tecnologías para funcionar juntos sin problemas en una red.

Dispositivo IoT. Dispositivos físicos que están conectados a Internet y tienen la capacidad de recopilar y transmitir datos.

Escalabilidad. La capacidad de una red para crecer y adaptarse a un mayor número de dispositivos y usuarios.

IoT (Internet de las cosas). Concepto que se refiere a la interconexión digital de dispositivos cotidianos a través de Internet, permitiendo que estos dispositivos envíen y reciban datos.

Latencia. El tiempo que tarda un paquete de datos en viajar desde el origen hasta el destino.

Redes de área local. Redes de comunicación que conectan dispositivos en un área geográfica limitada, como una casa, edificio u oficina.

Rendimiento de red. Medida de la eficiencia y efectividad de una red de comunicación, generalmente evaluada en términos de velocidad de transferencia, latencia, confiabilidad, etc.

Seguridad de red. Medidas implementadas para proteger la integridad y confidencialidad de los datos transmitidos a través de una red.

Topología de red. La estructura física o lógica de una red, incluyendo cómo están conectados los dispositivos entre sí.

Topologías inalámbricas. Tecnologías que permiten la transmisión de datos sin la necesidad de cables físicos, incluyendo WiFi, Bluetooth, Zigbee, etc.

Resumen

Título: Análisis del Rendimiento de Tecnologías Inalámbricas que Permitan el Uso de Dispositivos IoT en Redes de Área Local. *

Autores: Anderson Franco Chacón, Natalia Higinio Zapata **

Palabras Clave: Confiabilidad, Eficiencia, IoT, Rendimiento, Zigbee.

Descripción: En un contexto de creciente conectividad en los hogares modernos, las redes domóticas basadas en el Internet de las cosas (IoT) se perfilan como una tendencia en alza. Aunque la implementación de estas redes ofrece numerosos estándares funcionales, la carencia de una guía clara sobre el rendimiento de estas tecnologías dificulta la toma de decisiones informadas. Ante esta problemática, se ha identificado la necesidad de analizar la tecnología Zigbee, reconocida como una de las más empleadas en el ámbito de la domótica. El estudio se centra en analizar el rendimiento de las redes domóticas IoT basadas en la tecnología Zigbee, con el objetivo de identificar y resolver problemas potenciales, mejorar la eficiencia, estabilidad y confiabilidad de la red para ofrecer una experiencia óptima al usuario en entornos domésticos conectados. Se llevó a cabo un estudio para medir y analizar el rendimiento de estas redes, evaluando factores como la calidad de la señal, la distancia y la presencia de obstáculos, mediante la implementación de la red domótica, la medición de tiempos de respuesta y la evaluación en diversas condiciones de trabajo. Los resultados revelaron que la calidad de la señal y la presencia de obstáculos, como muros en las edificaciones, influyen significativamente en el rendimiento de la red, identificando problemas potenciales que afectan la eficiencia y estabilidad esta. El estudio proporciona una guía clara para optimizar la experiencia del usuario en entornos domésticos cada vez más tecnológicos y conectados, destacando la importancia de abordar tanto los aspectos técnicos como las necesidades del usuario para garantizar el éxito de las redes domóticas IoT basadas en Zigbee.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingeniería Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Lizeth Dayane Cortes Hernández. Codirector: Jaime Guillermo Barrero Perez

Abstract

Title: Performance Analysis of Wireless Technologies Enabling IoT Devices in Local Area Networks. *

Authors: Anderson Franco Chacón, Natalia Higinio Zapata. **

Keywords: Efficiency, IoT, Performance, Reliability, Zigbee.

Description: In a context of increasing connectivity in modern homes, home automation networks based on the Internet of Things (IoT) are emerging as a growing trend. Although the implementation of these networks offers numerous functional standards, the lack of clear guidance on the performance of these technologies makes it difficult to make informed decisions. Given this problem, the need to analyze Zigbee technology, recognized as one of the most widely used in the field of home automation, has been identified. The study focuses on analyzing the performance of IoT home automation networks based on Zigbee technology, with the aim of identifying and solving potential problems, improving the efficiency, stability and reliability of the network to provide an optimal user experience in connected home environments. A study was carried out to measure and analyze the performance of these networks, evaluating factors such as signal quality, distance and the presence of obstacles, through the implementation of the home automation network, measurement of response times and evaluation in various working conditions. The results revealed that signal quality and the presence of obstacles, such as building walls, significantly influence network performance, identifying potential problems that affect network efficiency and stability. The study provides clear guidance for optimizing the user experience in increasingly technological and connected home environments, highlighting the importance of addressing both technical aspects and user needs to ensure the success of Zigbee-based IoT home automation networks.

* Undergrad Work

** Faculty of Engineering Physicomechanics. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering.
Advisor: Lizeth Dayane Cortes Hernández; Co-Advisor: Jaime Guillermo Barrero Perez

Introducción

El avance tecnológico ha transformado nuestro mundo, y una de las innovaciones más destacadas es el concepto de Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés). El IoT se refiere a la conexión de objetos cotidianos a internet, permitiéndoles comunicarse entre sí, intercambiar datos y tomar decisiones inteligentes. Esta tecnología ha abierto un sinfín de posibilidades en diversos sectores, desde el hogar inteligente hasta la industria, la salud y el transporte, entre otros. A medida que se avanza hacia un futuro cada vez más interconectado, existe una creciente demanda de soluciones IoT eficientes y rentables. La implementación de redes de área local con tecnologías inalámbricas para IoT se ha convertido en una opción atractiva, ya que permite la transmisión de datos y la comunicación entre dispositivos de forma rápida y segura. Entre los diversos estándares disponibles para IoT, Zigbee destaca por su bajo consumo energético y alta eficiencia Institute of Electrical and Electronics Engineers (2009). Esta tecnología es ideal para aplicaciones que requieren una larga duración de la batería, como los dispositivos domóticos.

La domótica ha revolucionado la forma en que se interactúa con los hogares, proporcionando comodidad, eficiencia y seguridad. Sin embargo, la implementación de sistemas domóticos IoT aún presenta desafíos, como la compatibilidad entre dispositivos y la expansión de la red Berra (2010). La actual planificación de redes de comunicaciones ofrece un medio para integrar

diversas aplicaciones en un entorno unificado. Varias aplicaciones tienen la capacidad de gestionar diferentes dispositivos a través de un controlador central. Estas aplicaciones se desarrollan según los requisitos del usuario y abarcan diversos tipos, como control de sistemas de climatización, automatización de iluminación y creación de escenas lumínicas, así como monitorización del consumo de energía eléctrica, entre otras Jiaquan & Renqiang (2014). El núcleo de esta arquitectura se compone de un controlador centralizado, cuya función es recopilar información de los dispositivos encargados de medir parámetros, como los sensores (*entradas*). Este controlador procesa estos datos y toma decisiones que se traducen en órdenes para las salidas (*actuadores*) Institute of Electrical and Electronics Engineers (2009).

El objetivo de esta investigación es explorar las ventajas y posibilidades que ofrece Zigbee en la creación de un entorno inteligente y conectado en el hogar. Para ello, se evaluó el rendimiento de la tecnología Zigbee en términos de respuesta y fiabilidad, así como sus beneficios en términos de interoperabilidad y expansibilidad de la red domótica Li & Zhao (2014). Los resultados de esta investigación serán de gran utilidad para la toma de decisiones en cuanto a la implementación de la tecnología Zigbee para la comunicación en el ámbito del IoT. Además, será de interés para el área de las telecomunicaciones y tecnologías de la información, que buscan comprender el rendimiento y las aplicaciones de esta tecnología en un entorno real Becerra (2010). Con esta investigación, se espera contribuir al desarrollo y avance de la tecnología IoT, brindando información valiosa para futuras implementaciones y mejoras en el campo de las comunicaciones inalámbricas.

¿Cómo influye la implementación de la tecnología Zigbee en la red domótica en el tiempo

de respuesta de los dispositivos IoT en un entorno residencial inteligente?

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Analizar el rendimiento de la tecnología inalámbrica Zigbee para la interconexión de dispositivos domóticos IoT en redes de área local.

1.2. Objetivos Específicos

- Construir una red que permita controlar dispositivos domóticos IoT utilizando tecnología Zigbee.
- Proponer una metodología en la que por medio de una herramienta de software se puedan estimar los tiempos de respuesta de los dispositivos IoT existentes dentro de la red construida.
- Realizar un análisis de los tiempos de respuesta en el control de los dispositivos IoT considerando diferentes distancias tanto con línea de vista como sin ella.

2. Marco de referencia

La evolución de las tecnologías inalámbricas en el contexto del Internet de las cosas (IoT) ha experimentado cambios significativos a lo largo del tiempo. Desde las primeras implementaciones que se basaban principalmente en tecnologías como Bluetooth y Wi-Fi Gupta et al. (2015), hasta la creciente diversificación con estándares específicos para el IoT como Zigbee y LoRa Chitiva Bernal (2020). En esta sección, se exploran las diferentes etapas de desarrollo, resaltando las mejoras clave en términos de tiempo de respuesta. En la actualidad, ha habido un notable aumento en el uso y despliegue de dispositivos de Internet de las Cosas (IoT) en entornos de Redes de Área Local (LAN) Johnson & Lee (2018). Conectar dispositivos entre sí y recopilar información en tiempo real son aspectos fundamentales para optimizar procesos, mejorar la eficiencia y ofrecer servicios más inteligentes. Sin embargo, es crucial abordar una variedad de cuestiones tecnológicas, de diseño y gestión para asegurar un rendimiento óptimo en estas redes inalámbricas. La conexión y la implementación en gran escala de dispositivos del Internet de las Cosas (IoT) en entornos de Redes de Área Local (LAN) representan un cambio importante en cómo interactuamos con el mundo digital y físico. Este fenómeno ha generado la necesidad de examinar cuidadosamente el rendimiento de las tecnologías inalámbricas que permiten la conectividad de estos dispositivos en redes locales, abordando aspectos tecnológicos, de diseño, administración y seguridad.

En una revisión exhaustiva de la literatura sobre tecnologías inalámbricas para IoT, se destacan tres casos de estudio significativos. El primer caso, desarrollado por Hinojosa & Garcés (2022) y publicado en la Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones, se enfoca en el estudio de la tecnología de comunicación inalámbrica basada en el estándar IEEE 802.11ax en un contexto ecuatoriano para el año 2022. Este estudio se llevó a cabo en un edificio de oficinas con una densidad de dispositivos significativa, y los resultados indican que el estándar IEEE 802.11ax supera al IEEE 802.11ac en velocidad, alcance y fiabilidad. El segundo caso, realizado por Patel et al. (2016) y publicado en el IEEE Communications Magazine, aborda el análisis del rendimiento de las tecnologías inalámbricas Bluetooth, Zigbee y 6LoWPAN en entornos industriales estadounidenses. La investigación, que se desarrolló en un laboratorio con una densidad específica de dispositivos, reveló que mientras Bluetooth destaca en velocidad, Zigbee logra un equilibrio entre rendimiento y alcance, y 6LoWPAN sobresale en alcance, aunque con un rendimiento inferior. El tercer caso, presentado por Chitiva Bernal (2020) en Ingeniería y Desarrollo, se centra en el diseño de una red de IoT para el hogar utilizando la tecnología inalámbrica Zigbee. Este estudio, realizado en Colombia, evaluó el rendimiento de la red en términos de velocidad, alcance y fiabilidad, concluyendo que la red proporciona un rendimiento adecuado para aplicaciones de IoT en el hogar. Estos casos de estudio ofrecen perspectivas valiosas sobre la aplicación práctica y el rendimiento de diversas tecnologías inalámbricas en diferentes contextos y entornos específicos. En cuanto a la selección de modelos para evaluar el rendimiento de estas tecnologías, se ha seguido una metodología respaldada por una revisión exhaustiva de los estudios previos. Estas elecciones se apoyan en la eficacia de estos modelos para gestionar la complejidad y particularidades de los

datos relacionados con IoT. Además, la flexibilidad y adaptabilidad de estos modelos a diversos escenarios y variaciones en los datos también se han considerado criterios cruciales en su elección. De esta manera, se espera que la elección de modelos sólidos contribuya de manera significativa al análisis del rendimiento de las tecnologías inalámbricas en entornos de IoT en redes de área local.

