

Desarrollo de un sistema de seguridad domótico aplicando estándares de comunicación inalámbrica para el control y monitorización de una vivienda

Edgar Camilo Rivera Pérez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Electrónico

Director

Ariel Yezid Villareal Solano

Ingeniero Electrónico

Codirector

Jaime Guillermo Barrero Pérez

Msc. En Ingeniería Electrónica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Físico Mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Ingeniería Electrónica

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

Desde mi corazón, dedico este proyecto primeramente a mi familia, por su apoyo incondicional desde el primer día y a lo largo del camino, quienes me enseñaron que con esfuerzo y dedicación todo es posible; este logro es de ustedes, Edgar, Edith y Lina.

A mis amigos, por sus consejos, palabras de alientos, dolor y sonrisas compartidas. Gracias por todo.

A Mayita, gracias por todo lo que he aprendido a tu lado y a enseñarme a valorar cada paso que se da, ver la vida con amor y a nunca darme por vencido; este logro es tuyo.

EDGAR RIVERA

Agradecimientos

Quiero expresar primeramente agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander y profesores de la escuela de Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones quienes con sus valiosas enseñanzas en el ámbito educativo y de la vida han contribuido en gran manera al desarrollo integral de esta tesis y de mi persona.

A todos mis amigos y compañeros de estudio, con quienes desde el primer día pude compartir el amor por lo que hacemos y con quienes pude formar no solo un vínculo profesional sino personal.

Especial agradecimiento al director, Ariel Yezid Villareal Solano, y codirector, Magíster Jaime Guillermo Barrero Pérez. Su experiencia y conocimiento han guiado de manera inigualable el desarrollo del proyecto, además de su respaldo dentro de la formación profesional que fue recibida.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	10
1. Objetivos	10
1.1 Objetivo General	11
1.2 Objetivos Específicos	11
2. Marco referencial	11
2.1 Internet de las cosas (Internet of Things)	11
2.2 IEEE 802.11 (WiFi)	11
2.3 IEEE 802.15.4/Zigbee	12
2.4 Sistema domótico.....	12
2.5 Home Assistant.....	12
2.6 Módulo ESP32	13
3. Desarrollo e implementación del sistema de seguridad domótico	13
3.1 Propiedades y topología de red del sistema.....	13
3.2 Sistema de monitorización	15
3.2.1 Implementación y configuración del sistema de monitorización.....	16
3.2.2 Montaje físico e integración del módulo en Home Assistant.....	17
3.3 Sistema de sensores.....	18
3.3.1 Características de los elementos del sistema.....	18
3.3.2 Implementación y configuración del sistema de sensores	22
3.3.3 Montaje e integración en Home Assistant	25
4. Pruebas experimentales	27
4.1 Caracterización de los parámetros de red.....	27
4.2 Parámetros y métodos de evaluación	28
4.3 Detalles de las pruebas experimentales.....	30
5. Resultados.....	31
6. Conclusiones	38
7. Recomendaciones	40
Referencias Bibliográficas.....	41
Apéndices	42

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Características de la ESP32-CAM.....	16
Tabla 2 Características del sensor de temperatura y humedad DHT11	19
Tabla 3 Características del sensor infrarrojo de movimiento HC-SR501	20
Tabla 4 Características del módulo sensor de luz LDR	21
Tabla 5 Características del módulo de desarrollo ESP32-C6-WROOM-1	22
Tabla 6 Características del coordinador SONOFF Zigbee Dongle-E.....	25
Tabla 7 Caracterización de parámetros de red del dispositivo ESP32-CAM	27
Tabla 8 Caracterización de parámetros de red del dispositivo ESP32C6.....	28
Tabla 9 Datos recolectados prueba de carga red Wifi.....	31
Tabla 10 Parámetros obtenidos en la prueba de carga del dispositivo ESP32-CAM.....	33
Tabla 11 Parámetros obtenidos en la prueba de movilidad del dispositivo final ESP32-C6.....	35
Tabla 12 Parámetros obtenidos en la prueba de carga del dispositivo final ESP32-C6.....	37

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Topología de la red WiFi del sistema de monitorización.....	14
Figura 2 Topología de la red Zigbee del sistema de sensores.	15
Figura 3 Placa de desarrollo ESP32-CAM	15
Figura 4 Módulo ESP32-CAM-MB.....	16
Figura 5 Montaje físico del módulo ESP32-CAM.....	17
Figura 6 Visualización de la transmisión en la aplicación de Home Assistant	17
Figura 7 Módulo sensor DHT11	19
Figura 8 Módulo sensor HC-SR501	19
Figura 9 Módulo sensor de luz LDR	20
Figura 10 Módulo ESP32-C6	21
Figura 11 Configuración de pines del módulo ESP32-C6.....	22
Figura 12 Diagrama de conexiones del sistema.....	23
Figura 13 Diagrama de flujo simplificado del funcionamiento del sistema de sensores.	24
Figura 14 Módulo Zigbee Dongle-E.....	25
Figura 15 Visualización de datos capturados por el módulo de sensores en Home Assistant ..	26
Figura 16 Relación entre la ubicación del dispositivo y la intensidad de la señal RSSI.	32
Figura 17 Relación ubicación y latencia entre el dispositivo e integrador domótico.....	32
Figura 18 Relación ubicación del dispositivo y la tasa de transferencia de datos.....	33
Figura 19 Gráfica relacional número de dispositivos y la latencia.....	34
Figura 20 Gráfica relacional número de dispositivos y la intensidad de la señal.....	34
Figura 21 Gráfica relacional número de dispositivos y la tasa de transferencia de datos	35
Figura 22 Gráfica relacional ubicación del dispositivo final y la intensidad de señal.....	35
Figura 23 Gráfica relacional ubicación del dispositivo final y la calidad del enlace	36
Figura 24 Gráfica relacional ubicación del dispositivo y el consumo energético	36
Figura 25 Gráfica relacional tiempo de envío de datos y la intensidad de la señal	37
Figura 26 Gráfica relacional tiempo de envío de datos y la calidad del enlace	37
Figura 27 Gráfica relacional tiempo de envío de datos y el consumo energético	38
Figura 28 Medición corriente consumida por el dispositivo durante la transmisión de datos	44

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A Estructura red WiFi en el software Cisco Packet Tracer.....	42
Apéndice B Código del sistema de monitorización	42
Apéndice C Código del sistema de sensores	42
Apéndice D Detección de dispositivos Zigbee en Home Assistant	42
Apéndice E Captura de parámetros de la red Wifi.....	43
Apéndice F Captura de parámetros de la red Zigbee	44
Apéndice G Video presentación del proyecto	44

Resumen

Título: Desarrollo de un sistema de seguridad domótico aplicando estándares de comunicación inalámbrica para el control y monitorización de una vivienda*

Autor: Edgar Camilo Rivera Pérez**

Palabras Clave: Domótica, Sensores, Monitorización, Protocolos, Inalámbrico.

Descripción: Se desarrolló un prototipo de sistema de seguridad domótico basado en los estándares de comunicación inalámbrica 802.11 y 802.15.4, diseñado para satisfacer la creciente demanda de sistemas que ofrezcan vigilancia en tiempo real y la capacidad de responder a eventos críticos, como la detección de movimiento o cambios en las condiciones ambientales. Este prototipo ofrece una solución flexible que combina monitoreo en tiempo real y automatización de sensores, mejorando la seguridad del hogar y optimizando el consumo energético. El sistema integra dos subsistemas implementados con módulos de la familia ESP32 y sensores externos, gestionados mediante Home Assistant, lo que permite unificar ambos subsistemas y visualizar el estado e información de la vivienda a través de una interfaz móvil. Además, el desarrollo está enfocado en la evaluación de parámetros clave de los protocolos utilizados, con el objetivo de relacionar las variables capturadas con el comportamiento del sistema, proporcionando una base sólida para futuras mejoras del prototipo y estudios adicionales sobre los estándares de comunicación empleados.

* Trabajo de Grado

**Facultad de Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Ingeniería electrónica. Director: Ariel Yezid Villareal Solano. Ingeniero Electrónico. Codirector: Jaime Guillermo Barrero Pérez. MSc. en Ingeniería Electrónica

Abstract

Title: Develop of a Home Security System Applying Wireless Communication Standards for Control and Monitoring of a Residence *

Author(s): Edgar Camilo Rivera Pérez**

Key Words: Home Automation, Sensors, Monitoring, Protocols, Wireless.

Description: A prototype of a home security system was developed based on the 802.11 and 802.15.4 wireless communication standards, designed to meet the growing demand for systems that provide real-time surveillance and the ability to respond to critical events, such as motion detection or changes in environmental conditions. This prototype offers a flexible solution that combines real-time monitoring and sensor automation, enhancing home security while optimizing energy consumption. The system integrates two subsystems implemented with ESP32 family modules and external sensors, managed through Home Assistant, allowing the unification of both subsystems and the visualization of the home's status and information through a mobile interface. Furthermore, the development focuses on evaluating key parameters of the protocols used, with the goal of correlating captured variables with system behavior, providing a solid foundation for future prototype improvements and additional studies related to the communication standards employed.

* Degree Work

**Faculty of Physicomechanical Sciences. School of Electrical, Electronic, and Telecommunications Engineering. Electronic Engineering. Director: Ariel Yezid Villareal Solano. Electronic Engineer. Co-director: Jaime Guillermo Barrero Pérez. MSc in Electronic Engineering

Introducción

El Internet de las Cosas (IoT) es un concepto que define una red de dispositivos conectados a internet en la cual objetos cotidianos, sensores, actuadores y otros elementos con capacidad de procesamiento pueden comunicarse con las personas y entre estos mismos (Kortuem et al., 2009). Estos dispositivos pueden recopilar, transmitir y procesar datos a través de una red, permitiendo una comunicación bidireccional con la finalidad de automatizar procesos mediante el monitoreo y control de dispositivos de manera remota, mejorando la seguridad y la eficiencia energética en hogares donde se implementan sistemas domóticos de seguridad.

La automatización de un hogar posee diferentes beneficios tales como el ahorro de energía gracias a que estos sistemas pueden programarse para encender y apagar dispositivos en momentos específicos del día, lo que ayuda a reducir el consumo de energía y ahorrar dinero en facturas de servicios públicos. Brindan mayor facilidad y comodidad respecto a la seguridad permitiendo monitorear y controlar el acceso a un hogar desde cualquier lugar con una conexión a internet (Moreaux et al., 2012). Además, que pueden ser diseñados para ser utilizados por personas con discapacidades físicas o adultos mayores, permitiéndoles controlar dispositivos y sistemas de manera más fácil y segura. Uno de los mayores retos de la domótica hoy es desarrollar sistemas efectivos y mantener un balance en temas económicos, de conexión y de seguridad para el usuario. Actualmente, las viviendas automatizadas presentan sistemas inalámbricos con el propósito de aprovechar la interoperabilidad, la seguridad, la escalabilidad y la fiabilidad que existe en los dispositivos IoT (Acampora & Loia, 2005).