Además, dentro del espectro de tecnologías inalámbricas para IoT, el estándar IEEE 802.15.4 merece atención. Este estándar define las especificaciones de capa física (PHY) y de acceso al medio (MAC) para redes de área personal inalámbricas (WPAN) Institute of Electrical and Electronics Engineers (2009). Sin embargo, Zigbee agrega capas superiores para definir aplicaciones específicas, como control de iluminación, automatización del hogar, monitorización de la energía, entre otros. IEEE 802.15.4 es conocido por su bajo consumo de energía, lo que lo hace ideal para dispositivos IoT de bajo consumo alimentados por batería. El protocolo Zigbee opera en varias bandas de frecuencia, incluyendo 2.4 GHz, 900 MHz y 868 MHz. Típicamente utiliza canales de 5 MHz en la banda de 2.4 GHz y 2 MHz en la banda de 900 MHz. La velocidad de transmisión de datos en Zigbee puede variar entre 20 kbps y 250 kbps, dependiendo de la configuración del dispositivo y la capa de aplicación utilizada. Es importante tener en cuenta que estas velocidades pueden verse afectadas por factores como la interferencia, la distancia entre dispositivos y las condiciones del entorno. Institute of Electrical and Electronics Engineers (2009).

Para comprender mejor su desempeño, se requiere una exploración detallada de los rendimientos en diferentes topologías de red, considerando aspectos como la latencia, el alcance y la

eficiencia energética en cada configuración. La eficacia de las redes inalámbricas para IoT radica en la elección adecuada de su topología, la cual determina la estructura y la dinámica de la comunicación entre los dispositivos conectados. Entre las topologías más comunes se encuentran el árbol, la estrella y la malla, cada una con características distintivas que impactan en su rendimiento y fiabilidad Institute of Electrical and Electronics Engineers (2009). La topología de árbol ofrece escalabilidad y tolerancia a fallos al permitir la adición de nodos sin afectar la red completa, aunque puede presentar problemas de latencia y vulnerabilidad ante fallos del nodo raíz. En contraste, la topología de estrella destaca por su simplicidad y centralización, pero también enfrenta limitaciones de alcance y un punto único de fallo en el nodo central. Por otro lado, la topología de malla ofrece redundancia y flexibilidad al establecer múltiples rutas de comunicación entre los nodos, lo que aumenta la fiabilidad y la tolerancia a fallos. Sin embargo, su implementación puede ser más compleja y demandar un mayor consumo de energía por parte de los nodos. Esta exploración proporcionaría información valiosa para el diseño y la implementación de redes IoT utilizando IEEE 802.15.4.

En cuanto a los dispositivos que implementan Zigbee, hay una amplia gama disponible en el mercado, incluyendo bombillas y dispositivos de iluminación inteligente, dispositivos de automatización del hogar, dispositivos de monitorización de la energía y medio ambiente. En cuanto a los costos, pueden variar significativamente dependiendo del tipo de dispositivo, la marca y la funcionalidad específica. Los dispositivos básicos pueden ser relativamente económicos, mientras que los dispositivos más avanzados con características adicionales pueden tener un costo más alto.

Los costos también pueden variar dependiendo de si los dispositivos son de marca reconocida o de marcas menos conocidas.

2.1. Problemática y relevancia

La implementación de redes de área local con tecnologías inalámbricas usadas en IoT puede ser una solución eficiente y rentable para la transmisión de datos y comunicación de dispositivos Johnson & Lee (2018). Sin embargo, para poder tomar una decisión informada sobre cuál de estas tecnologías utilizar, es necesario evaluar y comparar su rendimiento en un ambiente real. Los resultados de este estudio pueden ser de gran utilidad para la toma de decisiones en cuanto a la implementación de tecnologías de comunicación, tanto para empresas como para la industria de las comunicaciones y tecnologías de información.

2.1.1. Contextualización del problema

En la actualidad, la implementación de redes de área local (LAN) mediante tecnologías inalámbricas utilizadas en el Internet de las cosas (IoT) se presenta como una alternativa eficiente y económica para la transmisión de datos y la comunicación entre dispositivos Johnson & Lee (2018). Este enfoque ofrece la ventaja de eliminar la necesidad de conexiones físicas, permitiendo una mayor flexibilidad y escalabilidad en la interconexión de dispositivos dentro de un entorno. Estos dispositivos abarcan desde sensores en entornos industriales hasta dispositivos inteligentes en hogares y oficinas. La conectividad inalámbrica es el soporte que permite la comunicación eficiente entre estos dispositivos, facilitando la recopilación, transmisión y procesamiento de datos

en tiempo real. Sin embargo, este rápido aumento en la adopción de IoT plantea una serie de desafíos críticos en términos de rendimiento de las tecnologías inalámbricas.

A pesar de las prometedoras perspectivas que brindan estas tecnologías inalámbricas para el IoT, surge una problemática crítica: la falta de información detallada sobre el rendimiento de las diferentes tecnologías inalámbricas en entornos reales. La toma de decisiones informada respecto a cuál de estas tecnologías adoptar se ve obstaculizada por la ausencia de evaluaciones comparativas que consideren las condiciones del mundo real. Por lo tanto, la necesidad de llevar a cabo un estudio exhaustivo y sistemático se convierte en imprescindible. Este estudio se centra en la evaluación y comparación del rendimiento de las tecnologías inalámbricas utilizadas en IoT en situaciones reales Johnson & Lee (2018).

La contextualización de este problema se vuelve aún más crucial al considerar la dependencia cada vez mayor de la sociedad y la industria en la conectividad inalámbrica para operar y evolucionar. La resolución efectiva de estos desafíos no solo impactará la eficiencia operativa y la seguridad, sino que también sentará las bases para un desarrollo continuo y sostenible en el panorama del IoT y las redes de área local. En este contexto, la investigación sobre el rendimiento de las tecnologías inalámbricas para IoT se presenta como un elemento clave para impulsar avances significativos en la conectividad inalámbrica y su aplicación práctica en una variedad de escenarios.

2.2. Definiciones relevantes

2.2.1. IoT en domótica

El Internet de las Cosas (IoT) se refiere a la interconexión de dispositivos físicos a través de la red, permitiendo la recopilación y compartición de datos Gupta et al. (2015). En el contexto de la domótica, el IoT facilita la creación de entornos inteligentes mediante la conexión de electrodomésticos, sistemas de seguridad, iluminación y otros dispositivos Chitiva Bernal (2020). Esto posibilita la automatización y gestión eficiente de recursos en el hogar, mejorando la comodidad y la eficiencia energética Gupta et al. (2015).

2.2.2. Redes Zigbee

Las redes Zigbee representan una tecnología inalámbrica fundamental en el panorama de las comunicaciones para el Internet de las cosas Institute of Electrical and Electronics Engineers (2009). Zigbee, estandarizado por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, se destaca por su eficiencia en el consumo de energía y su capacidad para habilitar la comunicación entre dispositivos de baja potencia en entornos cercanos Chitiva Bernal (2020). Diseñada para ser altamente escalable, Zigbee ha encontrado una aplicación particularmente significativa en la domótica, donde su estructura de red permite la interconexión eficiente de dispositivos en hogares inteligentes Chitiva Bernal (2020). Una red Zigbee se compone de tres elementos fundamentales: nodos, coordinadores y dispositivos finales. Los nodos, que pueden ser sensores o actuadores, constituyen los

dispositivos individuales que se conectan a la red. Los coordinadores, a menudo presentes en dispositivos centrales, gestionan la comunicación en la red. Los dispositivos finales, por otro lado, son nodos que no tienen la capacidad de retransmitir datos, lo que los hace ideales para aplicaciones de bajo consumo de energía.

En la domótica, las redes Zigbee encuentran una aplicación versátil. Desde el control de iluminación y sistemas de calefacción hasta la gestión de dispositivos de seguridad, Zigbee permite la creación de entornos inteligentes y la automatización eficiente de tareas diarias. La estandarización y la interoperabilidad que ofrece Zigbee hacen que esta tecnología sea una elección atractiva para implementaciones prácticas en el ámbito doméstico, contribuyendo significativamente al crecimiento y desarrollo del ecosistema del IoT.

2.2.2.1. Arquitectura.

- **Dispositivos Zigbee:** Los dispositivos Zigbee son los componentes individuales de la red Chitiva Bernal (2020). Pueden ser sensores, actuadores, interruptores, termostatos, luces, entre otros. Cada dispositivo Zigbee está equipado con un transceptor que le permite comunicarse con otros dispositivos en la red.
- **Coordinador Zigbee:** El coordinador es el nodo principal de la red Zigbee Chitiva Bernal (2020). Es responsable de iniciar y mantener la red, gestionar la asignación de direcciones y coordinar la comunicación entre los dispositivos. En una red Zigbee, solo puede haber un coordinador, y es esencial para el funcionamiento de la red.

- Router Zigbee: Los routers Zigbee son dispositivos que ayudan a ampliar el alcance de la red y a enrutar los mensajes entre los dispositivos Chitiva Bernal (2020). Estos dispositivos actúan como intermediarios para retransmitir datos entre los nodos de la red, lo que ayuda a extender el alcance de la red Zigbee más allá de la cobertura directa del coordinador.
- Dispositivos finales Zigbee: Los dispositivos finales Zigbee son nodos que no tienen la capacidad de retransmitir datos Chitiva Bernal (2020). Estos dispositivos son típicamente los sensores y actuadores que recopilan información del entorno o controlan dispositivos físicos.

2.2.2.2. Ventajas.

- Bajo consumo de energía: Zigbee está diseñado para minimizar el consumo de energía, lo que lo hace ideal para dispositivos alimentados por baterías y aplicaciones que requieren una larga duración de la batería Chitiva Bernal (2020). Esta característica lo convierte en una opción eficiente para dispositivos IoT y sensores distribuidos.
- Redes de malla: Las redes Zigbee operan mediante topologías de malla autoorganizadas, lo que significa que los dispositivos pueden comunicarse entre sí directamente o a través de otros nodos en la red Chitiva Bernal (2020). Esto proporciona redundancia y robustez, ya que los mensajes pueden enrutarse de forma dinámica a través de múltiples rutas, mejorando la fiabilidad de la comunicación.

- **Bajo costo:** La tecnología Zigbee es económica en términos de costos de hardware y operación Chitiva Bernal (2020). Los dispositivos Zigbee suelen ser asequibles y la infraestructura necesaria para implementar redes Zigbee es relativamente económica en comparación con otras tecnologías inalámbricas.

2.2.2.3. Seguridad. Las redes Zigbee incorporan características de seguridad robustas, autenticación de dispositivos y control de acceso, lo que garantiza la protección de los datos transmitidos y la integridad de la red frente a amenazas de seguridad Chitiva Bernal (2020).

2.2.2.4. Flexibilidad y escalabilidad. Zigbee es altamente escalable y puede adaptarse a una amplia variedad de aplicaciones y entornos, desde hogares inteligentes hasta aplicaciones industriales Chitiva Bernal (2020). Las redes Zigbee pueden crecer y expandirse fácilmente añadiendo nuevos dispositivos y nodos a la red existente.

2.2.3. Protocolo mqtt

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) es un protocolo de mensajería ligero diseñado para la comunicación entre dispositivos en redes con ancho de banda limitado, como en el Internet de las Cosas (IoT). Este protocolo permite que los dispositivos envíen y reciban mensajes de manera eficiente y confiable, facilitando la transferencia de datos en tiempo real. Paessler (2024)

Mosquitto es un servidor de código abierto implementado para el protocolo MQTT. Funciona como un intermediario entre los dispositivos que publican mensajes (productores) y aquellos

que los suscriben (consumidores). Mosquitto gestiona la entrega de mensajes, asegurando una comunicación eficiente y confiable entre los dispositivos conectados.

2.3. Factores de rendimiento

El análisis del rendimiento de las tecnologías inalámbricas en entornos de Internet de las Cosas (IoT) implica la evaluación de varios factores clave que impactan directamente en su eficiencia y efectividad Johnson & Lee (2018). Estos factores se extienden a lo largo de diversas dimensiones, desde la velocidad y el alcance hasta la confiabilidad y la seguridad de las comunicaciones Gupta et al. (2015). La capacidad de gestionar grandes volúmenes de dispositivos conectados simultáneamente, la eficiencia en el consumo de energía y la adaptabilidad a diversas condiciones ambientales también emergen como aspectos cruciales a considerar Chitiva Bernal (2020). Uno de los parámetros que más se debe tener en cuenta para analizar el rendimiento en las tecnologías inalámbricas, es la latencia durante la transmisión, y esta se debe dimensionar basada en la distancia entre los elementos que componen la red Institute of Electrical and Electronics Engineers (2009). Un análisis completo de este factor permitirá comprender de manera integral cómo las tecnologías inalámbricas se desempeñan en el contexto específico de las redes de área local para IoT, proporcionando así una base sólida para la toma de decisiones y la implementación efectiva.

2.3.1. Software de medición de rendimiento

Para evaluar el rendimiento de las tecnologías inalámbricas, se requiere un análisis preciso y objetivo Johnson & Lee (2018). El software de medición de rendimiento desempeña un pa-

pel fundamental al proporcionar herramientas para evaluar factores como la velocidad, latencia y tiempos de respuesta en redes inalámbricas Johnson & Lee (2018). Ejemplos de software incluyen Wireshark, que permite analizar el tráfico de red Institute of Electrical and Electronics Engineers (2009) esta herramienta es esencial para cumplir con los objetivos específicos de la investigación y obtener datos cuantificables sobre el rendimiento de las tecnologías inalámbricas en redes de área local para IoT.

3. Implementación de la red

3.1. Planificación de la red

Antes de comenzar a crear la red Zigbee, se investigó sobre los elementos que la componen. Se determinó que los elementos básicos de una red Zigbee son el concentrador Zigbee, los dispositivos Zigbee y la topología de red.

3.1.1. Elección de elementos

Para establecer una red Zigbee, es imprescindible contar con un concentrador Zigbee, también denominado Smart Gateway. Este dispositivo central es fundamental, ya que sirve para conectar todos los demás dispositivos Zigbee. Optamos por el Smart Gateway de Tuya 14(a) debido a varias razones fundamentales. En primer lugar, este concentrador es altamente compatible con una amplia gama de dispositivos Zigbee disponibles en el mercado, lo que garantiza una integración fluida y sin problemas. Además, su interfaz de configuración intuitiva y su facilidad de uso hacen que sea accesible incluso para usuarios menos experimentados en la configuración de redes domóticas. Por último, pero no menos importante, el precio asequible del Smart Gateway de Tuya lo hace una opción atractiva desde el punto de vista económico, permitiendo una implementación eficiente de la red Zigbee sin comprometer la calidad ni la funcionalidad.

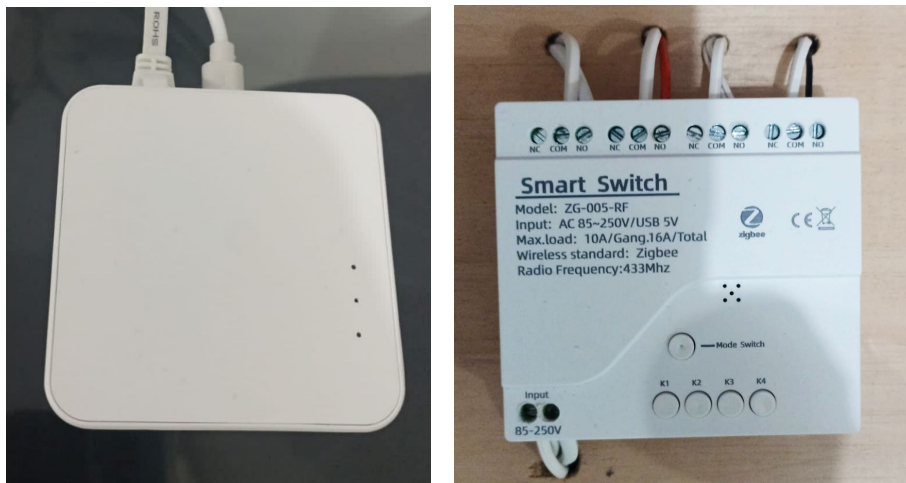
El protocolo Zigbee opera en la frecuencia de 2.4 GHz y utiliza una conectividad MESH, donde cada dispositivo actúa como un relé para otros, formando una red de conexiones en malla que asegura una conexión estable y segura. Además, los dispositivos Zigbee son conocidos por su eficiencia energética, lo que se traduce en una duración prolongada de la batería. El protocolo Zigbee 3.0 amplía su alcance al utilizar una frecuencia principal de 400 MHz y una conectividad de 2.4-2.485 GHz según el estándar IEEE 802.15.4, con adaptadores de corriente compatibles con voltajes de 110 V-240 V CA y un voltaje de funcionamiento entre 1,8 V y 3,3 V. Gateway (2024)

También se eligió un Smart Switch Zigbee 14(b) para la red. Este dispositivo versátil permite el control remoto de luces y otros dispositivos eléctricos. Se optó por el Smart Switch Zigbee por su flexibilidad al elegir los elementos a controlar en la red. Es crucial mencionar que la elección del switch Zigbee se hizo considerando su compatibilidad con el Smart Gateway. Además, se asegura que el Smart Switch funcionara a 110 V para facilitar su conexión a un enchufe de pared estándar, eliminando la necesidad de una fuente de alimentación externa. Las cargas conectadas al Smart Switch Zigbee también se seleccionaron para operar a 110 V. Esta cuidadosa selección de dispositivos garantiza una experiencia de usuario óptima y un entorno doméstico conectado que es seguro y confiable.

El interruptor WiFi Zigbee 3.0 Tuya con cuatro canales, ofrece la conveniencia de apagar hasta cuatro electrodomésticos de forma remota e independiente. Además de su función principal, este dispositivo puede desempeñar el papel de enrutador Zigbee, lo que ayuda a transmitir señales Zigbee para mantener una conexión estable cuando se utilizan múltiples dispositivos Zigbee 3.0.

Su configuración es sencilla para aplicaciones inteligentes, con opciones de voltaje de trabajo de 1/2 V o USB de 5V. Identificado como el módulo de interruptor 4CH RF433, su modelo es ZG-005-RF, con una entrada de/USB 5V. Cumple con el estándar inalámbrico Zigbee 3.0 y opera en una frecuencia de radio de 433 MHz, con una carga máxima de 10A por canal y 16A en total, así como una potencia máxima de 2200W a 10A. Adicionalmente, utiliza el estándar inalámbrico de 2,4 GHz b/g/n para la conectividad. Switch (2024)

Figura 1. Dispositivos Zigbee



(a) Gateway

(b) Smart Switch

Nota: Se observa un Gateway en la primera imagen y un Smart Switch en la segunda imagen. Tomado de fuente propia.

Los elementos a controlar que se eligieron son los siguientes:

- Luz piloto

- Motor AC 110V - 50Hz

- Ventilador 110VAC 50Hz

- Toma corriente para probar cargador de celular

Se seleccionaron estas cargas específicas para el Smart Switch Zigbee teniendo en cuenta su utilidad en entornos domésticos y su compatibilidad con una red eléctrica de 110V. La luz piloto representa una fuente de iluminación común en los hogares, permitiendo el control remoto de la iluminación para mayor comodidad y eficiencia energética. El motor AC de 110V - 50Hz¹ simula dispositivos como persianas eléctricas o sistemas de riego automatizados, que pueden integrarse en una casa inteligente para una gestión automatizada. El ventilador de 110VAC - 50Hz ofrece control remoto sobre la temperatura y la ventilación en el hogar, brindando un ambiente más confortable y eficiente. Finalmente, la toma para probar cargador de celular representa la capacidad de controlar dispositivos de carga USB, permitiendo la integración de tecnología inteligente incluso en los cargadores de dispositivos cotidianos. Estas selecciones reflejan el objetivo de simular situaciones prácticas y cotidianas en un entorno de casa inteligente, manteniendo la compatibilidad con la infraestructura eléctrica estándar de 110V.

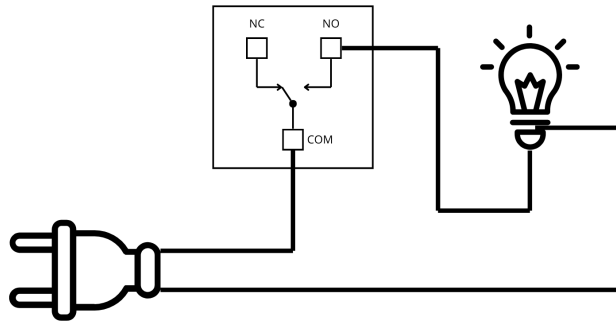
3.2. Diseño e implementación de la red

Para llevar a cabo la conexión de los elementos con el switch Zigbee, es fundamental comprender el funcionamiento interno del switch Zigbee, el cual es un relé. Debemos realizar la cone-

¹ Es importante destacar que en Colombia la frecuencia está estandarizada en 60 Hz.

xión siguiendo el esquema que se muestra en la figura 2. En este caso, utilizaremos el terminal de contacto normalmente abierto (NO) del relé, ya que necesitamos que la carga esté desactivada en reposo y se active cuando nosotros lo indiquemos. Esta configuración garantiza que la carga esté desconectada cuando el relé no está energizado, y se conecte cuando el relé recibe la señal para activarse.

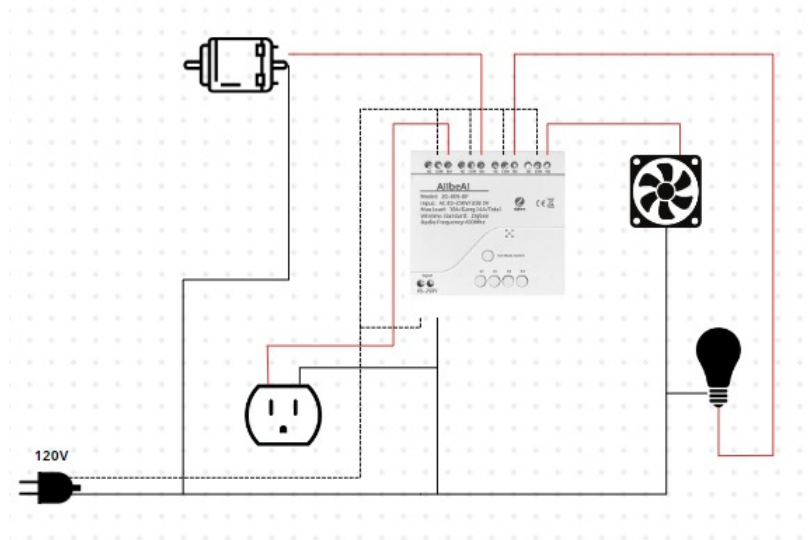
Figura 2. Conexión interna del switch.



Nota: Se observa la conexión de los elementos con el Switch Zigbee. Tomado de fuente propia.