El prototipo de sistema domótico desarrollado en este proyecto toma como base estándares de comunicación inalámbrica, como el IEEE 802.11 y el IEEE 802.15.4, y las funcionalidades periféricas de dispositivos basados en el microcontrolador ESP32. Junto con la accesibilidad y facilidad de implementación de un integrador domótico como Home Assistant, se brinda una solución de sensores y monitorización de distintos espacios de una vivienda, garantizando seguridad y una gestión inteligente. Este proyecto documenta el desarrollo de un prototipo que facilita la interconexión de dispositivos de vigilancia y control, con el objetivo de estudiar la estabilidad y fiabilidad de las redes inalámbricas diseñadas dentro de este.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Diseñar un sistema domótico de seguridad aplicando los estándares de comunicación 802.11 y 802.15.4/Zigbee que permita valorar el rendimiento de la red inalámbrica que conecta los dispositivos controlados mediante el microprocesador ESP32.

1.2 Objetivos Específicos

- Implementar un sistema domótico prototipo que ofrezca servicios de seguridad mediante la monitorización de un entorno físico definido usando dispositivos IoT tales como cámaras, sensores y alarmas compatibles con el microprocesador ESP32.
- Controlar el sistema mediante una aplicación móvil implementando un protocolo de comunicación inalámbrica que permita su funcionamiento a través de Internet.
- Analizar los parámetros de rendimiento en la red del sistema construido para evaluar la calidad de los protocolos de comunicación implementados en cada dispositivo.

2. Marco referencial

A continuación, se presenta una lista de términos relevantes que enmarcan la base investigativa del proyecto y se mantienen presentes a lo largo del documento.

2.1 Internet de las cosas (Internet of Things)

El Internet de las Cosas (Internet of Things o IoT) se refiere a la interconexión de dispositivos y sistemas a través de Internet, permitiendo la comunicación y el intercambio de datos entre ellos. Esta tecnología facilita la monitorización y gestión eficiente de dispositivos conectados, mejorando diversos aspectos de la vida cotidiana y la automatización de tareas abarcando desde dispositivos domésticos inteligentes hasta sistemas industriales.

2.2 IEEE 802.11 (WiFi)

El protocolo 802.11, comúnmente conocido como WiFi, es un estándar de comunicación inalámbrica definido por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE). Este protocolo permite la transmisión de datos a través de ondas de radio en redes locales (LAN), facilitando la conectividad de dispositivos sin necesidad de cables. WiFi es ampliamente utilizado debido a su capacidad para proporcionar altas velocidades de transferencia y soportar múltiples dispositivos simultáneamente. Según el IEEE, el estándar 802.11 incluye varias variantes (como 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n, y 802.11ac) que ofrecen diferentes mejoras en términos de velocidad, alcance y fiabilidad (IEEE, 2016).

2.3 IEEE 802.15.4/Zigbee

El estándar IEEE 802.15.4 es un protocolo de comunicación inalámbrica diseñado para redes de área personal de bajo costo y baja velocidad, optimizado para aplicaciones que requieren baja tasa de transferencia de datos y alta eficiencia energética. Este estándar especifica las capas físicas y de control de acceso al medio (MAC), permitiendo la creación de redes con dispositivos de bajo consumo, como sensores y actuadores, que pueden operar durante largos periodos con baterías limitadas (IEEE, 2016).

Zigbee, por su parte, es una especificación basada en el estándar IEEE 802.15.4, diseñada para proporcionar una solución completa de red, incluyendo capas superiores de red y aplicación. Zigbee se caracteriza por su capacidad para formar redes de malla robustas y escalables, facilitando la comunicación entre múltiples dispositivos en un entorno de baja potencia y bajo costo. Esta tecnología es ampliamente utilizada en aplicaciones de automatización del hogar, monitoreo industrial y control de edificios debido a su fiabilidad y eficiencia energética (Connectivity Standards Alliance, 2021).

2.4 Sistema domótico

Un sistema domótico es una solución tecnológica avanzada que integra y automatiza dispositivos y funciones en un hogar para mejorar la comodidad, eficiencia y seguridad de los residentes. Estos sistemas permiten el control centralizado de elementos como la iluminación, climatización, seguridad, electrodomésticos y entretenimiento a través de interfaces digitales accesibles desde dispositivos móviles, computadoras o paneles de control dedicados. La domótica se basa en una combinación de sensores, actuadores y controladores que se comunican mediante protocolos de comunicación inalámbrica y cableada, asegurando una operación coordinada y eficiente (Aldrich, 2003).

2.5 Home Assistant

Home Assistant es una solución de código abierto para la centralización e integración de un sistema domótico. Este software permite la integración de una amplia gama de dispositivos y servicios en una sola plataforma (Akhmetzhanov et al., 2022). Home Assistant es altamente configurable y puede integrarse con numerosos dispositivos y servicios, como luces, termostatos, cámaras de seguridad, y más. Utiliza una arquitectura modular que permite añadir nuevas funcionalidades y dispositivos a través de integraciones personalizadas. Además, soporta la automatización avanzada, permitiendo la creación de reglas y rutinas personalizadas para automatizar tareas cotidianas.

2.6 Módulo ESP32

El módulo ESP32 es un microcontrolador de 32 bits y una unidad de procesamiento de señal digital, diseñado para ofrecer soluciones robustas y de bajo costo utilizando múltiples protocolos de comunicación inalámbrica mostrando robustez, versatilidad y fiabilidad en una amplia variedad de aplicaciones y escenarios de implementación. Este microcontrolador facilita la integración de una amplia gama de dispositivos y sensores, esenciales para hogares inteligentes con periféricos integrados y múltiples interfaces de conexión ofreciendo flexibilidad en el diseño de sistemas domóticos. Dentro de la familia de microcontroladores ESP32, existen diversas variantes que integran periféricos y protocolos de comunicación adicionales, adaptándose a estándares específicos en áreas como la automatización y la domótica.

Una de las principales ventajas del ESP32 en proyectos domóticos es su capacidad de procesamiento junto con su bajo consumo energético. Esto permite ejecutar múltiples tareas simultáneamente, como la recopilación de datos de sensores y la comunicación sin comprometer el rendimiento (Espressif Systems, 2024). Además, la compatibilidad con integradores domóticos facilita la creación de soluciones escalables y personalizables, permitiendo a los usuarios finales controlar y monitorear sus hogares de manera eficiente y segura.

3. Desarrollo e implementación del sistema de seguridad domótico

El diseño del sistema se fundamenta en los principios básicos de seguridad de un sistema domótico y las funcionalidades requeridas para la implementación de este dentro de un hogar, es por ello por lo que en la fase de planificación y diseño del sistema fue definida la estructura del sistema como la unificación de subsistemas especializados como son sistemas de monitorización y vigilancia operando en conjunto con los sensores que detectan cambios en el entorno. Para la unificación de estos, fue seleccionado el controlador domótico (también llamado Hub central) Home Assistant el cual gestiona la comunicación entre los dispositivos y brinda una interfaz de usuario tanto web como móvil.

A lo largo de la presente sección se encuentran las diferentes etapas del desarrollo del sistema domótico.

3.1 Propiedades y topología de red del sistema

En el diseño del sistema domótico, la selección y organización de la topología de red son esenciales para asegurar la correcta operación y comunicación de los componentes. El prototipo integra dos protocolos inalámbricos, cada uno elegido para los subsistemas del sistema. La

selección se basó en factores clave como la eficiencia en la transmisión de datos, el ancho de banda necesario, el consumo energético y la estabilidad de la red en diferentes escenarios.

La primera red, basada en el estándar IEEE 802.11, es utilizada para el sistema de vigilancia. Este estándar fue elegido por su alta velocidad y amplio ancho de banda, necesarios para la transmisión en tiempo real de video desde una cámara con ESP32, asegurando una conexión estable con el servidor de Home Assistant. El prototipo, al estar diseñado con solo una cámara, presenta la topología de la red como se muestra en el programa Cisco Packet Tracer en la Figura 1. No obstante, debido a las características de escalabilidad del sistema, es posible añadir nuevos dispositivos de monitorización en una topología de estrella. En el Apéndice A se encuentran más detalles acerca de la topología de la red WiFi diseñada para el sistema en el programa Cisco Packet Tracer.

Figura 1

Topología de la red WiFi del sistema de monitorización.



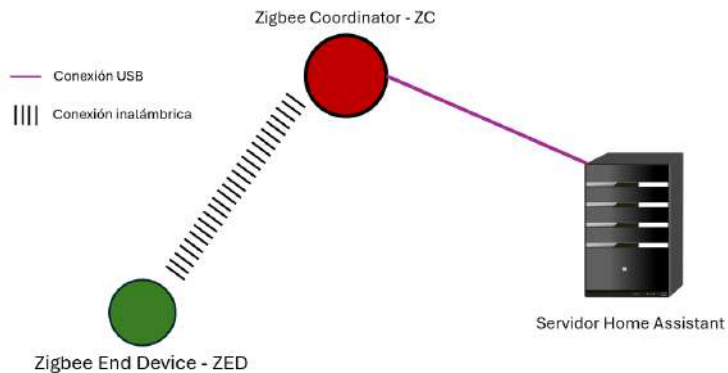
La segunda red se basa en el estándar IEEE 802.15.4, utilizado en protocolos como Zigbee. Esta red WPAN (red de área personal inalámbrica) conecta los sensores con el integrador central de Home Assistant, empleando dicho estándar en las capas física y de enlace de datos. Zigbee fue seleccionado por su bajo consumo energético, alta fiabilidad en la transmisión a cortas distancias, y su capacidad para formar redes con diversas topologías, lo que mejora la cobertura y la redundancia del sistema. Estas características son clave para garantizar el funcionamiento eficiente y prolongado de los sensores.

Considerando los objetivos del proyecto, se determinó la implementación de una topología en estrella para el sistema, como se evidencia en la Figura 2. La elección de esta se debe a la simplicidad en la configuración y la baja latencia que permite, dado que la ruta de comunicación entre los dispositivos es corta. Los componentes de esta topología son los nodos finales y el coordinador central Zigbee. Este coordinador (ZC) es responsable de gestionar la información de la red y asignar las direcciones a los dispositivos finales (ZED), cuya tarea es

comunicar los datos recolectados al coordinador. Debido a la topología seleccionada, la red no incluirá dispositivos intermedios como routers Zigbee (ZR), cuya función es extender la cobertura de la red y reenviar datos entre dispositivos en topologías de malla y árbol.

Figura 2

Topología de la red Zigbee del sistema de sensores.



3.2 Sistema de monitorización

Con la estructura planteada, fue desarrollado un sistema de monitoreo basado en la placa ESP32-CAM, que utiliza el microcontrolador ESP32 compatible con estándares inalámbricos como IEEE 802.11b/g/n y Bluetooth 4.2, gracias a su antena integrada. La conectividad WiFi permite la transmisión de video en tiempo real, aprovechando el ancho de banda disponible. La cámara OV2640, integrada en la placa, ofrece resoluciones de hasta 2 megapíxeles, lo que proporciona una calidad de imagen adecuada para la vigilancia doméstica. Esto mejora significativamente la seguridad del hogar, permitiendo un control continuo de áreas críticas. El bajo costo, facilidad de implementación y alta funcionalidad de la ESP32-CAM la posicionan como una solución ideal para aplicaciones de seguridad como las desarrolladas en este proyecto.