Para diseñar la red, se realizó un plano de las conexiones que se muestran en la figura 3.

Figura 3. Plano de conexiones del switch.



Nota: Se observa el plano de conexiones del switch Zigbee con cada carga. Tomado de fuente propia.

Las cargas se instalaron en una base de acrílico para así permitir realizar las conexiones de las cargas al switch Zigbee de forma más práctica y sencilla como observamos en la figura 4.

Figura 4. Montaje conexiones del switch con las cargas.



Nota: Se observa el montaje del switch Zigbee con las cargas. Tomado de fuente propia.

Después de la instalación del switch Zigbee y sus cuatro cargas, se realizó una prueba manual para garantizar el correcto funcionamiento de los relés. Se emplearon los botones del switch Zigbee para activar manualmente cada relé y comprobar su funcionamiento de manera individual.

Una vez confirmada la funcionalidad de los relés, se procedió a establecer la conexión entre el Gateway y el switch Zigbee. Para ello, se conectó el Gateway a una fuente de alimentación y a un router Ethernet doméstico utilizando uno de sus puertos LAN mediante un cable UTP. Una vez que el Gateway estuvo conectado al router, se llevó a cabo la vinculación con el switch Zigbee a través de la aplicación Smart Life.

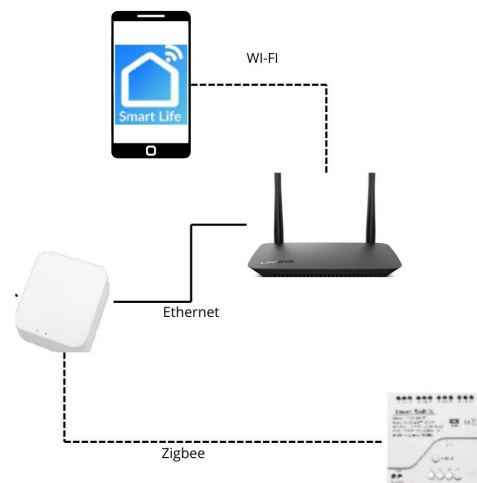
La aplicación Smart Life es una herramienta gratuita que permite entrelazar los dispositivos de la red tal y como se aprecia en la figura 5, para así poder controlarlos desde dispositivos móviles como teléfonos inteligentes o tabletas. Siguiendo las instrucciones del fabricante, se configuró la conexión entre el switch Zigbee y la aplicación Smart Life que en este caso es muy sencillo ya que con solo mantener el botón presionado del Swicth se sincronizaba de manera automática. Después de haber completado este proceso, fue posible controlar el switch Zigbee de manera inalámbrica a través de la aplicación. Es importante destacar que si nuestro router tiene acceso a Internet, es posible controlar la red a través de Smart Life sin que el dispositivo esté conectado a la misma red. Esto significa que podríamos gestionar nuestra red desde cualquier parte.

El Gateway, además de su capacidad para gestionar dispositivos Zigbee, ofrece una funcionalidad adicional al permitir la conexión a servidores MQTT, incluido Mosquitto. Esta caracterís-

tica permite que el gateway envíe mediciones y datos recopilados por los dispositivos Zigbee a un servidor MQTT configurado.

Al habilitar esta conexión, el gateway opera como un cliente MQTT, estableciendo una comunicación efectiva y confiable con el servidor. Esta integración potencia la eficiencia de tu red IoT, facilitando la comunicación entre los dispositivos Zigbee y otros sistemas o servicios compatibles con MQTT.

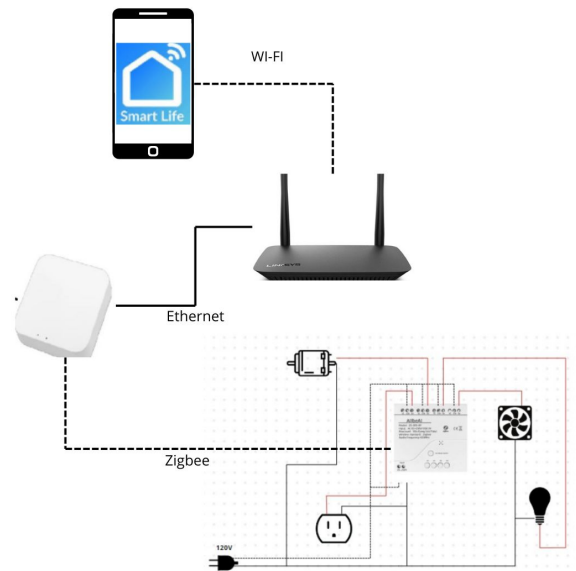
Figura 5. Red para controlar dispositivos Zigbee.



Nota: Se observa la red de la aplicación Smart Life para el control remoto de dispositivos. Tomado de fuente propia.

Para concluir este capítulo, se presenta el gráfico general que resume la construcción de la red, integrando los elementos clave discutidos anteriormente proporcionando una visión de la estructura de la red, como se observa en la figura 6.

Figura 6. Plano final.



Nota: Se observa la estructura de la red para el control remoto de dispositivos. Tomado de fuente propia.

4. Metodología para estimar tiempos de respuesta

En el presente proyecto, se ha establecido una metodología para comprender a fondo el comportamiento y la eficacia de estas tecnologías. Esta metodología abarca diversos aspectos clave del proceso de investigación y ha sido diseñada para guiar de manera efectiva todas las etapas del proyecto, desde la selección de herramientas y técnicas de medición hasta la interpretación de los resultados obtenidos. Por lo tanto, el orden de los pasos en la metodología está ajustado de la siguiente manera:

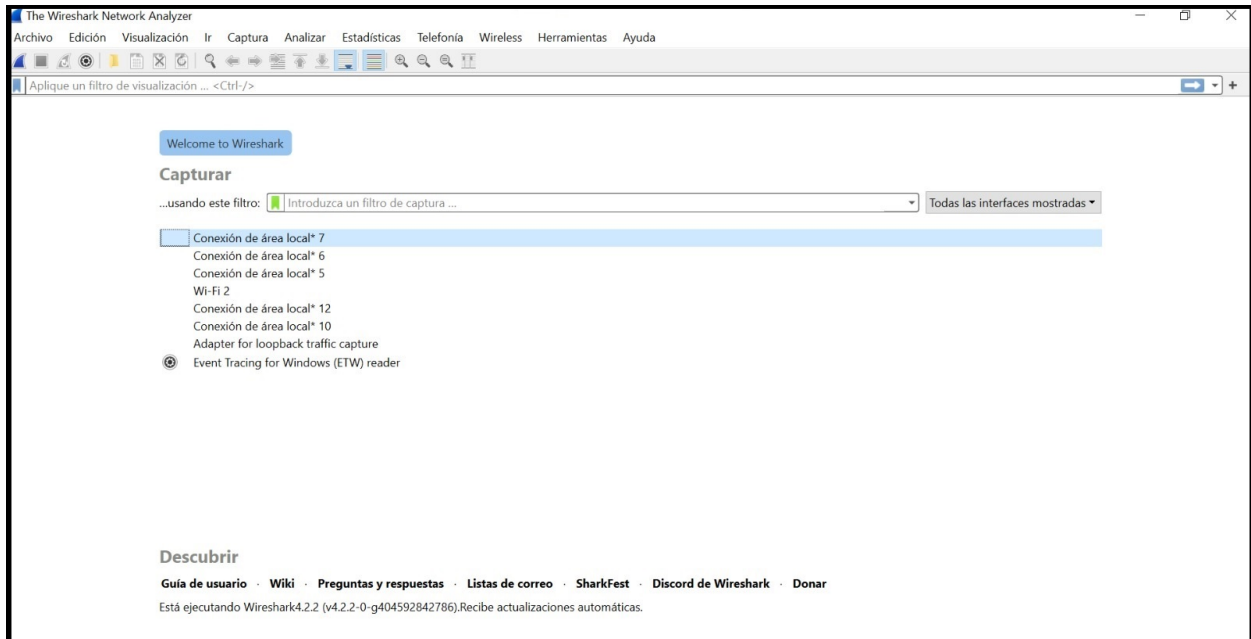
4.1. Selección del software para medición de tiempos de respuesta

Para estimar los tiempos de respuesta de los dispositivos existentes dentro de la red construida, fue necesario la implementación de un software que permitiera ver los paquetes de red en tiempo real que pasaban por dicha red. El software elegido fue Wireshark 8, el cual permite ver todos los paquetes de la red, incluyendo datos de tiempos.

Wireshark es una herramienta gratuita y de código abierto que se utiliza para analizar el tráfico de red, permite ver las tramas de los paquetes de red en detalle. También proporciona datos de tiempos, como la hora de llegada, el tiempo de transmisión y el tiempo de procesamiento. Para acceder a la descarga del software mencionado, se invita al lector a consultar los detalles

adicionales proporcionados en el apéndice A.

Figura 7. Software Wireshark.



Nota: Se observa el software Wireshark. Tomado de Software Wireshark

4.2. Identificación de elementos en la red

Para abordar adecuadamente el análisis del rendimiento de la red Zigbee, se inició reconociendo la necesidad de comprender la topología de la red y los dispositivos involucrados. Wireshark, siendo una herramienta de análisis de tráfico de red, proporciona una cantidad significativa de información sobre el tráfico en la red. Sin embargo, esta abundancia de datos generó la necesidad de identificar y delimitar los elementos específicos de interés dentro de la red. Un factor crucial para este propósito fue la identificación de las direcciones IP de los equipos involucrados, lo que permitió un análisis más preciso y detallado del tráfico de red.

Para obtener esta información, se utilizó la aplicación móvil Fing, la cual proporciona información sobre cada dispositivo, incluyendo la dirección IP, el nombre del dispositivo y el fabricante. Esta escaneó la red local y proporcionó una lista completa de todos los dispositivos conectados, junto con sus respectivas direcciones IP como se observa en la figura 8. Esta medida no solo facilitó la identificación de los dispositivos dentro de la red Zigbee, sino que también permitió establecer una base sólida para el análisis posterior del tráfico de red y el rendimiento de los dispositivos IoT. El conocimiento de las direcciones IP de los equipos fue fundamental para comprender la interacción entre los dispositivos y evaluar el rendimiento de la red de manera efectiva.

Para utilizar la aplicación Fing, se conectó el teléfono a la misma red que la red Zigbee. Luego, se abrió la aplicación y se realizó un escaneo de la red, el escaneo mostró todos los dispositivos conectados como se observa en la figura 8.

Figura 8. Elementos en la red.



Nota: Se observan los elementos de la red. Tomado de Aplicación Fing.

Una vez que se obtuvo la dirección IP del Gateway, se pudo utilizar Wireshark para analizar el tráfico de red. Wireshark permitió visualizar las tramas de los paquetes que se enviaban entre el equipo que tiene instalado Smart Life y el Gateway. Al comparar las direcciones IP del Gateway en las tramas de los paquetes con la dirección IP obtenida anteriormente, se pudo identificar la comunicación entre estos elementos. Este proceso permitió entender la interacción entre el dispositivo Smart Life y el Gateway Zigbee, como se observa en el cuadro rojo de la figura 9.

Figura 9. Paquetes de la red.

No.	Time	Source	Destination	Length	Info
28	4.157481	34.120.52.64	192.168.1.11	311	Application Data
29	4.203839	192.168.1.11	34.120.52.64	54	58256 → 443 [ACK] Seq=1 Ack=772 Win=509 Len=0
30	4.433885	66.22.223.128	192.168.1.11	94	Receiver Report
31	4.710291	192.168.1.11	66.22.223.128	50	60566 → 50009 Len=8
32	4.763787	66.22.223.128	192.168.1.11	60	50009 → 60566 Len=8
33	5.022357	104.17.239.159	192.168.1.11	92	Application Data
34	5.022873	192.168.1.11	104.17.239.159	96	Application Data
35	5.031590	192.168.1.10	255.255.255.255	310	56737 → 6667 Len=268
36	5.035982	192.168.1.10	255.255.255.255	166	45764 → 6681 Len=124
37	5.077098	104.17.239.159	192.168.1.11	54	443 → 58756 [ACK] Seq=39 Ack=43 Win=7 Len=0
38	5.433515	66.22.223.128	192.168.1.11	94	Receiver Report
39	5.502639	34.120.52.64	192.168.1.11	311	Application Data

Nota: Se observan los paquetes de la red. Tomado de Software Wireshark.

Es importante destacar que los dispositivos Zigbee en sí mismos no tienen direcciones IP, sino que utilizan el Gateway como intermediario para la comunicación con la red IP. La información obtenida fue crucial para el análisis del tráfico de red y la optimización de la comunicación en el sistema Zigbee.

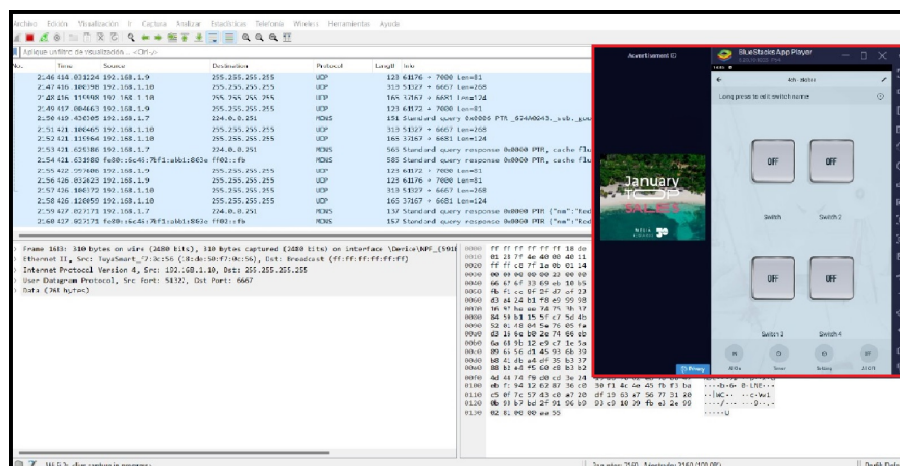
4.3. Selección de emulador para manejo de la aplicación Smart Life

La red construida en el capítulo anterior tiene características tanto de red Zigbee como de red Wifi y para disminuir el efecto de la tecnología Wifi en los tiempos de respuesta se procedió a

eliminar dicha red cableando los equipos. Una solución para este problema fue instalar el software Smart Life en el mismo portátil donde se tiene instalado el WireShark. Este equipo se encuentra conectado por la red LAN de forma cableada. Sin embargo no existe versión para el portátil del software, por eso se recurre a un emulador de android, ya que era necesario acceder a la aplicación Smart Life desde el portátil para evitar la dependencia del teléfono celular y para eliminar pérdidas de tiempo causadas por la red Wifi y de esta manera garantizar que el tiempo medido era causado solamente por la red Zigbee. De esta manera se está asumiendo menos retardos por el cableado Ethernet ya que las pérdidas en una red cableada es muy inferior a las de una red inalámbrica.

Para superar esta limitación, se decidió buscar un emulador de Android el cual tuviera compatibilidad con el sistema operativo del computador y así permitiera ejecutar la aplicación Smart Life en este. Tras una búsqueda exhaustiva, se encontró que el emulador *BlueStacks* cumplía con los requisitos como se observa en la figura 10 en el cuadro rojo.

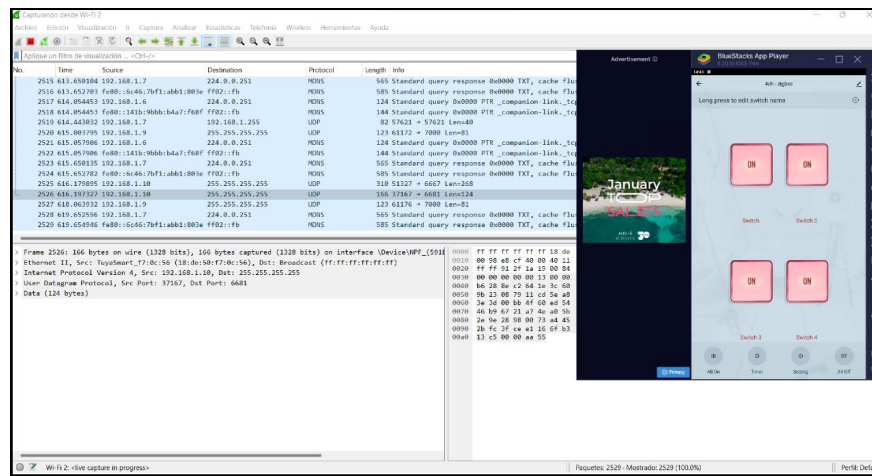
Figura 10. Emulador BlueStacks.



Nota: Se observa la aplicación Smart Life funcionando en PC por medio del emulador BlueStacks. Tomado de Software Wireshark y emulador BlueStacks.

Una vez instalado el emulador, se procedió a realizar las pruebas necesarias para verificar que la aplicación funcionara correctamente. Las pruebas se realizaron con éxito, lo que permitió controlar el switch desde la computadora como se observa en la figura 11. Para obtener más detalles sobre la activación de cada una de las cargas, se invita al lector a consultar el Apéndice B.

Figura 11. Prueba de las cargas en el emulador.



Nota: Se observa la aplicación Smart Life funcionando en PC por medio del emulador BlueStacks y la prueba de las cuatro cargas activas para comprobar su funcionamiento. Tomado de Software Wireshark y emulador BlueStacks.

4.4. Cálculos de tiempos de respuesta

Una vez se logró controlar las cargas utilizando el emulador, se propuso identificar el paquete de red que correspondía a la señal, utilizando la dirección IP de origen y aprovechando que ya se conocía la dirección IP del Gateway como se puede observar en la imagen 12. Una vez identificado el paquete por su IP, se pudieron estimar los tiempos de ida y vuelta de los paquetes restando uno del otro, la hora de llegada del comando y la hora de llegada de la respuesta. Esto permitió determinar la duración total del proceso.

Figura 12. Dirección IP de origen y tiempos.

2523	615.650135	192.168.1.7	224.0.0.251	MDNS	565	Standard query response 0x0000
2524	615.652782	fe80::6c46:7bf1:abb1:803e	ff02::fb	MDNS	585	Standard query response 0x0000
2525	616.179895	192.168.1.10	255.255.255.255	UDP	310	51327 → 6667 Len=268
2526	616.197327	192.168.1.10	255.255.255.255	UDP	166	37167 → 6681 Len=124
2527	618.063932	192.168.1.9	255.255.255.255	UDP	123	61176 → 7000 Len=81
2528	619.652596	192.168.1.7	224.0.0.251	MDNS	565	Standard query response 0x0000

Nota: Se observa unos paquetes de red en los cuales se pueden evidenciar el tiempo en que fue capturado y la dirección IP de origen.

5. Análisis de la red

5.1. Medición de tiempo de respuesta con línea de visión

Para evaluar el tiempo de respuesta, se llevaron a cabo pruebas alternando la activación y desactivación de cada relé en el switch Zigbee como se observa en la figura 13, mientras se monitoreaban los paquetes en Wireshark para capturar aquellos dirigidos a la dirección IP del Gateway. Estas pruebas se llevaron a cabo utilizando la aplicación Smart Life, la cual fue ejecutada desde un portátil mediante el emulador Bluestacks.

Figura 13. Prueba del relé



(a) Activación de la luz piloto

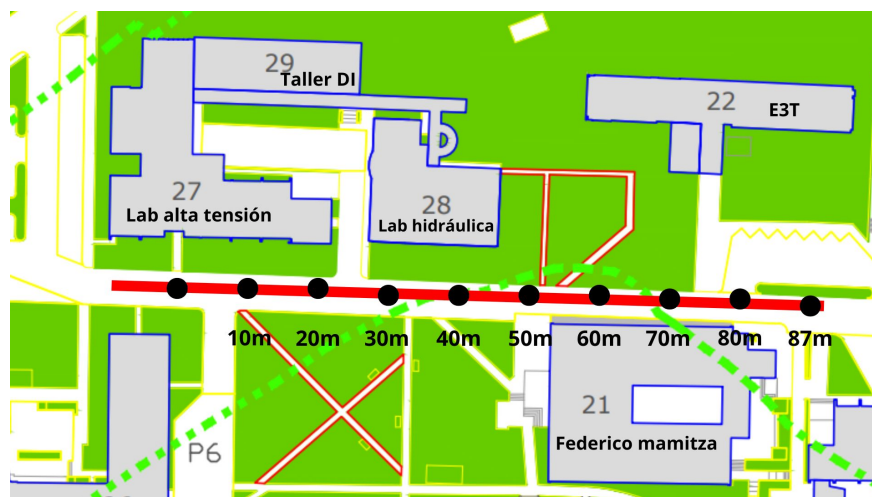
(b) Desactivación de la luz piloto

Nota: Se observa la prueba de activación y desactivación del relé (luz piloto). Tomado de fuente propia.

El procedimiento fue realizado en la Universidad Industrial de Santander desde la entrada en las afueras del edificio de Laboratorio de Alta Tensión en la carretera hacia el edificio de la es-

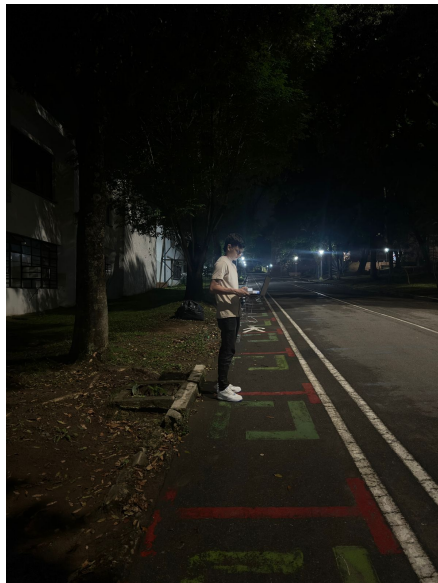
cuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones como se observa en la figura 14, dejando las cargas estáticas afuera del edificio y movilizándolo el Gateway junto con el portátil y el router conectado a una batería de 12V como se observa en la figura 15. Durante las pruebas realizadas a distintas distancias, se decidió llegar hasta los 87 metros debido a que se realizaron pruebas previas y se comprobó que a distancias mayores a esta medida, se perdía la comunicación entre el Switch Zigbee y el Gateway, marcando esta distancia como el límite máximo de funcionamiento. Estas pruebas se realizaron activando cada relé en las distancias de 1, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 y 87 metros y esperando un tiempo aproximado de 2 minutos entre cada activación para evitar que Wireshark tomara algún dato de interferencia y así obtener un promedio más preciso del tiempo de respuesta.

Figura 14. Plano de las distancias recorridas para las pruebas con línea de visión.



Nota: Se observa el plano con las distancias recorridas desde la entrada en las afueras del edificio de Laboratorio de Alta Tensión en la carretera hacia el edificio de la escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander. Tomado de fuente propia.

Figura 15. Prueba con línea de visión.



Nota: Se observa la prueba del recorrido desde la entrada en las afueras del edificio de Laboratorio de Alta Tensión en la carretera hacia el edificio de la escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander. Tomado de fuente propia.