Figura 3

Placa de desarrollo ESP32-CAM



Tomado de Módulo ESP32 Con Cámara OV2640 WiFi-Bluetooth ESP32CAM (s/f).

Tabla 1*Características de la ESP32-CAM*

Característica	Descripción
Microcontrolador	ESP32 dual-core Xtensa LX6
Frecuencia de reloj	Hasta 240MHz
Cámara	OV2640 y OV7670, resolución de hasta 2 MP
Consumo de corriente	6 a 310 mA
Voltaje de alimentación	5 V (recomendación del fabricante 5V-2A)
Precio	42000 COP

3.2.1 Implementación y configuración del sistema de monitorización

El modelo de ESP32-CAM con el cual fue implementado el sistema incluye el módulo ESP32-CAM-MB el cual permite la programación y alimentación del microcontrolador mediante USB. Además de equipar al microcontrolador con una antena externa, proporcionando mayor ganancia para la recepción y transmisión de señales.

Figura 4*Módulo ESP32-CAM-MB*

Tomado de ESP32-CAM-MB (s/f).

Para centralizar el sistema en Home Assistant, se emplea ESPHome, una herramienta que facilita la configuración y manejo de dispositivos basados en ESP32. Su objetivo es simplificar la configuración mediante archivos YAML, permitiendo definir el comportamiento del dispositivo de forma estructurada. El archivo YAML para la cámara está dividido en secciones según su función. La configuración general incluye el nombre del dispositivo, la placa ESP32 utilizada y el framework (Arduino). La red se configura con detalles de la conexión WiFi principal y una red auxiliar para garantizar conectividad en caso de fallos. También se habilita la actualización OTA y la API de Home Assistant, asegurando comunicación cifrada.

En la configuración de la cámara, se especifican los pines de datos, reloj y alimentación, junto con los ajustes de resolución, contraste, saturación y tasa de cuadros. Además, se habilita el control de un LED en Home Assistant, que se automatiza para encenderse en condiciones de baja luz o al superar las horas de luz natural. El código implementado se encuentra en el Apéndice B.

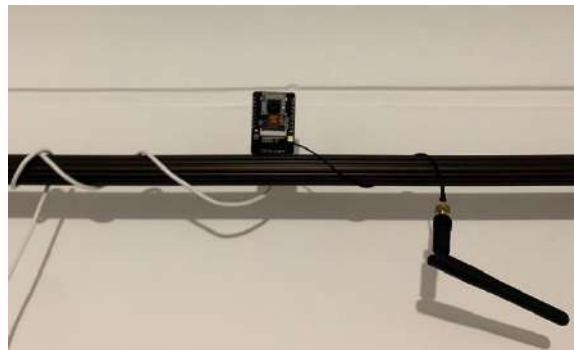
3.2.2 Montaje físico e integración del módulo en Home Assistant

Con el módulo preparado, fue ubicado el dispositivo estratégicamente en un punto de acceso como la puerta principal del hogar, donde es más probable que ocurran entradas no autorizadas y se desea una monitorización constante de la entrada y salida de los residentes del hogar.

Para el montaje del prototipo, se opta por mantener el módulo ESP32-CAM-MB previamente mencionado a fin de asegurar una mayor fiabilidad en la conexión de alimentación y mejorar el manejo físico de la tarjeta ya que la estructura del módulo proporciona una mayor estabilidad durante la instalación en superficies del hogar, optimizando así el proceso de montaje que puede ser observado en la Figura 5. Por otro lado, para la alimentación del dispositivo se tuvo en cuenta la recomendación del fabricante en la hoja de datos, de otra manera la imagen puede verse afectada por interferencias visuales.

Figura 5

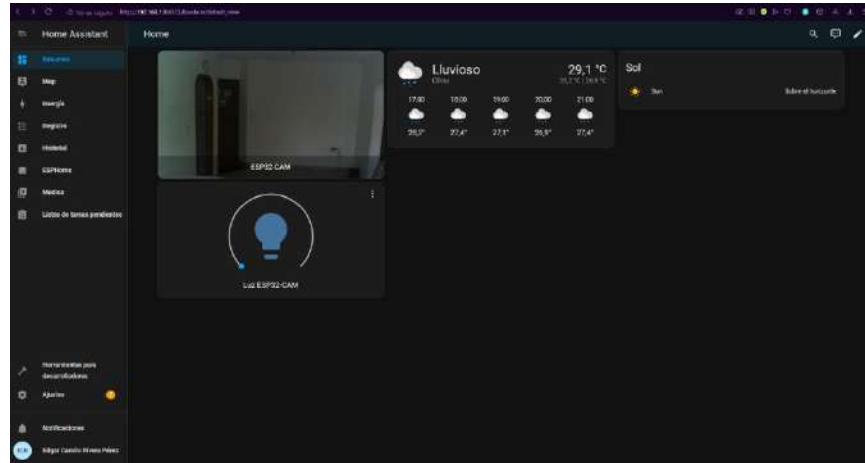
Montaje físico del módulo ESP32-CAM



Una vez que el dispositivo se inicia y se conecta a la red, Home Assistant detecta automáticamente la cámara y permite su gestión centralizada a través de su interfaz y la integración con ESPHome, facilitando la visualización de la cámara y la configuración de automatizaciones para la monitorización y el control del entorno doméstico de manera eficiente y segura.

Figura 6

Visualización de la transmisión en la aplicación web de Home Assistant



3.3 Sistema de sensores

El sistema de sensores diseñado en el prototipo consta de un conjunto de dispositivos seleccionados para capturar datos relevantes en el entorno de una vivienda o residencia. Las principales variables estipuladas para su monitorización fueron la temperatura, la humedad, la detección de movimiento y el nivel de luz. Fueron seleccionados los sensores DHT11, HC-SR501 y un módulo LDR para la medición de las variables respectivamente mencionadas. Dado que el objetivo principal del proyecto es desarrollar un sistema basado en microcontroladores ESP32, los sensores implementados han sido seleccionados entre aquellos disponibles en el mercado que ofrecen una integración sencilla con el microcontrolador.

En base a lo anteriormente mencionado, el sistema está implementado junto a la tarjeta de desarrollo ESP32-C6 de la familia ESP32. Esta tarjeta es una opción excepcional para el control de sistemas de sensores, así como múltiples aplicaciones domóticas. Al utilizarla como microcontrolador, se beneficia de su procesador de bajo consumo y sus múltiples interfaces y periféricos que facilitan la integración y comunicación eficiente entre los sensores conectados.

3.3.1 Características de los elementos del sistema

DHT11

El sensor DHT11 es un dispositivo de medición de temperatura y humedad ampliamente utilizado en aplicaciones de automatización y domótica. Se caracteriza por su bajo costo, fácil integración y operación con una sola línea de datos. El DHT11 ofrece una precisión de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ para temperatura y $\pm 5\%$ RH para humedad, con un rango de operación de $0\text{-}50^{\circ}\text{C}$ y $20\text{-}90\%$ de humedad relativa. Su tiempo de respuesta es de 1 segundo, lo que permite actualizaciones rápidas de datos ambientales. Además, su bajo consumo de energía y tamaño compacto lo hacen ideal para sistemas embebidos y aplicaciones de Internet de las Cosas.

Figura 7*Módulo sensor DHT11*

Tomado de Módulo Sensor de Temperatura y Humedad DHT11 (s/f)

Tabla 2*Características del sensor de temperatura y humedad DHT11*

Característica	Descripción
Rango temperatura	0 a 50 ± 2 °C
Resolución temperatura	0,1 °C
Rango humedad relativa	20 a 90 ± 5 %
Resolución humedad relativa	1 %
Tensión de alimentación	3 a 5.5 V
Consumo de corriente	100 uA a 2.5 mA
Periodo de muestreo	1 s
Precio	10000 COP

HC-SR501

El sensor HC-SR501 es un módulo de detección de movimiento basado en tecnología infrarroja pasiva (PIR). Detecta la radiación infrarroja emitida por objetos en movimiento dentro de su campo de visión, que abarca hasta 7 metros de distancia y 120° de ángulo de visión. El HC-SR501 opera con una tensión de 5V y consume menos de 50µA en estado de reposo. Incorpora un amplificador, un filtro y un comparador, proporcionando una señal digital de salida. Su sensibilidad y tiempo de retardo son ajustables, lo que lo hace ideal para aplicaciones en sistemas de seguridad, iluminación automática y automatización del hogar.

Figura 8*Módulo sensor HC-SR501*



Tomado de HC-SR501 (s/f)

Tabla 3

Características del sensor infrarrojo de movimiento HC-SR501

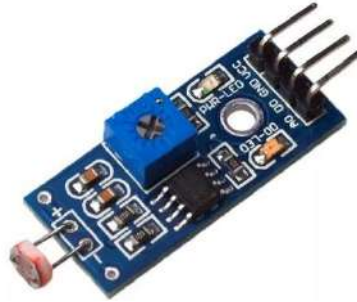
Característica	Descripción
Tensión de alimentación	4.5 a 20 V
Consumo de corriente	50 uA a 65 Ma
Tiempo de demora	5 a 300 s
Distancia de sensado	3 a 7 m
Angulo de sensado	Hasta 120°
Precio	9400 COP

LDR

El módulo LDR (Light Dependent Resistor) es un dispositivo que incorpora una fotorresistencia cuya resistencia varía inversamente con la intensidad de luz incidente. El módulo suele incluir un circuito divisor de voltaje y un amplificador operacional para proporcionar una señal analógica proporcional a la intensidad luminosa. Opera con 3.3V a 5V y ofrece una salida analógica proporcional a la intensidad lumínica, ideal para sistemas de iluminación automática y control de brillo. Su tiempo de respuesta es de aproximadamente 20-30 ms, siendo económico y fácil de integrar en aplicaciones de domótica y electrónica.

Figura 9

Módulo sensor de luz LDR



Tomado de Módulo sensor de luz LDR SENL (s/f)

Tabla 4

Características del módulo sensor de luz LDR

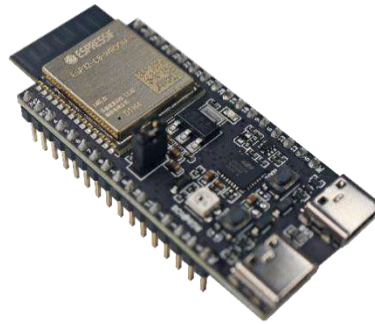
Característica	Descripción
Tensión de alimentación	3.3 a 5 V
Consumo de corriente	0.5 a 15mA
Tiempo de respuesta	20 a 30 ms
Microcontrolador	LM393 (Comparador)
Rango de resistencia	1 M Ω (Oscuridad) a 10k Ω (Luz intensa)
Tensión de salida	0 a 5 V
Sensibilidad espectral	540 nm
Precio	5800 COP

Tarjeta de desarrollo ESP32-C6

Para el desarrollo de este proyecto, se seleccionó la tarjeta ESP32-C6 debido a su enfoque en la domótica y su conectividad mejorada. A diferencia de otras tarjetas similares disponibles en el mercado, la ESP32-C6 ofrece mejoras significativas en conectividad inalámbrica y eficiencia energética, lo que la hace ideal para aplicaciones avanzadas de IoT y domótica, cumpliendo con los requisitos de rendimiento y compatibilidad necesarios para el desarrollo de este proyecto.

Figura 10

Módulo ESP32-C6



Tomado de ESP32-C6-DevKitC-1 v1.1 (s/f).

Tabla 5

Características del módulo de desarrollo ESP32-C6-WROOM-1

Característica	Descripción
Procesador	32 bits RISC-V de un núcleo
Frecuencia de reloj	Hasta 160 MHz
Memoria	512 KB SRAM, 320 KB ROM, 8MB memoria Flash
GPIO	23 pines
Voltaje de operación	3.3 a 3.6 V
Periféricos	SPI, UART, I2C, RMT, PWM, USB, JTAG, ADC
Precio	36634.50 COP (9 dólares)

Nota: precio del TRM dólar día 09/08/2024 1 dólar – 4070.50 pesos colombianos.

3.3.2 Implementación y configuración del sistema de sensores

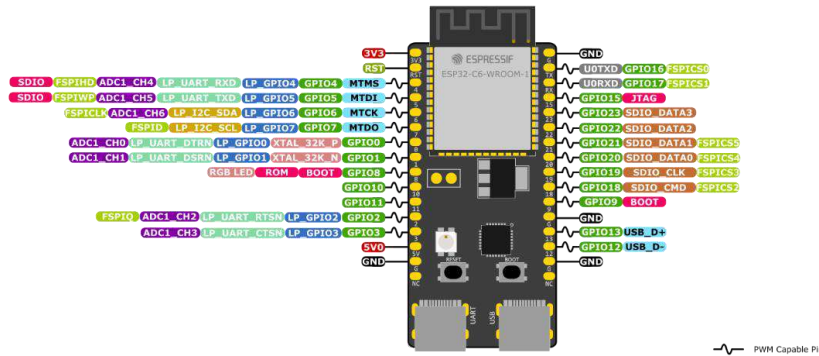
Durante la implementación del sistema, se tuvo en cuenta la disposición de los pines del módulo ESP32C6 y su funcionalidad respecto a los periféricos. Se seleccionaron los puertos con menos periféricos configurados para evitar obstruir otras funciones potenciales del módulo ESP32C6, asegurando así una integración eficiente y sin interferencias.

Teniendo esto en cuenta, los módulos HC-SR501 Y DHT11 fueron conectados a los pines 10 y 11 respectivamente mientras que el módulo LDR fue conectado al pin 0 debido a que este sensor cuenta con la posibilidad de entregar lecturas mediante señales análogas convertidas mediante el periférico ADC (Conversor Análogo a Digital) y digitales mediante el microcontrolador LM393 integrado en el módulo.

Figura 11

Configuración de pines del módulo ESP32-C6

ESP32-C6-DevKitC-1

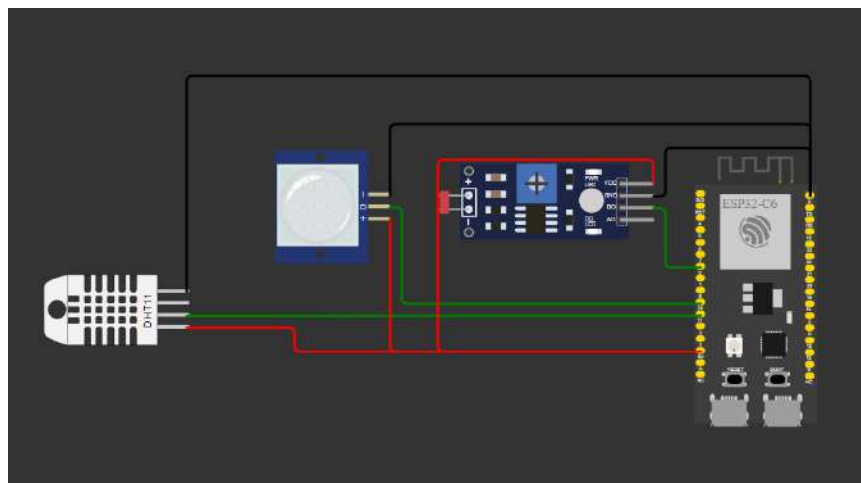


Tomado de ESP32-C6-DevKitC-1 v1.2 - Esp-dev-kits Latest Documentation (s/f).

Se presenta en la Figura 12, el diagrama de conexiones detallada de la tarjeta ESP32C6 y los sensores del sistema.

Figura 12

Diagrama de conexiones del sistema



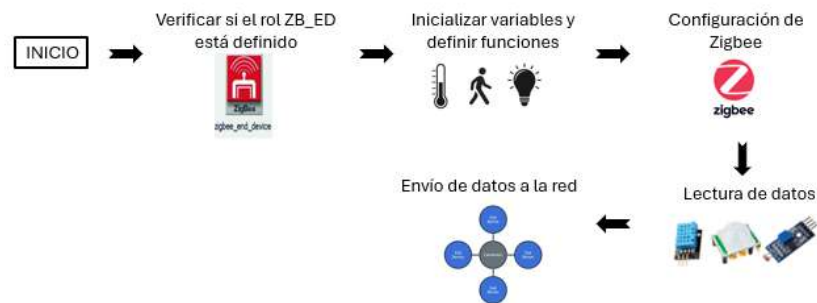
Nota. El circuito presentado corresponde al diagrama de conexiones realizado en simulación del sistema. Esta simulación fue realizada en el simulador de proyectos Wokwi. <https://wokwi.com/>

Una vez completado el montaje de las conexiones del módulo, se utilizó ESP-IDF junto con el kit de desarrollo de software ESP-Zigbee-SDK para la configuración de firmware del sistema. La elección de estas dos herramientas se debe a la facilidad de acceso a las funcionalidades del hardware del dispositivo mediante la API de Zigbee Cluster Library, permitiendo así la creación de aplicaciones basadas en el protocolo Zigbee y la implementación de soluciones domóticas en microcontroladores de la familia ESP32.

El algoritmo para el funcionamiento del módulo se subdivide en 3 partes, la toma de datos con los sensores, la configuración del protocolo Zigbee y el registro y envío de datos para ser visualizados en la plataforma de Home Assistant gracias a la red creada. En el diagrama de la Figura 13 se puede observar a detalle un diagrama de flujo simplificado del código, sin embargo, el código del sistema se encuentra disponible en su totalidad en el Apéndice C .

Figura 13

Diagrama de flujo simplificado del funcionamiento del sistema de sensores.



En primer lugar, se realiza la verificación del rol del dispositivo configurado para la red Zigbee para posteriormente inicializar y configurar los sensores DHT11, PIR y LDR, responsables de medir la temperatura, humedad, detección de movimiento y nivel de luz ambiental. La configuración Zigbee coordina la inicialización, registro, y la comunicación entre el módulo diseñado como nodo y el coordinador Zigbee. Dentro de la función “esp_zb_task”, siguiendo las especificaciones del *Zigbee Cluster Library (ZCL)*, se configura el *endpoint* Zigbee y se crea el perfil de aplicación del dispositivo. Además, se crean y configuran las listas de clústeres específicos para cada una de las variables de los sensores y adicionan los atributos de cada una de estas.

Los datos de estos sensores se procesan mediante tareas independientes que gradualmente (6 mediciones por hora) actualizan las variables de temperatura, humedad y nivel de luz. La variable de detección de movimiento, sin embargo, al considerarse crítico el instante en que ocurre un cambio se busca realizar la medición lo más pronto posible manteniendo la precisión del evento y tomando en consideración el periodo de bloqueo de nueva medición que presenta el sensor.

Por último, los atributos de cada uno de los clústeres almacenan las variables capturadas por los sensores y son enviados a Home Assistant para la visualización de estos datos en el integrador.

3.3.3 Montaje e integración en Home Assistant

Concluido el proceso de configuración del firmware del módulo de sensores, se procede a la configuración de la red Zigbee para el envío y visualización de datos en el sistema de automatización del hogar a través de este protocolo. Para ello fue seleccionado Zigbee Home Automation (ZHA), el cual es una integración nativa en Home Assistant que permite la administración de dispositivos Zigbee. ZHA maneja la comunicación entre el coordinador y los dispositivos que conforman la red, permitiendo que los datos de estos dispositivos se integren en el software. Es requerido tener en cuenta la estructura de la red establecida para el sistema y la inclusión de un coordinador Zigbee compatible con el integrador doméstico.

Tomando como referencia la documentación oficial de Home Assistant para la elección del coordinador fue seleccionado el dispositivo SONOFF Zigbee Dongle-E, el cual viene previamente configurado con el firmware de coordinador Zigbee Basado en EmberZNet 6.10.3 (Zhang, 2022) y es compatible con Zigbee 3.0 garantizando interoperabilidad con una amplia gama de dispositivos incluyendo el módulo de sensores basado en el microcontrolador ESP32C6 y plataformas de automatización e integración doméstica como Home Assistant.

Tabla 6

Características del coordinador SONOFF Zigbee Dongle-E

Característica	Descripción
Chip	Silicon Labs EFR32MG21
Capacidad de transmisión	20dBm
Zigbee	3.0 (IEEE 802.15.4)
Frecuencia de operación	2.4 GHz
Alcance	Hasta 100m
Encriptación	AES-128
Tensión de Alimentación	5V 100mA
Dispositivos finales	Hasta 32 dispositivos directos
Compatibilidad	Linux, Windows, Raspbian, Mac
Precio	99800 COP

Figura 14

Módulo Zigbee Dongle-E



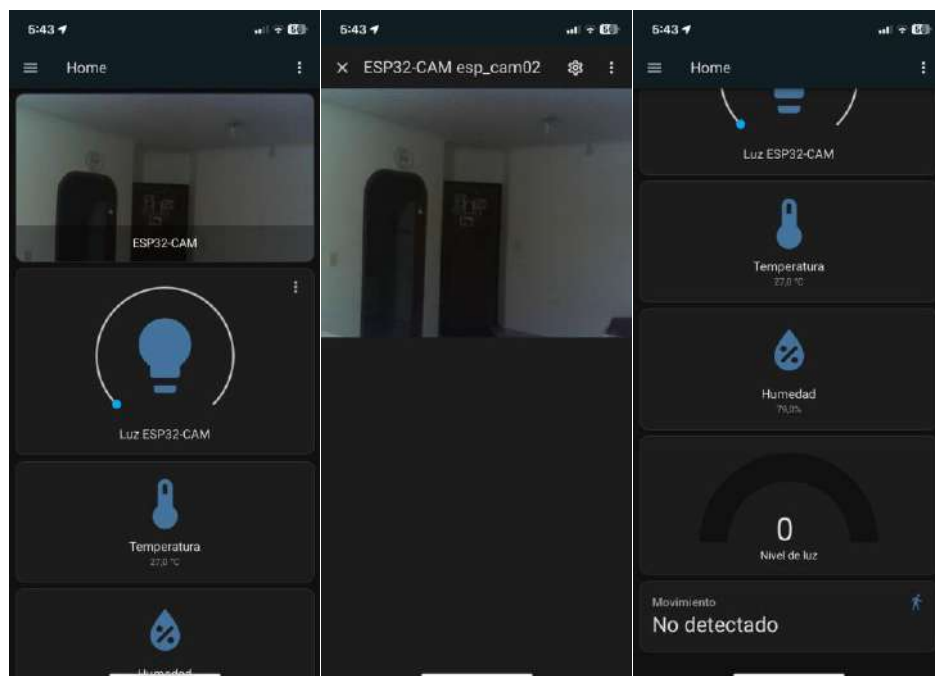
Tomado de Concentrador Zigbee para HA - Sonoff Colombia (2024, 15 junio).