Una vez que se enviaba un comando al switch Zigbee, se esperaba a que se recibiera una respuesta del Gateway. La respuesta se veía en Wireshark como un paquete con la dirección IP del Gateway. El tiempo de respuesta observado en la figura 16 se calcula como la diferencia entre la hora de llegada del comando y la hora de llegada de la respuesta. En este caso, la solicitud se envió a las 5.035982 y la respuesta se recibió a las 5.031590. El tiempo de respuesta es de 4.392 milisegundos. Para obtener más información sobre los tiempos de respuesta en la activación de las cargas, se invita al lector a consultar el Apéndice C.

Figura 16. Paquetes de la red.

No.	Time	Source	Destination	Length	Info
28	4.157481	34.120.52.64	192.168.1.11	311	Application Data
29	4.203839	192.168.1.11	34.120.52.64	54	58256 → 443 [ACK] Seq=1 Ack=772 Win=509 Len=0
30	4.433885	66.22.223.128	192.168.1.11	94	Receiver Report
31	4.710291	192.168.1.11	66.22.223.128	50	60566 → 50009 Len=8
32	4.763787	66.22.223.128	192.168.1.11	60	50009 → 60566 Len=8
33	5.022357	104.17.239.159	192.168.1.11	92	Application Data
34	5.022873	192.168.1.11	104.17.239.159	96	Application Data
35	5.031590	192.168.1.10	255.255.255.255	310	56737 → 6667 Len=268
36	5.035982	192.168.1.10	255.255.255.255	166	45764 → 6681 Len=124
37	5.077098	104.17.239.159	192.168.1.11	54	443 → 58756 [ACK] Seq=39 Ack=43 Win=7 Len=0
38	5.433515	66.22.223.128	192.168.1.11	94	Receiver Report
39	5.502639	34.120.52.64	192.168.1.11	311	Application Data

> Frame 35: 310 bytes on wire (2480 bits), 310 bytes captured (2480 bits) on interface
 > Ethernet II, Src: TuyaSmart_f7:0c:56 (18:de:50:f7:0c:56), Dst: Broadcast (ff:ff:ff:ff:ff:ff)
 > Internet Protocol Version 4, Src: 192.168.1.10, Dst: 255.255.255.255

Nota: Se observa una captura de pantalla de Wireshark que muestra los paquetes enviados y recibidos cuando se activa y se desactiva una carga. Tomado de Software Wireshark y emulador BlueStacks.

Al ejecutar varias pruebas y analizar las medidas tomadas por el software Wireshark, se puede observar que al ejecutar un comando, el Gateway con dirección 192.168.1.10 genera dos tramas dentro de la red. Ambas tramas tienen origen el gateway y van con destino hacia una IP denominada 255.255.255.255.

En las redes Ethernet una IP 255.255.255.255 representa una dirección de Broadcast utilizada cuando se desea difundir una información de manera general o no se tiene identificado el destinatario. Como la tecnología Zigbee no maneja IPs, se puede interpretar que el gateway envía las tramas hacia una dirección genérica, la cual, según lo que se mencionó anteriormente, es precisamente 255.255.255.255.

De esta manera cuando desde la aplicación se envía un comando, por ejemplo de encendido, el gateway envía la trama de activación con destino a 255.255.255.255 y cuando la carga se

enciende le avisa al Gateway y este genera un segundo envío con destino a 255.255.255 pero esta vez con el propósito de llevar la información hacia la app. Estas dos tramas enviadas se pueden apreciar los paquetes de datos capturados por Wireshark según se observa en la figura 16 .

En la tabla 1 se muestran los datos de los tiempos de respuesta obtenidos en la prueba para cada switch en las diferentes distancias mencionadas.

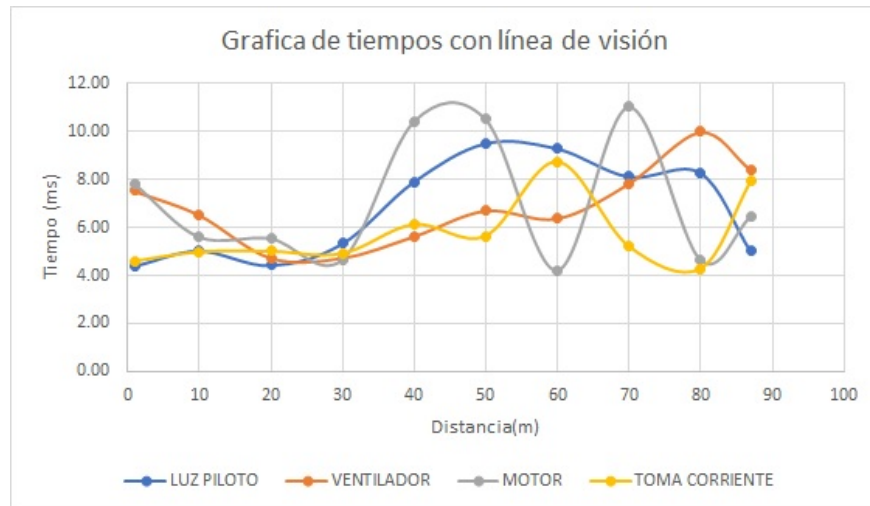
Tabla 1

Registro de tiempos de respuesta teniendo línea de visión con cada una de las cargas en milisegundos [ms].

CARGA	LUZ PILOTO	VENTILADOR	MOTOR	TOMA CORRIENTE
1 METRO	4.392	7.523	7.832	4.599
10 METROS	5.032	6.525	5.601	4.977
20 METROS	4.424	4.725	5.529	5.007
30 METROS	5.326	4.721	4.637	4.913
40 METROS	7.892	5.623	10.415	6.126
50 METROS	9.487	6.701	10.520	5.644
60 METROS	9.273	6.372	4.200	8.738
70 METROS	8.106	7.832	11.027	5.212
80 METROS	8.266	9.781	4.637	4.284
87 METROS	5.009	8.412	6.447	7.920

Los datos recopilados en la tabla revelan que a lo largo del experimento, el rango de tiempo se mantuvo estable, fluctuando entre los 4 milisegundos y los 11 milisegundos, lo que indica una variación aceptable. Es importante resaltar que el cambio de cargas no tuvo impacto significativo en la variación de estos tiempos, ya que todas exhibieron un comportamiento muy similar.

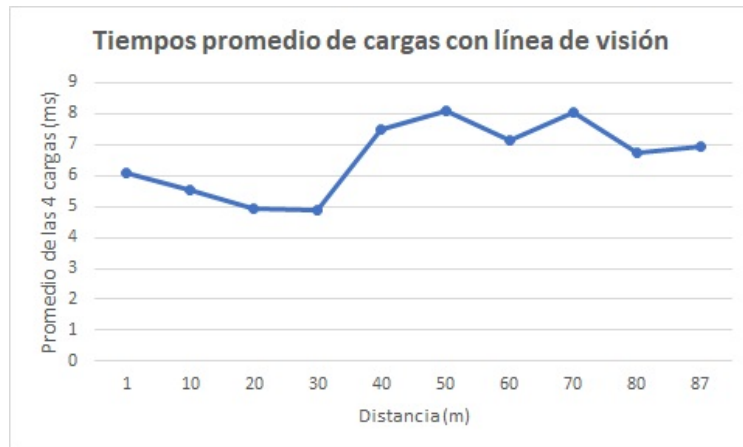
Figura 17. Gráfica de tiempos con línea de visión.



Nota: Se observa la gráfica de la tabla 1 de los tiempos con línea de visión. Tomado de Excel.

Observando los resultados en la gráfica 17 se aprecia que el tiempo no es directamente proporcional a la distancia. Aunque se mantiene una relativa estabilidad en el rango de tiempos a lo largo del experimento, con valores mínimos alrededor de los 4ms y máximos alrededor de los 11ms, independientemente de la distancia. Esto resalta la idea de que, una vez establecido el enlace entre los dispositivos, los tiempos de respuesta se mantienen consistentes. Por lo tanto, más que enfocarse en una distancia específica, lo crítico es asegurar una conexión efectiva entre los dispositivos. Esto implica mantener una distancia de comunicación óptima que garantice una conexión estable y confiable entre los nodos de la red Zigbee, lo cual es esencial para su correcto funcionamiento.

Figura 18. Gráfica de tiempos promedio de cargas con línea de visión.



Nota: Se observa la gráfica de la tabla 1 de los tiempos promedio de cargas con línea de visión. Tomado de Excel.

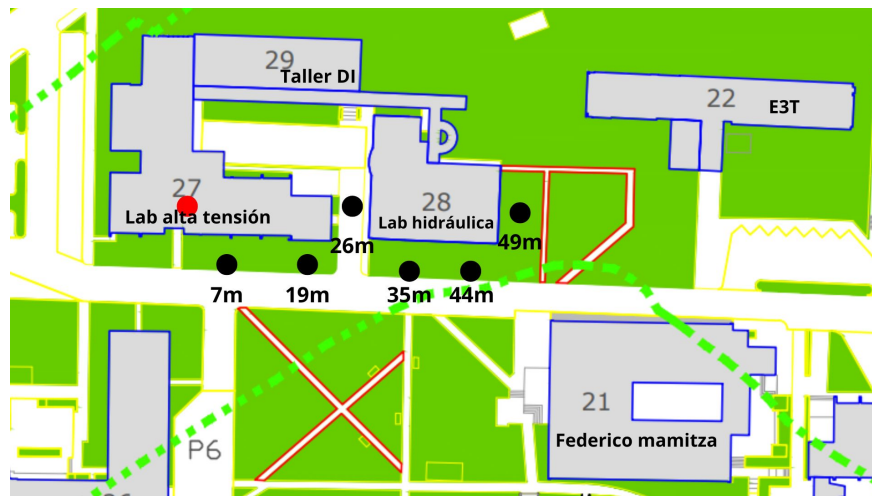
Basándose en la gráfica 18, se puede reforzar la idea de que, independientemente de la distancia, el rango de tiempo se mantiene notablemente estable. Al promediar los tiempos de las cuatro cargas, se observa que el intervalo de tiempo se sitúa constantemente entre 5 ms y 8 ms. Esto sugiere una consistencia en los tiempos de respuesta de la red Zigbee, independientemente de la distancia entre los dispositivos.

5.2. Medicion de tiempo de respuesta sin línea de visión

En esta prueba, el procedimiento fue el mismo, pero esta vez sin línea de visión entre el Gateway y el switch Zigbee, como se observa en la figura 19. Se llevó a cabo en la Universidad Industrial de Santander, desde el interior del edificio de Laboratorio de Alta Tensión, dejando las cargas estáticas dentro del edificio como se observa en la figura 20 (a) y desplazando el Gateway

junto con el portátil y el router conectado a una batería de 12V por la carretera hacia el costado del edificio y luego dirigiéndose hacia el edificio de Laboratorio de Hidráulica como se observa en la figura 20 (b). Durante las pruebas realizadas a distintas distancias, se pudo notar que a una distancia mayor a 49 metros, el switch Zigbee se desconectó de la red, lo que provocó la pérdida de respuesta del Gateway, marcando esta distancia como el límite máximo de funcionamiento. Estas pruebas se realizaron activando cada relé en las distancias de 7, 19, 26, 35, 44 y 49 metros. Se esperó un tiempo aproximado de 2 minutos entre cada activación para evitar que Wireshark tomara algún dato de interferencia y así obtener un promedio más preciso del tiempo de respuesta.

Figura 19. Plano de las distancias recorridas para las pruebas sin línea de visión.



Nota: Se observa el plano con las distancias recorridas desde el interior del edificio de Laboratorio de Alta Tensión hacia el costado del edificio y luego dirigiéndose hacia el edificio de Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Industrial de Santander. Tomado de fuente propia.

Figura 20. Pruebas sin línea de visión



(a) Cargas dentro del edificio

(b) Recorrido detrás del edificio de Laboratorio de Alta Tensión

Nota: Se observa la prueba de las cargas estáticas dentro del edificio y la movilización del gateway junto con el portátil y el router . Tomado de fuente propia.