Una vez seleccionado, Home Assistant es capaz de reconocer el coordinador y configurar la integración de ZHA de manera inmediata al conectar el dispositivo al servidor. Al inicializar el módulo de sensores la integración permite añadir dispositivos Zigbee en la configuración del coordinador mediante el modo emparejamiento cómo es posible observar en el Apéndice D y una vez terminado el proceso, el dispositivo final Zigbee aparece en Home Assistant junto a los clústeres de datos y las respectivas variables capturadas por los sensores.

Mediante la aplicación móvil que ofrece Home Assistant es posible acceder a una interfaz intuitiva y centralizada que facilita el acceso a la información en tiempo real, optimizando la seguridad y el control del hogar alineándose con lo planteado en los objetivos específicos del proyecto. Esta funcionalidad brindada por el integrador domótico es especialmente ventajosa ya que nos proporciona una solución personalizable y escalable, mejorando la experiencia del usuario en cuanto a la visualización y acceso al sistema domótico.

Figura 15

Visualización de datos capturados por el módulo de sensores en Home Assistant



4. Pruebas experimentales

Durante el proceso de pruebas experimentales del prototipo, fueron propuestos métodos de evaluación enfocados en el rendimiento de las redes inalámbricas creadas, específicamente tanto para la red Wifi como para la red Zigbee de sensores. Estos métodos tienen como objetivo la recolección y el análisis de diferentes parámetros críticos que afectan el rendimiento de la red y permitirán obtener una comprensión preliminar del comportamiento de este tipo de redes inalámbricas en entornos domóticos.

4.1 Caracterización de los parámetros de red

Dentro del sistema, los componentes seleccionados presentan características que resultan relevantes dentro de los estudios y evaluación de rendimiento de las redes que conforman dicho sistema. A continuación, se realiza una caracterización de diferentes parámetros dentro de las redes correspondientes tanto a los dispositivos Zigbee utilizados (Coordinador y ESP32C6) y la ESP32-CAM dentro de la red Wifi.

Tabla 7

Caracterización de parámetros de red del dispositivo ESP32-CAM

Dispositivo	Parámetro	Caracterización
ESP32-CAM	Rango de frecuencia	2412 a 2484 MHz 17 ±2 dBm en el estándar 802.11b

Potencia de transmisión	14 ±2 dBm en el estándar 802.11g 13 ±2 dBm en el estándar 802.11n
Throughput	11 Mbps en el estándar 802.11b 54 Mbps en el estándar 802.11g 600 Mbps en el estándar 802.11n
Sensibilidad de recepción	-90 dBm a 1 Mbps -88 dBm a 6 Mbps -85 dBm a 11 Mbps -70 dBm a 54 Mbps -67 dBm a >72 Mbps
Tipo de modulación	CCK y BPSK en el estándar 802.11b 64-QAM en el estándar 802.11 g/n
Antena integrada	2 dBi de ganancia

Tabla 8

Caracterización de parámetros de red del dispositivo ESP32C6

Dispositivo	Parámetro	Caracterización
ESP32C6	Rango de frecuencia	2405 a 2480 MHz
	Throughput	250 kbps
	Modulación	OQPSK
	Potencia de transmisión	20 dBm
	Sensibilidad de recepción	-104 dBm
	Identificador de dirección	16 bits
	Consumo de corriente (a 3.3V)	305 mA (max) 28 mA 1 uA (min)

Nota. Zigbee 3.0 soporta hasta 16 canales de 5 MHz de ancho de banda del canal 11 al 26 en el espectro.

4.2 Parámetros y métodos de evaluación

Para la evaluación del rendimiento de la red Wifi, se han determinado los siguientes parámetros clave, que permitirán realizar una comparativa con los valores esperados, según el estándar, dentro de la vivienda:

- **Latencia:** Tiempo que tarda un paquete en viajar desde el origen hasta el destino.

- **Intensidad de señal:** Medida de la potencia de la señal recibida (RSSI) en diferentes áreas de la vivienda.
- **Throughput:** La cantidad de datos que se pueden transmitir a través de la red en un período específico.

Evaluar estos aspectos asegura que la red Wifi pueda soportar de manera efectiva la monitorización en tiempo real, proporcionando una solución fiable para la recolección y transmisión de datos en tiempo real dentro de un entorno domótico.

Los datos correspondientes a cada parámetro son obtenidos mediante las pruebas seleccionadas para esta red:

- **Pruebas de Movilidad:** Consiste en mover el dispositivo ESP32-CAM a diferentes áreas dentro de la vivienda para medir la cobertura y evaluar el desempeño de los parámetros en distintos lugares, teniendo en cuenta los obstáculos y la distancia entre la cámara y el *Access Point* (router del hogar).
- **Pruebas de alta carga:** Consiste en la generación de tráfico y la medición del rendimiento bajo condiciones de alta carga. Esto implica conectar la mayor cantidad de dispositivos posibles, asignándoles diferentes direcciones, y maximizar el consumo del ancho de banda generando tráfico intensivo en la red. La mencionada prueba se realiza en cuanto a la ubicación determinada en la implementación del nodo de monitorización de la ESP32-CAM, ya que este punto crítico de vigilancia es el esperado en un despliegue del prototipo.

Por otro lado, la evaluación del rendimiento de la red inalámbrica de sensores basada en el estándar IEEE 802.15.4 se fundamenta en el análisis de varios parámetros seleccionados específicamente para la topología y el tipo de red Zigbee utilizada en un entorno domótico. Los parámetros incluyen:

- **Calidad del enlace:** es una indicación de la calidad de los paquetes de datos recibidos por el receptor y el coordinador.
- **Intensidad de Señal (RSSI):** La intensidad de la señal Zigbee en diferentes ubicaciones dentro del entorno de prueba.
- **Consumo Energético:** La eficiencia en el uso de energía de los dispositivos de la red Zigbee, crucial para la longevidad de los sensores alimentados.

Estos parámetros son fundamentales para garantizar que la red Zigbee de sensores opere de manera eficiente y confiable, facilitando una recolección de datos precisa y continua, esencial para las aplicaciones domóticas.

Para obtener estos parámetros se realizan pruebas experimentales detalladas que incluyen:

- **Mediciones de campo:** Los cuales consisten en registrar los parámetros bajo diferentes condiciones de distancia y obstáculos entre el dispositivo final basado en ESP32C6 y el coordinador. Esto implica mover los dispositivos a diferentes ubicaciones dentro del entorno de prueba para medir la intensidad de la señal y la calidad del enlace, así como evaluar el rendimiento en presencia de interferencias físicas y electromagnéticas.
- **Pruebas de carga:** Generar tráfico de datos continuo entre los dispositivos finales y el coordinador para evaluar la capacidad de la red bajo condiciones de alta carga. Esto incluye el monitoreo del consumo energético durante la transmisión de datos para determinar la eficiencia y la durabilidad de los sensores.

Cada una de las pruebas busca identificar las capacidades y limitaciones de ambas redes, proporcionando una comprensión integral del comportamiento del sistema en un entorno domótico real. Adicionalmente, permite realizar una comparativa entre los valores esperados de la red y los valores obtenidos en las diferentes pruebas experimentales.

4.3 Detalles de las pruebas experimentales

Para la evaluación del rendimiento de la red WiFi, se utilizan herramientas avanzadas de captura y análisis de tráfico, como Wireshark. Este robusto analizador de protocolos permite capturar y visualizar en tiempo real los datos que fluyen a través de la red, proporcionando un análisis exhaustivo de los paquetes intercambiados entre dispositivos. Esta capacidad resulta fundamental para el diagnóstico y optimización tanto de redes cableadas como inalámbricas. En las pruebas experimentales, Wireshark se emplea para capturar paquetes, brindando información precisa y en tiempo real sobre parámetros críticos como latencia y la tasa de transferencia de datos entre el nodo de transmisión, representado por el ESP32-CAM, y el servidor del integrador domótico, donde se visualiza la información.

Durante la prueba de carga del nodo de vigilancia ESP32-CAM se tuvo en cuenta las configuraciones inalámbricas del router respecto al estándar 802.11, como el canal seleccionado el cual consta del canal 3 a lo largo del espectro, el ancho de banda por canal el cual varía entre

20 a 40 MHz, y por último, el estándar manejado entre dispositivos el cual se encuentra configurado para funcionar en un modo de operación el cual permite la interoperabilidad entre los estándares 802.11g y 802.11n además de añadir soporte para dispositivos que manejen exclusivamente estándares como el 802.11a y 802.11b. Esta información es encontrada en la IP por defecto del router.

Adicionalmente, para la medición de la intensidad de la señal, la integración de ESPHome resulta esencial. Esta plataforma permite monitorizar la cobertura de la red WiFi en diferentes áreas de la vivienda. Al iniciar el dispositivo y conectarlo al integrador domótico, se obtiene una visualización detallada de la calidad de la señal, lo que facilita la evaluación del rendimiento de la red en cada ubicación específica. La captura detallada de estos parámetros se presenta en el Apéndice E.

En lo que respecta a la red Zigbee y la obtención de los parámetros correspondientes, es posible supervisar diversos aspectos de la red, como la calidad de la señal, las rutas de enrutamiento y el estado de los dispositivos, a través de la integración ZHA en Home Assistant. Esta integración facilita una captura intuitiva de datos directamente desde el integrador domótico, proporcionando acceso a información diagnóstica crítica.

Con relación a los parámetros eléctricos, se puede emplear un multímetro o un analizador de corriente para medir el consumo energético del dispositivo final durante la transmisión de datos. Esto es posible gracias al diseño del ESP32-C6 y el fácil acceso a los pines del conector J5, que permite medir la corriente consumida por el módulo. Los pasos detallados para la medición de los parámetros de los dispositivos Zigbee se encuentran en el Apéndice F.

5. Resultados

Al analizar los resultados de las pruebas experimentales, se evidencia un comportamiento diferenciado entre las redes WiFi y Zigbee que coexisten en el sistema, proporcionando una visión clara del rendimiento de cada protocolo inalámbrico.

Durante la prueba de carga en el nodo de monitoreo, se observa que ciertos parámetros de la red presentan una relación directa con variables controladas, como la ubicación del dispositivo de vigilancia. Esta ubicación, determinada por la distancia y los obstáculos entre el ESP32-CAM y el servidor dentro del entorno de prueba, influye significativamente en el desempeño de la red, destacando la sensibilidad del sistema a las condiciones del entorno.

Tabla 9

Datos recolectados prueba de carga red Wifi

Ubicación del dispositivo de vigilancia	Latencia [ms AVG]	Intensidad de señal (RSSI) [dBm]	Tasa de transferencia [kbps]
1 metro 0 obstáculos	59	-41	807
3 metros 1 obstáculo	88	-67	871
4 metros 2 obstáculos	80	-63	870
6 metros 0 obstáculos	59	-62	893
6 metros 3 obstáculos	88	-68	617
7 metros 3 obstáculos	143	-88	497

Realizando un análisis de las variables obtenidas se pueden encontrar relaciones respecto al sistema y el protocolo Wifi mostrado en las siguientes gráficas.

Figura 16

Relación entre la ubicación del dispositivo y la intensidad de la señal RSSI.

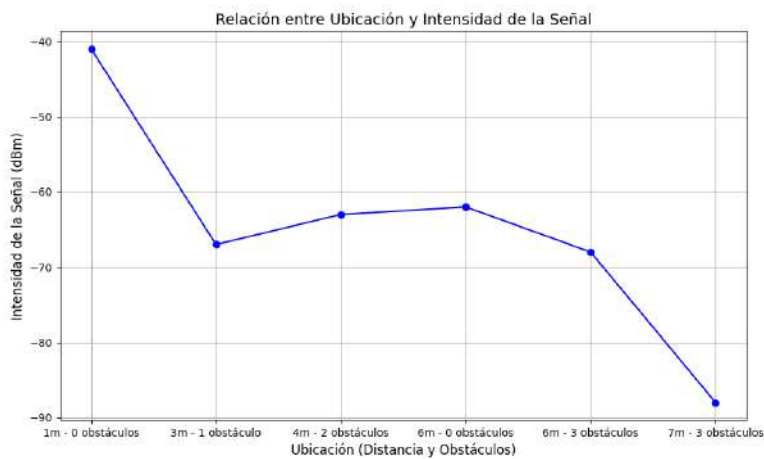


Figura 17

Relación entre ubicación y latencia entre el dispositivo y el servidor del integrador domótico.

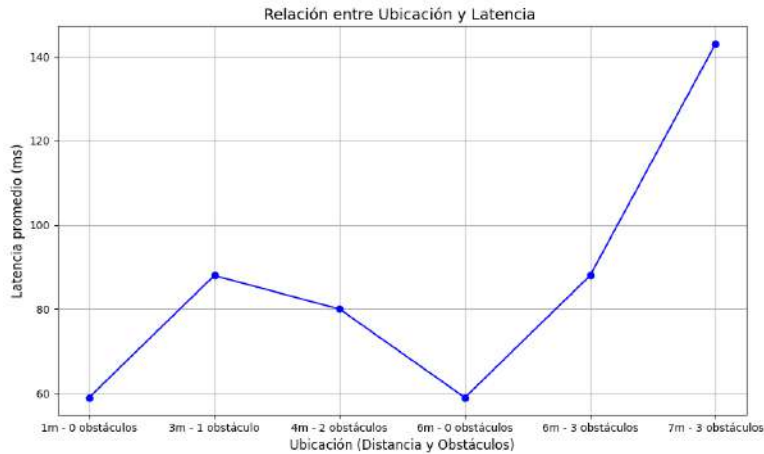
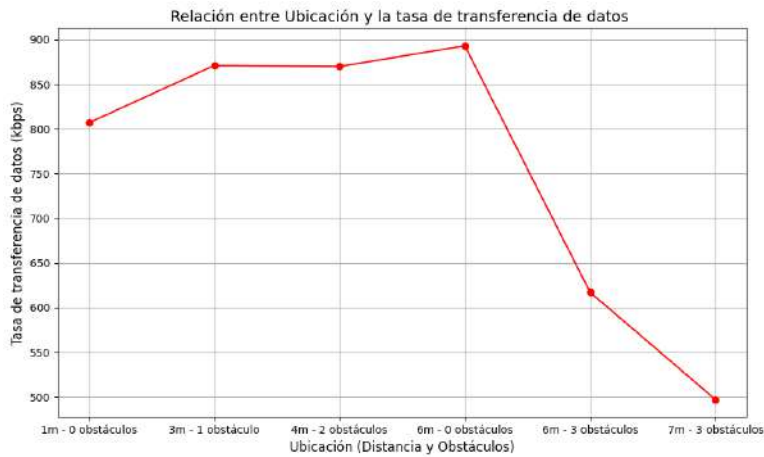


Figura 18

Relación entre ubicación del dispositivo y la tasa de transferencia de datos



Para la prueba de carga, se seleccionó una ubicación de 4 metros y 0 obstáculos respecto al servidor y home router, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 10

Parámetros obtenidos en la prueba de carga del dispositivo ESP32-CAM

No. Dispositivos conectados a la red	Latencia promedio [ms]	Intensidad de la señal RSSI [dBm]	Tasa de transferencia [kbps]
2	60	-52	853
3	80	-60	880
4	60	-58	868
5	46	-58	867
6	77	-60	869

7	48	-59	790
8	21	-60	884
9	44	-60	894
10	65	-60	863

Obtenemos mediante esta prueba de carga las siguientes relaciones graficadas a continuación.

Figura 19

Gráfica relacional entre el número de dispositivos y la latencia entre el nodo de vigilancia y el servidor de Home Assistant.

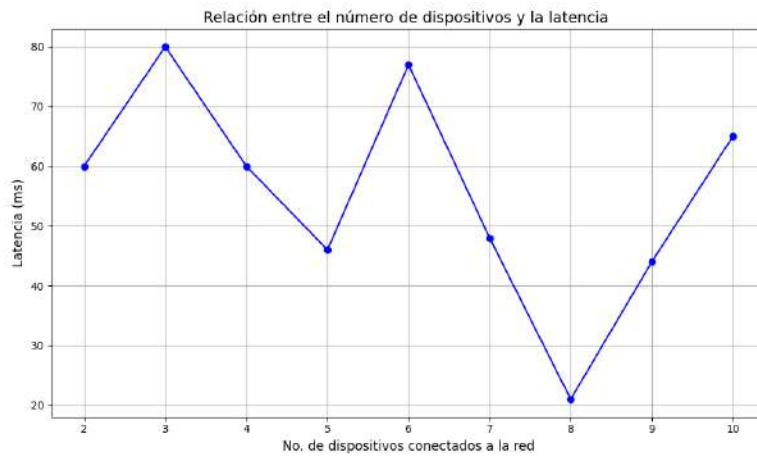


Figura 20

Gráfica relacional entre el número de dispositivos y la intensidad de la señal del módulo ESP32-CAM

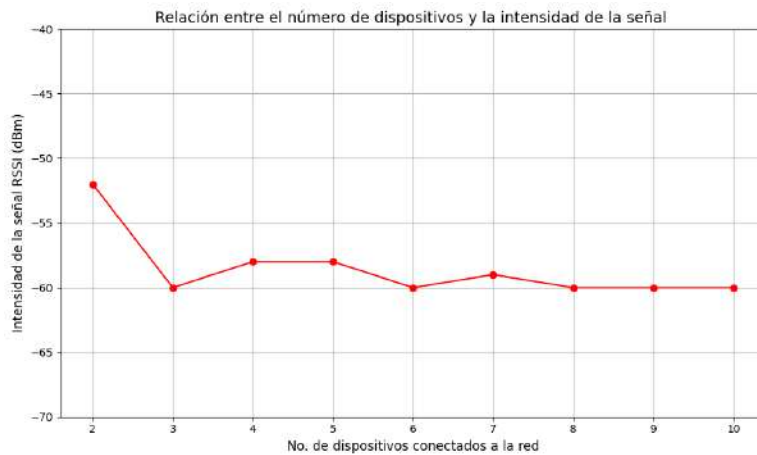
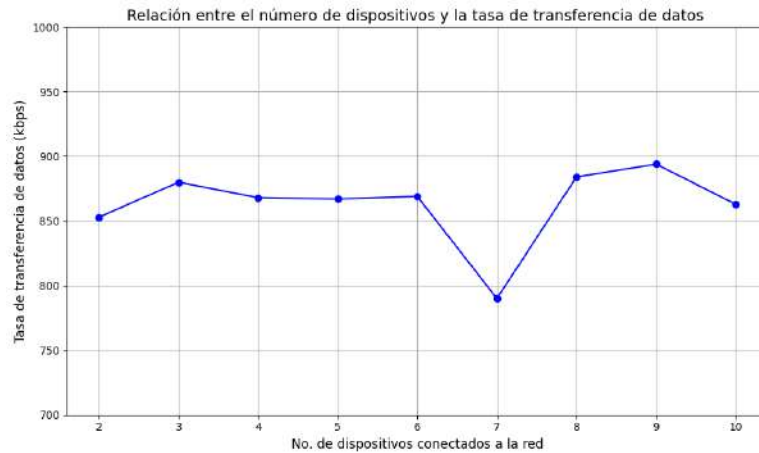


Figura 21

Gráfica relacional entre el número de dispositivos y la tasa de transferencia de datos entre el nodo de vigilancia y el servidor de Home Assistant.



Durante las pruebas de movilidad del dispositivo final conectado a la red Zigbee como módulo de sensores se obtuvieron los siguientes resultados respecto a los parámetros relacionados para la evaluación de este protocolo en el prototipo.

Tabla 11

Parámetros obtenidos en la prueba de movilidad del dispositivo final ESP32-C6

Ubicación (Distancia y obstáculos)	Calidad del enlace	Intensidad de la señal RSSI [dBm]	Consumo energético [Wh]
1 m – 0 obstáculos	196	-25	0.2075
4m – 0 obstáculos	220	-45	0.21
4m – 2 obstáculos	236	-41	0.215
6m – 2 obstáculos	232	-42	0.2075
6m – 3 obstáculos	255	-31	0.21
8m – 5 obstáculos	255	-51	0.21

De esto podemos observar las siguientes relaciones gráficas respecto a la variable controlada y los parámetros de estudio de la red Zigbee en el dispositivo final del prototipo.