En la tabla 2 se muestran los datos de los tiempos de respuesta obtenidos en la prueba para cada switch en las diferentes distancias mencionadas.

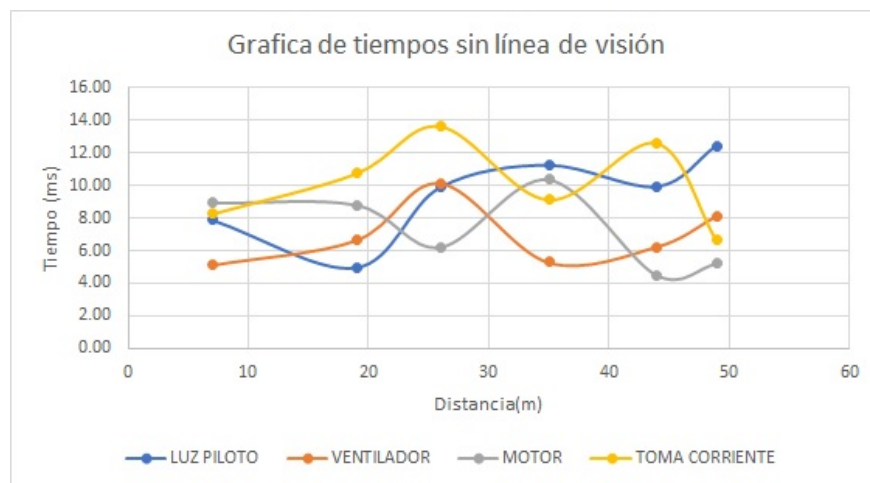
Tabla 2

Registro de tiempos de respuesta sin línea de visión con cada una de las cargas en milisegundos [ms].

CARGA	LUZ PILOTO	VENTILADOR	MOTOR	TOMA CORRIENTE
7 METROS	7.892	5.127	8.927	8.255
19 METROS	4.989	6.632	8.811	10.743
26 METROS	9.883	10.101	6.221	13.650
35 METROS	11.236	5.296	10.358	9.134
44 METROS	9.927	6.235	4.515	12.621
49 METROS	12.422	8.107	5.210	6.645

Los datos recopilados en la tabla 2 revelan que a lo largo del experimento, el rango de tiempo se mantuvo fluctuando entre los 4 milisegundos y los 13 milisegundos, lo que indica una variación un poco más alta que cuando tenía línea de visión. Es importante resaltar que el cambio de cargas no tuvo impacto significativo en la variación de estos tiempos, ya que todas exhibieron un comportamiento muy similar.

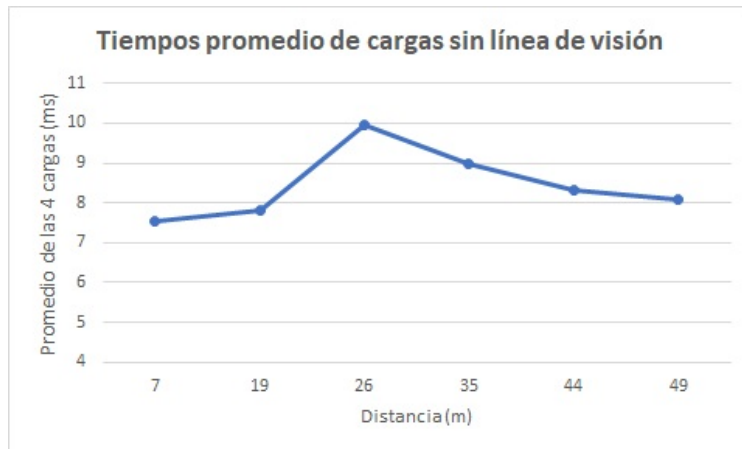
Figura 21. Gráfica de tiempos sin línea de visión.



Nota: Se observa la gráfica de la tabla 2 de los tiempos sin línea de visión. Tomado de Excel.

Se aprecia en la gráfica 21 que las cargas muestran un comportamiento consistente y similar entre sí. A lo largo del experimento, se observa que el rango de tiempos se mantiene estable, lo que sugiere que los obstáculos no tienen un impacto significativo en el tiempo de respuesta. Sin embargo, se evidencia que la presencia de obstáculos afecta la distancia máxima a la que se puede mantener una conexión confiable entre los dispositivos.

Figura 22. Gráfica de tiempos promedio de cargas sin línea de visión.



Nota: Se observa la gráfica de la tabla 2 de los tiempos promedio de cargas sin línea de visión. Tomado de Excel.

Basándose en la gráfica 22, se puede reforzar la idea de que, independientemente de la distancia, el rango de tiempo se mantiene notablemente estable. Al promediar los tiempos de las cuatro cargas, se observa que el intervalo de tiempo se sitúa constantemente entre 7.5 ms y 10 ms. Esto sugiere una consistencia en los tiempos de respuesta de la red Zigbee, independientemente de la distancia y los obstáculos entre los dispositivos.

6. Conclusiones

La implementación de una red basada en tecnología Zigbee para el control de dispositivos domóticos IoT ofrece una solución altamente eficiente y versátil que se adapta a las necesidades cambiantes del entorno doméstico. Al emplear Zigbee, se facilita la interconexión confiable y de bajo consumo energético de una variedad de dispositivos, desde luces hasta sensores de seguridad. Además se resalta la capacidad de Zigbee para proporcionar una comunicación inalámbrica robusta y segura, permitiendo a los usuarios controlar y monitorear sus dispositivos domésticos de manera remota y sin complicaciones. La tecnología Zigbee, con su estructura de red y su eficiencia energética, garantiza una experiencia de usuario fluida y confiable, al tiempo que ofrece una base sólida para la expansión y la integración futura de dispositivos adicionales.

La metodología propuesta, que utiliza una herramienta de software para estimar los tiempos de respuesta de los dispositivos IoT, ofrece una solución integral y eficiente para evaluar el rendimiento de la red y garantizar su funcionamiento óptimo. Al emplear esta metodología, los administradores de red pueden obtener información valiosa sobre los tiempos de respuesta de los dispositivos IoT dentro de la red. Se destaca la importancia de contar con herramientas de monitoreo y evaluación que permitan identificar posibles retrasos o ineficiencias en la red de dispositivos IoT, la capacidad de estimar los tiempos de respuesta de manera precisa facilita la identificación de

áreas de mejora y la implementación de medidas correctivas para optimizar el rendimiento general de la red. Además, la metodología propuesta proporciona una base sólida para la toma de decisiones informadas en cuanto a la configuración, la escalabilidad y la gestión de la red de dispositivos IoT. Al tener una comprensión clara de los tiempos de respuesta, los responsables de la red pueden implementar estrategias proactivas para mejorar la eficiencia y la fiabilidad del sistema en su conjunto.

Es crucial considerar los obstáculos al implementar una red Zigbee, ya que pueden afectar significativamente la distancia máxima sobre la cual los dispositivos pueden mantener una conexión estable. La presencia de obstáculos puede reducir considerablemente esta distancia máxima, lo que a su vez afecta la fiabilidad de la conexión. Es esencial tener en cuenta estos obstáculos al planificar y diseñar una red Zigbee para garantizar una cobertura adecuada y una comunicación confiable entre los dispositivos

Los resultados de los experimentos realizados muestran que las cargas del switch Zigbee no afectan en el tiempo de respuesta de una red Zigbee. El tiempo de respuesta es el mismo para todas las cargas, independientemente de su potencia o consumo de energía.

La consistencia en los tiempos de respuesta de la red Zigbee a lo largo de diferentes distancias destaca que los tiempos en el rango máximo y mínimo son muy similares. Esto sugiere que la distancia en sí misma tiene poco impacto en estos tiempos. Sin embargo, se observa que la distancia máxima afecta la capacidad de mantener una conexión confiable entre los dispositivos.

En resumen, aunque los tiempos de respuesta se mantienen estables, la limitación en la distancia máxima destaca la importancia de considerar factores como la disposición de los obstáculos para garantizar una conectividad óptima en el despliegue de la red.

Los resultados de los experimentos realizados muestran que el tiempo de respuesta de la red Zigbee es de solo 10 milisegundos. Este tiempo de respuesta es increíble para una red Zigbee, ya que permite que los dispositivos se comuniquen de forma casi instantánea.

Para poner esto en perspectiva, el tiempo de respuesta de una red Wi-Fi típica es de unos 20 milisegundos Institute of Electrical and Electronics Engineers (2009). Esto significa que la red Zigbee es un 50 % más rápida que una red Wi-Fi típica. El tiempo de respuesta de una red Zigbee es un factor importante a tener en cuenta a la hora de elegir una red para una aplicación determinada. Un tiempo de respuesta bajo es esencial para aplicaciones que requieren una comunicación rápida y eficiente, como el control de dispositivos domésticos inteligentes o la monitorización de la salud.

La relevancia de este estudio radica en su capacidad para proporcionar información valiosa y concreta que permita a empresas y profesionales de la industria de las comunicaciones y tecnologías de la información tomar decisiones fundamentadas en la implementación de soluciones de comunicación inalámbrica Johnson & Lee (2018). Los resultados obtenidos serán esenciales para optimizar la eficiencia, confiabilidad y rentabilidad de las infraestructuras de red en entornos del mundo real, impactando directamente en el desarrollo y la evolución de las tecnologías de comunicación en el ámbito empresarial y más allá.

7. Recomendaciones

- Para mejorar el alcance de una red Zigbee, es importante evitar los obstáculos y utilizar una topología de red adecuada. En cuanto a la distancia, el alcance máximo de una red Zigbee típica con obstáculos disminuye la distancia. Si necesita conectar dispositivos que están más lejos, es posible que necesite utilizar dispositivos con mayor potencia de transmisión o antenas externas. Los obstáculos, como las paredes y el mobiliario, pueden reducir el alcance de la señal Zigbee. Si es posible, coloque los dispositivos Zigbee en zonas despejadas para mejorar la recepción de la señal. La topología de red Zigbee determina cómo se conectan los dispositivos entre sí. Una topología de malla es la mejor opción para distancias largas, ya que permite que los dispositivos se comuniquen entre sí a través de otros dispositivos.
- Para construir una red que habilite el control de dispositivos domóticos IoT mediante tecnología Zigbee, es esencial adoptar un enfoque integral que abarque desde la planificación de la infraestructura hasta la implementación de medidas de seguridad y la optimización del rendimiento. Se recomienda realizar un análisis detallado de los dispositivos a conectar, planificar estratégicamente la ubicación de los nodos de red para garantizar una cobertura adecuada, seleccionar dispositivos compatibles y eficientes en términos energéticos, implementar sólidas medidas de seguridad y monitoreo continuo. Además, se debe diseñar la red con

escalabilidad y flexibilidad, permitiendo la incorporación de nuevos dispositivos y la adaptación a las necesidades cambiantes del entorno doméstico. Estas acciones aseguran una red Zigbee confiable, segura y adaptable, mejorando la experiencia del usuario y optimizando el funcionamiento de los dispositivos domóticos en el hogar.

- Al analizar una red, es importante conectar solo los elementos que sean necesarios. Esto se debe a que los datos innecesarios pueden confundir y dificultar la interpretación de los resultados del análisis.

Referencias Bibliográficas

Becerra, E. (2010). El uso de la tecnología zigbee para la domótica.

Chitiva Bernal, Y. E. (2020). Zigbee: Tecnología inalámbrica para el internet de las cosas. *Revista Ingeniería y Desarrollo*, 39(1), 69–84.

Gateway (2024). Ledbox. <https://www.ledbox.es/generar-pdf-14540-gateway-zigbee-lan>.

Gupta, S. et al. (2015). Advancements in bluetooth technology. *Wireless Communication and Mobile Computing*, 14(2), 205–217.

Hinostroza, E. & Garcés, J. (2022). Estudio de la tecnología de comunicación inalámbrica en el estándar ieee 802.11ax orientada al despliegue en ecuador para el 2022. *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 23(2), 1–10.

Institute of Electrical and Electronics Engineers (2009). *IEEE recommended practice for information technology: telecommunications and information exchange between systems– local and metropolitan area networks– specific requirements. Part 15.5, Mesh topology capability in wireless personal area networks (WPANs)*. New York, NY: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

Jiaquan, L. & Renqiang, Z. (2014). Research and application of intelligent building energy ma-

nagement system. In *The 26th Chinese Control and Decision Conference (2014 CCDC)* (pp. 2789–2793).

Johnson, A. & Lee, K. (2018). Iot deployment in local area networks: Challenges and opportunities. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(3), 1234–1245.

Li, J. & Zhao, R. (2014). Research and application of intelligent building energy management system. In *The 26th Chinese Control and Decision Conference (2014 CCDC)* (pp. 2789–2793).

Paessler (2024). paessler. <https://www.paessler.com/es/it-explained/mqtt>.

Patel, A. et al. (2016). Analysis of the performance of bluetooth, zigbee, and 6lowpan wireless technologies in industrial environments. *IEEE Communications Magazine*, 54(12), 122–129.

Switch, S. (2024). Aliexpress. <https://es.aliexpress.com/item/1005005354425166.html?gatewayAdapt=glo2esp>.

Apéndices

A. Instrucciones para Instalar Wireshark

Aquí se encuentran las instrucciones detalladas para descargar el software mencionado en el Capítulo 4.

A.1. Windows

A.1.1. Descarga del instalador

- Ve al sitio web oficial de Wireshark: <https://www.wireshark.org/>
- Navega hasta la sección de descargas y elige el instalador para Windows.
- Descarga el instalador más reciente compatible con tu sistema operativo (32-bit o 64-bit).

A.1.2. Ejecución del instalador

- Una vez descargado, haz doble clic en el archivo de instalación (.exe) para iniciar el proceso de instalación.

A.1.3. Configuración de la instalación

- Sigue las instrucciones en pantalla para completar la instalación.
- Durante la instalación, se te puede pedir que elijas los componentes que deseas instalar. Por lo general, es seguro aceptar las opciones predeterminadas para una instalación estándar.

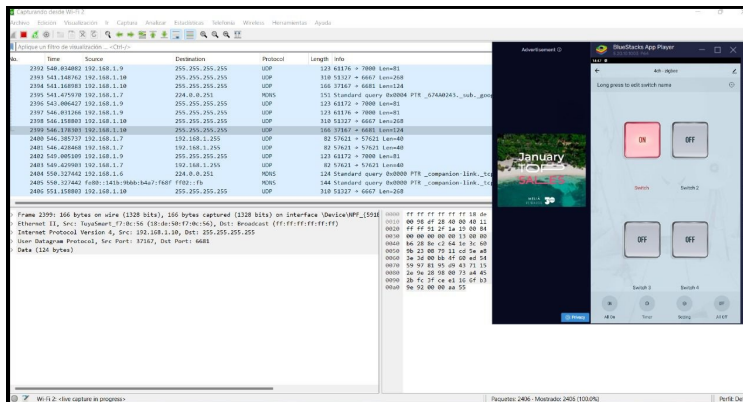
A.1.4. Finalización de la instalación

- Una vez completada la instalación, Wireshark debería estar disponible en tu sistema y listo para usar.

B. Activación de cada una de las cargas por medio del emulador.

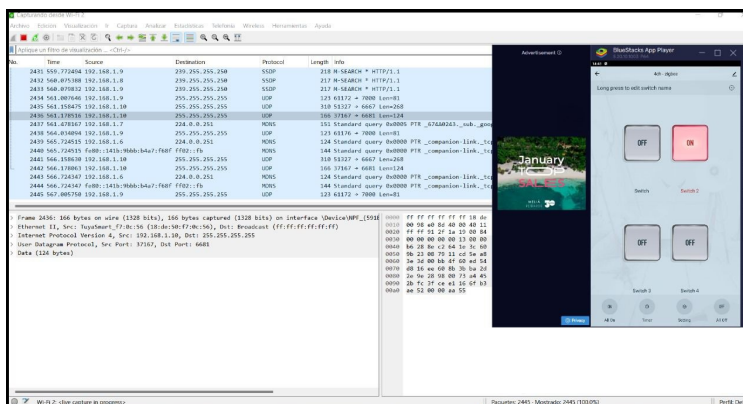
Aquí se presentan imágenes detalladas que ilustran la activación de cada carga en el sistema.

Figura 23. Activación carga 1.



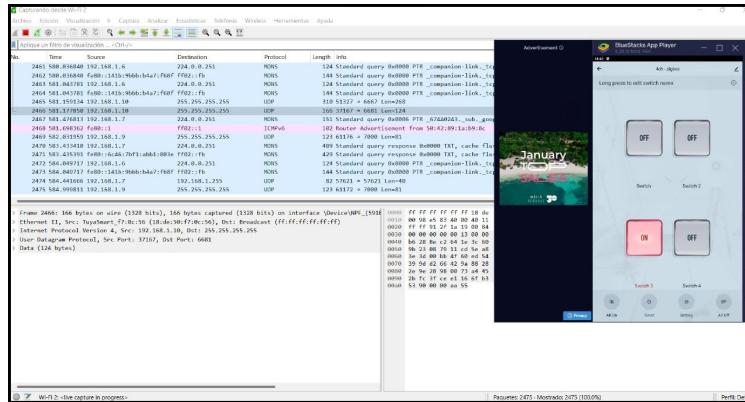
Nota: Se observa la activación de la carga 1. Tomado de software Wireshark y emulador BlueStacks.

Figura 24. Activación carga 2.



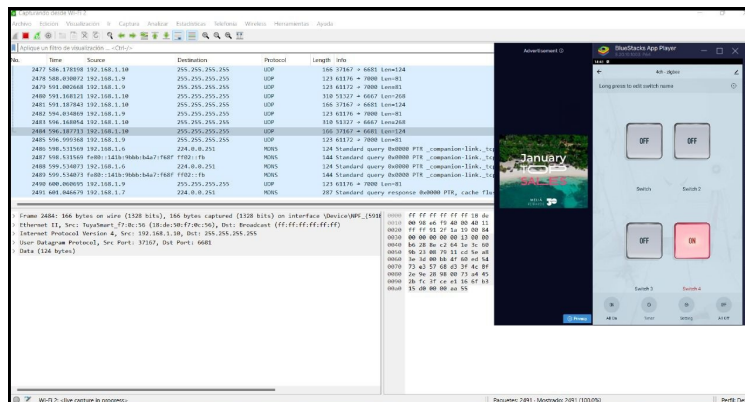
Nota: Se observa la activación de la carga 2. Tomado de software Wireshark y emulador BlueStacks.

Figura 25. Activación carga 3.



Nota: Se observa la activación de la carga 3. Tomado de software Wireshark y emulador BlueStacks.

Figura 26. Activación carga 4.



Nota: Se observa la activación de la carga 4. Tomado de software Wireshark y emulador BlueStacks.

C. Tiempos de respuesta

Aquí se presenta una recopilación de imágenes que detallan los diversos tiempos de respuesta en la activación de las cargas.

Figura 27. Paquetes de la red tiempos de respuesta 1

No.	Time	Source	Destination
2586	666.753046	fe80::6c46:7bf1:abb1:803e	ff02::fb
2587	668.755585	192.168.1.7	224.0.0.251
2588	668.755585	fe80::6c46:7bf1:abb1:803e	ff02::fb
2589	669.038281	192.168.1.9	255.255.255.255
2590	671.177136	192.168.1.10	255.255.255.255
2591	671.196992	192.168.1.10	255.255.255.255
2592	672.065180	192.168.1.9	255.255.255.255
2593	674.444197	192.168.1.7	192.168.1.255
2594	675.004553	192.168.1.9	255.255.255.255
2595	676.177137	192.168.1.10	255.255.255.255
2596	676.196690	192.168.1.10	255.255.255.255
2597	676.767966	192.168.1.8	239.255.255.250
2598	676.772400	192.168.1.9	239.255.255.250
2599	677.073658	192.168.1.8	239.255.255.250
2600	677.076687	192.168.1.9	239.255.255.250

No.	Time	Source	Destination
2685	752.324794	192.168.1.7	224.0.0.251
2686	752.324794	fe80::6c46:7bf1:abb1:803e	ff02::fb
2687	752.475139	192.168.1.7	224.0.0.251
2688	752.476784	fe80::6c46:7bf1:abb1:803e	ff02::fb
2689	752.577268	192.168.1.7	224.0.0.251
2690	752.579099	fe80::6c46:7bf1:abb1:803e	ff02::fb
2691	753.004561	192.168.1.9	255.255.255.255
2692	753.268894	192.168.1.7	224.0.0.251
2693	753.475703	192.168.1.7	224.0.0.251
2694	753.478339	fe80::6c46:7bf1:abb1:803e	ff02::fb
2695	755.477391	192.168.1.7	224.0.0.251
2696	755.479991	fe80::6c46:7bf1:abb1:803e	ff02::fb
2697	756.068105	192.168.1.9	255.255.255.255
2698	756.176030	192.168.1.10	255.255.255.255
2699	756.195718	192.168.1.10	255.255.255.255

(a) Tiempo de respuesta 1

(b) Tiempo de respuesta 2

Nota: Se observan tiempos de respuesta en la activación de una carga. Tomado de software Wireshark.

Figura 28. Paquetes de la red tiempos de respuesta 2

No.	Time	Source	Destination
2754	788.834539	fe80::6c46:7bf1:abb1:803e	ff02::fb
2755	788.281241	192.168.1.7	224.0.0.251
2756	788.284480	fe80::6c46:7bf1:abb1:803e	ff02::fb
2757	788.534818	192.168.1.7	224.0.0.251
2758	788.537348	fe80::6c46:7bf1:abb1:803e	ff02::fb
2759	789.035443	192.168.1.9	255.255.255.255
2760	789.534493	192.168.1.7	224.0.0.251
2761	789.537106	fe80::6c46:7bf1:abb1:803e	ff02::fb
2762	791.185812	192.168.1.10	255.255.255.255
2763	791.205328	192.168.1.10	255.255.255.255
2764	791.534814	192.168.1.7	224.0.0.251
2765	791.537229	fe80::6c46:7bf1:abb1:803e	ff02::fb
2766	792.063351	192.168.1.9	255.255.255.255
2767	793.271371	192.168.1.7	224.0.0.251
2768	794.454438	192.168.1.7	192.168.1.255

No.	Time	Source	Destination
2778	797.771570	192.168.1.8	239.255.255.250
2779	797.776146	192.168.1.9	239.255.255.250
2780	798.062666	192.168.1.9	255.255.255.255
2781	798.077114	192.168.1.8	239.255.255.250
2782	798.079925	192.168.1.9	239.255.255.250
2783	798.772614	192.168.1.8	239.255.255.250
2784	799.077569	192.168.1.8	239.255.255.250
2785	799.080470	192.168.1.9	239.255.255.250
2786	799.773385	192.168.1.8	239.255.255.250
2787	799.776231	192.168.1.9	239.255.255.250
2788	800.078494	192.168.1.8	239.255.255.250
2789	800.082998	192.168.1.9	239.255.255.250
2790	801.031061	192.168.1.9	255.255.255.255
2791	801.105607	192.168.1.10	255.255.255.255
2792	801.205010	192.168.1.10	255.255.255.255

(a) Tiempo de respuesta 3

(b) Tiempo de respuesta 4

Nota: Se observan tiempos de respuesta en la activación de una carga. Tomado de software WireShark.