Figura 22

Gráfica relacional entre la ubicación del dispositivo final y la intensidad de señal de este

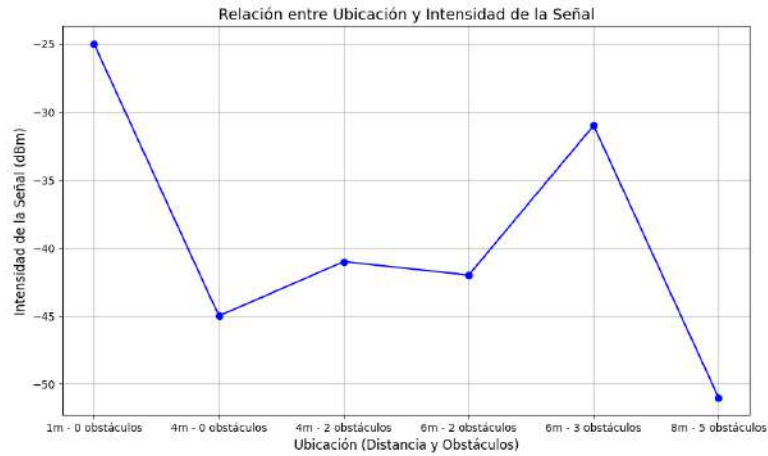


Figura 23

Gráfica relacional entre la ubicación del dispositivo final y la calidad del enlace

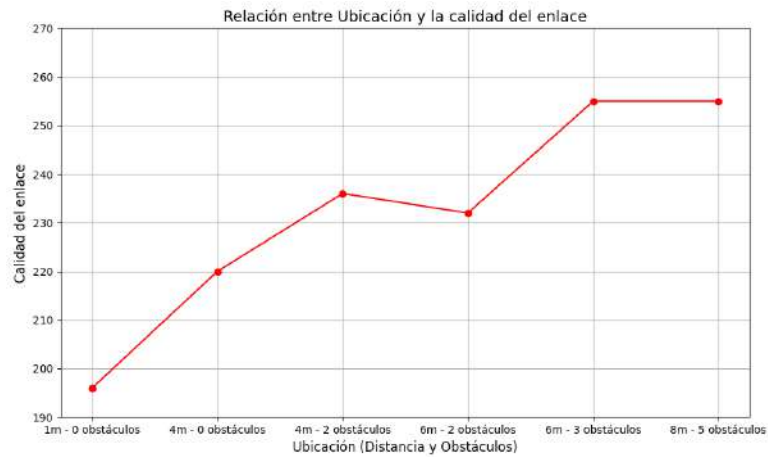
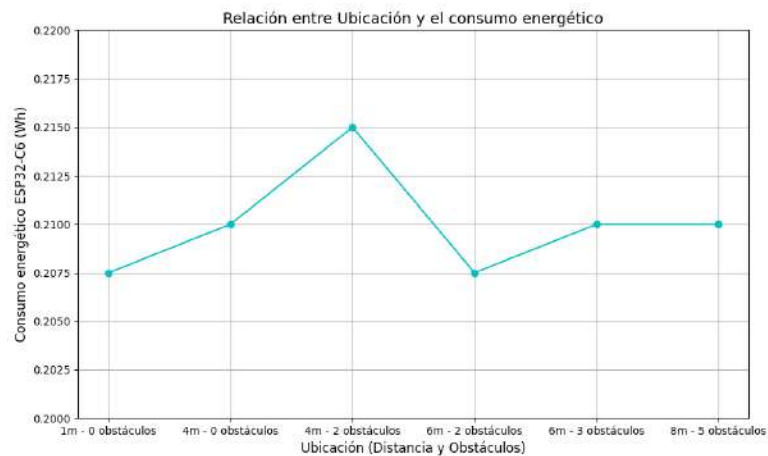


Figura 24

Gráfica relacional entre la ubicación del dispositivo y el consumo energético de este



Para la prueba de carga en la red Zigbee y el dispositivo final se tuvo en cuenta diferente tiempo de envío de datos para simular un tráfico constante de información entre el dispositivo

final y el coordinador para medir los parámetros de la red considerados a estudiar. De esta prueba, se obtuvieron los siguientes resultados y gráficas relacionadas con los datos capturados.

Tabla 12

Parámetros obtenidos en la prueba de carga del dispositivo final ESP32-C6

Tiempo [s]	Calidad del enlace	Intensidad de la señal RSSI [dBm]	Consumo energético [Wh]
900	228	-43	0.21
600	255	-35	0.215
300	252	-37	0.2075
100	255	-38	0.21
60	255	-29	0.21
30	255	-37	0.21
10	255	-28	0.21
5	255	-39	0.21
1	255	-36	0.2075

Figura 25

Gráfica relacional entre el tiempo de envío de datos y la intensidad de la señal

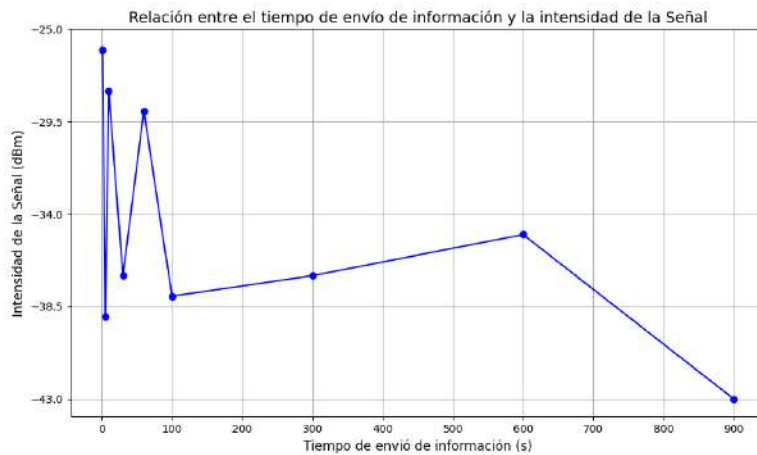


Figura 26

Gráfica relacional entre el tiempo de envío de datos y la calidad del enlace

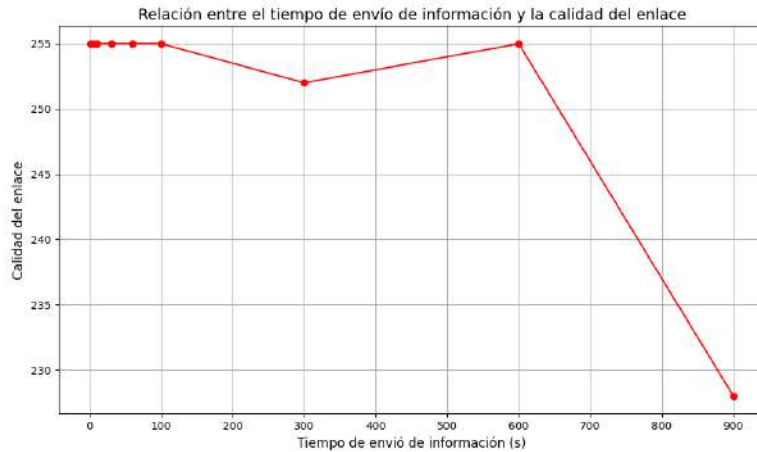
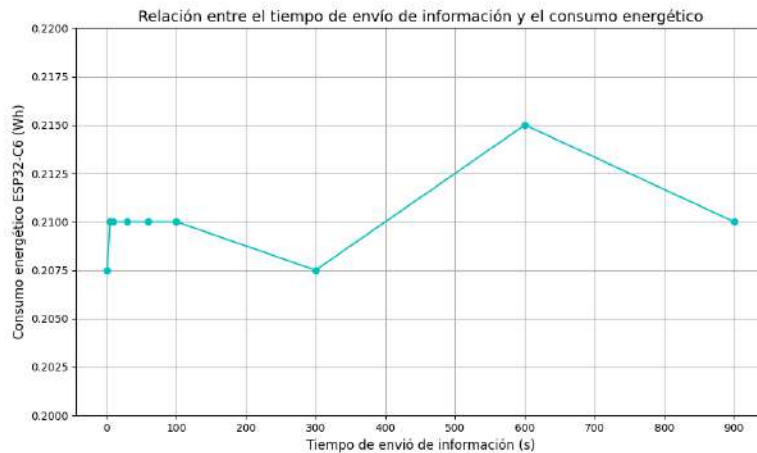


Figura 27

Gráfica relacional entre el tiempo de envío de datos y el consumo energético



6. Conclusiones

En el desarrollo de este proyecto, se han aplicado conocimientos clave para la creación del prototipo base, aprovechando las capacidades de los periféricos y funciones disponibles en los microcontroladores utilizados, así como la integración eficiente de protocolos de comunicación inalámbrica en cada uno de los subsistemas.

La unificación de dispositivos como sensores dentro de un controlador domótico permite crear un sistema cohesivo en el que todos los elementos trabajan de manera integrada, facilitando la centralización del monitoreo y control. Este enfoque no solo mejora la coordinación entre los distintos componentes, sino que también optimiza el uso de recursos, ya que los protocolos inalámbricos empleados, como 802.11 y 802.15.4, permiten una transmisión eficiente de datos, minimizando el consumo energético y manteniendo la fiabilidad de la comunicación bajo la necesidad de monitorear una vivienda de manera efectiva y segura.

En los estudios y pruebas realizados, se observa una relación directa entre la distancia y los obstáculos presentes entre el dispositivo y el punto de conexión. Como se ilustra en la Figura 16, a mayor distancia y presencia de obstáculos entre el nodo de monitorización, basado en el microcontrolador ESP32-CAM, menor es la intensidad de la señal de recepción. Esto se debe a que las señales WiFi, como toda señal de radiofrecuencia, tienden a debilitarse con la distancia debido a la dispersión y la pérdida de energía en el entorno. Además, los obstáculos físicos, como paredes, muebles o cualquier estructura, generan atenuación y absorción de la señal, reduciendo aún más su potencia al dificultar la propagación de las ondas. Esta disminución de la señal afecta directamente el rendimiento del sistema de monitoreo, haciéndolo menos eficiente en zonas más alejadas o con mayores barreras físicas.

La distancia también afecta directamente la latencia en las comunicaciones WiFi. A medida que la distancia entre el dispositivo y el punto de acceso aumenta, las señales tardan más en viajar de un extremo a otro, lo que incrementa el tiempo de respuesta cómo es posible visualizar en la Figura 17. Esta latencia adicional se debe a la mayor cantidad de retransmisiones necesarias para corregir posibles errores en la transmisión, provocados por la atenuación de la señal y la interferencia causada por obstáculos en el entorno.

Los obstáculos físicos que interfieren con la señal no solo provocan una atenuación de esta, sino que también pueden causar reflexiones y dispersión, lo que contribuye a una mayor tasa de errores en la transmisión. Esto lleva a que el sistema deba disminuir la tasa de transmisión de datos para garantizar la integridad de la comunicación, resultando en un *throughput* menor como se puede observar en la Figura 18.

Durante las pruebas de carga, se observa en la Figura 21, que independientemente de la cantidad de dispositivos conectados a la red, la tasa de transferencia que teóricamente debería disminuir se mantiene relativamente constante. Esto se atribuye a que el ancho de banda disponible en la red es adecuado para soportar el número de dispositivos conectados, gracias a los estándares seleccionados en el router (802.11g y 802.11n) y sus respectivos anchos de banda especificados, que oscilan entre 20 MHz y 40 MHz.

Por otra parte, en las pruebas del subsistema Zigbee es posible observar relaciones entre la distancia y los obstáculos entre el dispositivo final y el coordinador y la intensidad de la señal de la conexión. Como es posible observar en la Figura 22, extrapolando los resultados y omitiendo el valor obtenido en la prueba de 6 metros, podemos ver que se tiene una disminución considerable en el RSSI a medida que el dispositivo final se va alejando del coordinador, debido a que la señal de radio se propaga a través del aire, pierde intensidad debido a la atenuación natural y la influencia de obstáculos, como paredes, muebles y otros objetos que pueden reflejar,

o absorber la señal de radio lo que reduce significativamente la fuerza de la señal que llega del dispositivo final al coordinador.

7. Recomendaciones

Debido a las limitaciones de tiempo y recursos que se tuvieron a lo largo del proyecto, no fue posible el desarrollo de circuitos impresos en los cuales puedan integrarse los distintos subsistemas del prototipo, esto puede permitir en un futuro el montaje en lugares especificados con mayor alcance o mejores condiciones de toma de datos.

Además de esto, el sistema puede ser operado de manera autosuficiente mediante una batería que puede integrarse tanto al sistema de monitorización como al sistema de sensores, la cual pueda satisfacer de manera eficiente el consumo energético calculado para, por ejemplo, el sistema de sensores Zigbee.

Gracias a la flexibilidad del prototipo y el propósito de centralización, es posible abordar en un futuro proyecto la integración de mayor cantidad de sensores que permitan la captura de variables indispensables en un entorno domótico como control de calidad de aire, alarmas, cerraduras o identificadores electrónicos para puertas y ventanas.

Además, en futuras pruebas experimentales se podrían añadir más subsistemas de vigilancia en otros puntos de monitorización o más dispositivos finales para evaluar cómo se comportan las redes respecto a estos nuevos nodos.

Referencias Bibliográficas

- Kortuem, G., Kawsar, F., Sundramoorthy, V., & Fitton, D. (2009). Smart objects as building blocks for the Internet of things. *IEEE Internet Computing*, 14(1), 44-51. <https://doi.org/10.1109/mic.2009.143>
- Moreaux, P., Sartor, F., & Vernier, F. (2012). An Effective Approach for Home Services Management. *IEEE Xplore*. <https://doi.org/10.1109/pdp.2012.45>
- Acampora, G., & Loia, V. (2005). Fuzzy Control Interoperability and Scalability for Adaptive Domotic Framework. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 1(2), 97-111. <https://doi.org/10.1109/tii.2005.844431>
- IEEE. (2016). IEEE 802.11™ Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Disponible en: https://standards.ieee.org/standard/802_11-2016.html
- IEEE. (2016). IEEE 802.15.4™ Standard for Low-Rate Wireless Networks. Disponible en: https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2016.html
- Connectivity Standards Alliance (2021). CSA-IOT. Recuperado el 8 de julio de 2024, de <https://csa-iot.org/all-solutions/zigbee/>
- Aldrich, F. K. (2003). Smart Homes: Past, Present and Future. En Harper, R. H. R. (Ed.), *Inside the Smart Home* (pp. 17-39). Springer. https://link.springer.com/chapter/10.1007/1-85233-854-7_2
- Harper, R. H. R. (Ed.). (2003). *Inside the Smart Home*. Springer. <https://doi.org/10.1007/b97527>
- Akhmetzhanov, B. K., Gazizuly, O. A., Nurlan, Z., & Zhakiyev, N. (2022). Integration of a Video Surveillance System into a Smart Home Using the Home Assistant Platform. 2022 International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST). <https://doi.org/10.1109/sist54437.2022.9945718>
- Espressif Systems. (2024). ESP32 Wi-Fi & Bluetooth SOC. <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>
- Modulo ESP32-CAM (s/f). Suconel. Recuperado el 10 de Julio de 2024, de <https://suconel.com/product/modulo-esp32-con-camara-ov2640-wifi-bluetooth-esp32cam/>
- Modulo ESP32-CAM-MB (s/f). Sigma Electrónica. Recuperado el 10 de Julio de 2024, de <https://www.sigmaelectronica.net/producto/esp32-cam-mb/>
- Módulo Sensor de Temperatura y Humedad DHT11 - Electronilab. Recuperado el 11 de Julio de 2024, de

<https://electronilab.co/tienda/modulo-sensor-de-temperatura-y-humedad-dht11/>
 Modulo HC-SR501 - Sigma electrónica. Recuperado el 11 de Julio de 2024 de
<https://www.sigmaelectronica.net/producto/hc-sr501/>
 Modulo sensor de luz LDR SENL – Suconel. Recuperado el 11 de Julio de 2024 de
<https://suconel.com/product/modulo-sensor-de-luz-ldr-senl/>
 ESP32-C6-DevKitC-1 v1.2 – esp-dev-kits documentation (s/f). https://espressif-docs.readthedocs-hosted.com/projects/esp-dev-kits/en/latest/esp32c6/esp32-c6-devkitc-1/user_guide.html
 Configuración de pines del módulo ESP32-C6-DevKitC-1 v1.2 - esp-dev-kits latest documentation. (s. f.). https://espressif-docs.readthedocs-hosted.com/projects/esp-dev-kits/en/latest/_images/esp32-c6-devkitc-1-pin-layout.png
 Zhang, L. (2022, 28 octubre). *SONOFF Zigbee 3.0 USB Dongle Plus-E - SONOFF Official*. SONOFF Official. <https://sonoff.tech/product/gateway-and-sensors/sonoff-zigbee-3-0-usb-dongle-plus-e/>
 Concentrador Zigbee para HA - Sonoff Colombia. Recuperado el 19 de Julio 2024 de
<https://sonoff.com.co/producto/concentrador-zigbee-para-ha/>

Apéndices

Apéndice A

Estructura red WiFi en el software Cisco Packet Tracer. Disponible en la plataforma de Github.
<https://github.com/eddr10/esp32cam-ESPHome/blob/main/Wi-fi%20Trabajo%20de%20graod.pkt>

Apéndice B

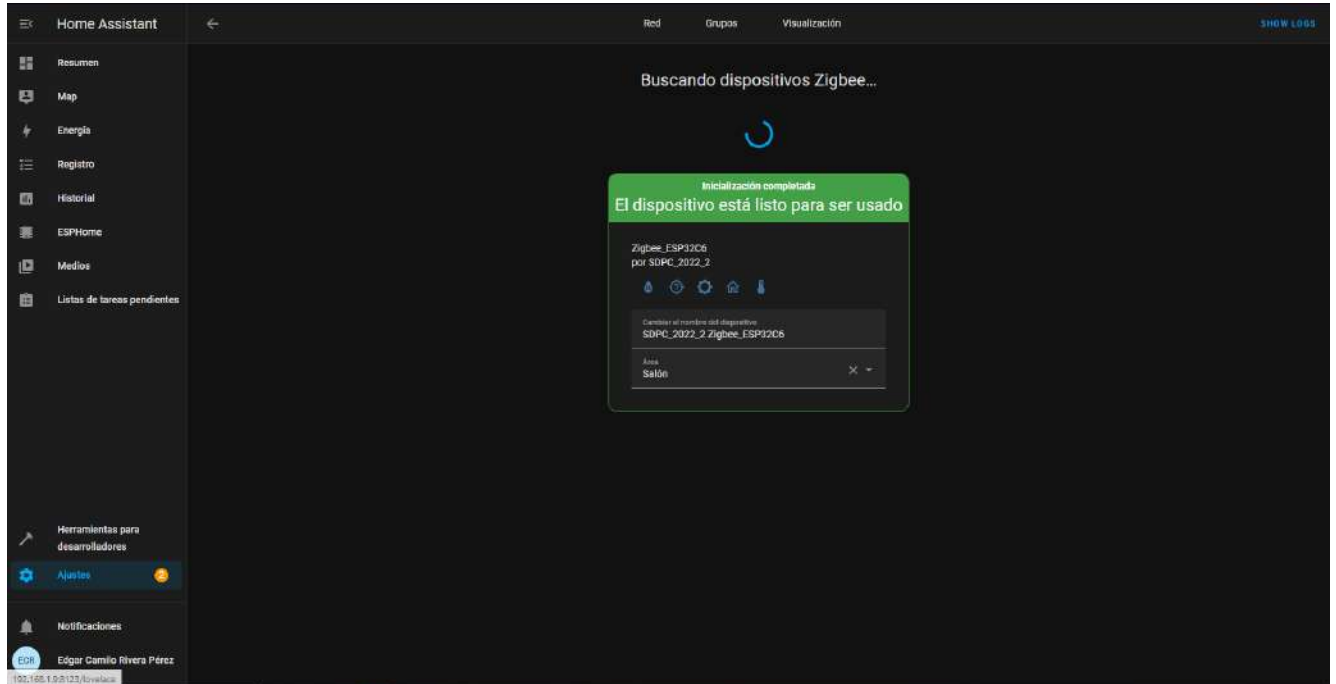
Código del sistema de monitorización. Disponible en la plataforma GitHub.
<https://github.com/eddr10/esp32cam-ESPHome>

Apéndice C

Código del sistema de sensores. Disponible en la plataforma Github.
<https://github.com/eddr10/Zigbee-ESP32c6-EndDevice>

Apéndice D

Detección dispositivos Zigbee en Home Assistant.



Apéndice E

Captura de parámetros de la red Wifi del sistema.

La captura de los parámetros de evaluación en la red WiFi se lleva a cabo en dos fases, empleando herramientas especializadas previamente mencionadas. En la primera fase, se utiliza el complemento ESPHome instalado en el controlador domótico, que proporciona acceso a los registros de inicialización. Estos registros permiten monitorear parámetros clave como la dirección IP asignada al dispositivo ESP32-CAM, la intensidad de la señal (RSSI), el canal de comunicación utilizado, y una vista preliminar de las imágenes capturadas en intervalos específicos de tiempo.

En la segunda fase, para obtener y analizar la tasa de transferencia de datos, se emplea Wireshark, un analizador de paquetes que permite capturar y evaluar el tráfico de red. Mediante el uso de los filtros avanzados del software, se aislaron los paquetes correspondientes a la dirección IP adquirida por el nodo ESP32-CAM, facilitando un análisis detallado del tráfico entre este nodo y el servidor de Home Assistant. A través de las funciones de estadísticas y visualización del flujo TCP en Wireshark, fue posible representar gráficamente la tasa de transferencia de datos promedio durante el periodo de captura.

Finalmente, la medición de la latencia se realiza directamente desde el servidor de Home Assistant, mediante la configuración del Packet Internet Groper (ping), lo que permite evaluar el tiempo de respuesta entre el dispositivo y el servidor de forma precisa.

Apéndice F

Captura de parámetros de la red Zigbee del sistema.

La obtención de los parámetros de la red Zigbee se llevan a cabo utilizando las herramientas de diagnóstico proporcionadas por la integración Zigbee Home Assistant (ZHA), disponible en el controlador domótico. Estas herramientas permiten monitorear en tiempo real la calidad del enlace entre el coordinador y el dispositivo final, así como calcular la intensidad de la señal entre los nodos de la red. Adicionalmente, el consumo energético del dispositivo final se determina midiendo la corriente en el puerto 5 de la tarjeta de desarrollo, siguiendo las especificaciones de la documentación técnica de Espressif, considerando una tensión de alimentación de 5 VDC y un tiempo de captura de 30 minutos para todas las mediciones.

Figura 28

Medición de la corriente consumida por el dispositivo durante la transmisión de datos.



Apéndice G

Video presentación del proyecto

<https://youtu.be/uzTcKL8PZdQ>