



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA

FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES

TRABAJO DE TITULACIÓN

**Implementación de una red de sensores inalámbricos
utilizando tecnología Beacon e IIoT para la localización de
consultorios, salas de espera y servicios médicos en
hospitales**

MODALIDAD:

PROPUESTA TECNOLÓGICA

AUTOR:

BAZAN GONZALEZ OMAR STALYN

CARRERA :

ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

TUTOR:

ING. CARLOS ALBERTO SALDAÑA ENDERICA

LA LIBERTAD – ECUADOR

2026

AGRADECIMIENTO

A Dios, por ser mi guía y fortaleza en cada etapa de este camino. Gracias por brindarme la sabiduría, la perseverancia y la esperanza necesarias para superar cada desafío y hacer posible la culminación de este proyecto.

A mis padres, por su amor incondicional, su apoyo constante y sus valiosos consejos. Gracias por ser el pilar fundamental de mi formación personal y profesional, y por enseñarme que el esfuerzo, la responsabilidad y la dedicación son la base para alcanzar cualquier meta.

A mi hermano, por su compañía, comprensión y por motivarme constantemente a seguir adelante. Su apoyo y confianza fueron fundamentales durante este proceso académico.

A mi novia, por su amor, paciencia y apoyo incondicional a lo largo de esta etapa. Gracias por brindarme ánimo en los momentos de mayor dificultad y por creer en mí incluso cuando el camino parecía más complejo. Tu compañía y motivación fueron una parte importante para alcanzar esta meta.

Omar Bazán González

DEDICATORIA

A mis padres, Ana María González y Juan Bazán, por ser mi mayor ejemplo de amor, sacrificio y perseverancia. Su apoyo incondicional, sus enseñanzas y su fe en mí han sido el pilar fundamental que me ha impulsado a alcanzar cada meta en mi vida.

A mi hermano, por su compañía, comprensión y palabras de aliento que me motivaron a continuar incluso en los momentos más difíciles.

Y a mi novia, Michelle Reyes, por su amor, apoyo incondicional además de su motivación constante. Gracias por estar a mi lado, ayudarme a construir mis sueños y poder acompañarme en este camino.

Omar Bazán González

APROBACIÓN DEL TUTOR

En calidad de tutor de la propuesta tecnológica con título “Implementación de una red de sensores inalámbrica utilizando Beacon y tecnología IIoT para la localización de consultorios, salas de espera y servicios médicos en hospitales”, presentado por el señor egresado Omar Stalyn Bazán González, estudiante de la carrera de Electrónica y Telecomunicaciones, me permito declarar que, luego de haber orientado, analizado y revisado el presente trabajo, este es aprobado en todas sus partes.

Particular que informo para los fines consiguientes.



Firmado electrónicamente por:
**CARLOS ALBERTO
SALDANA ENDERICA**

Ing. Carlos Alberto Saldaña Enderica, MSc.

Docente Tutor

TRIBUNAL DE GRADO



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
**WASHINGTON DANIEL
TORRES GUIN**

Ing. Washington Torres Guin, Mgt.
DECANO DE FACULTAD



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
**JOSE MIGUEL SANCHEZ
AQUINO**

Ing. José Sánchez Aquino, Mgt.
DIRECTOR DE LA CARRERA



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
**LUIS ENRIQUE
CHUQUIMARCA JIMENEZ**

Ing. Luis Chuquimarca Jiménez, Ph.D
DOCENTE DEL ÁREA



Firmado electrónicamente por:
**CARLOS ALBERTO
SALDANA ENDERICA**

Ing. Carlos Saldaña Enderica, Mgt.
DOCENTE TUTOR



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
**MARIA MARGARITA
RIVERA GONZALEZ**

Ab. María Rivera González, Mgt.
SECRETARÍA GENERAL

DECLARACIÓN DEL AUTOR

Omar Stalyn Bazán González, egresado de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, Facultad de Sistemas y Telecomunicaciones, de la carrera de Electrónica y Telecomunicaciones, declaro que la responsabilidad de la investigación realizada en el presente trabajo de titulación recae exclusivamente en mí y el patrimonio intelectual del mismo pertenece a la Universidad Estatal Península de Santa Elena.



Omar Stalyn Bazán González

RESUMEN

El presente proyecto plantea la implementación de una red de sensores inalámbricos basada en tecnología Beacon e IIoT para el monitoreo de variables ambientales y de seguridad en consultorios, salas de espera y servicios médicos dentro de hospitales. El objetivo principal es garantizar una supervisión continua de las condiciones críticas mediante sensores de temperatura, luminosidad y presencia, generando alertas oportunas que permitan prevenir riesgos y mejorar la seguridad del personal y de los pacientes en entornos hospitalarios complejos.

El sistema se fundamenta en la integración de sensores de variables físicas (MQ-2 para detección de gases, DHT22 para temperatura y humedad, PIR para movimiento y LDR para iluminación) conectados a un microcontrolador ESP32, el cual transmite los datos mediante Bluetooth Low Energy (BLE) bajo el estándar IEEE 802.15.1. El ESP32 cumple un rol esencial en el envío de los datos, realizando procesamiento local y actuando como host del sistema y permitiendo comunicación tanto con otros dispositivos como con la Raspberry Pi, que actúa como servidor central para almacenamiento y análisis de información en tiempo real.

En la capa de control industrial se integra un PLC programado conforme al estándar IEC 61131-3, el cual se encarga de la ejecución de acciones críticas tales como la activación de sistemas de ventilación o la generación de alarmas ante la detección de posibles riesgos ambientales, asegurando de esta manera la robustez y confiabilidad en la automatización de los procesos, características que resultan fundamentales dentro de un entorno hospitalario.

La información procesada se visualiza en una Interfaz Hombre-Máquina (HMI) la misma que esta diseñada bajo la normativa ISO 9241, garantizando con ello la facilidad de uso. Esta interfaz centralizada es la que facilita al personal médico y administrativo poder identificar la localización de las variables de consultorios y servicios, así como recibir alertas inmediatas ante emergencias presentadas.

La propuesta combina tecnología Beacon además de los protocolos industriales (Modbus, IEC 61131-3) y estándares de comunicación inalámbrica (IEEE 802.11) para conformar una arquitectura totalmente híbrida entre IoT y sistemas de control industrial, asegurando con ello la eficiencia operativa como seguridad funcional. De esta forma, el proyecto contribuye a la digitalización hospitalaria por medio de una solución escalable a su vez que es energéticamente eficiente, alineada con las tendencias de Industria 4.0 e IIoT aplicadas al sector salud.

Palabras clave: Comunicación inalámbrica, Sensores, IIoT, Beacons, BLE

ABSTRACT

This project proposes the implementation of a wireless sensor network based on Beacon and IIoT technologies for monitoring environmental and safety variables in hospital consulting rooms, waiting areas, and medical services. The main objective is to ensure continuous supervision of critical conditions through sensors for temperature, humidity, gases, and presence, generating timely alerts that help prevent risks and enhance the safety of both staff and patients in complex hospital environments.

The system is based on the integration of different physical sensors, such as the MQ-2 sensor for gas detection, the DHT22 sensor for temperature and humidity, the PIR sensor for motion detection, and the LDR sensor for light measurement. These sensors are connected to an ESP32 microcontroller. The ESP32 sends the collected data using Bluetooth Low Energy (BLE) according to the IEEE 802.15.1 standard. The ESP32 has an important role in Edge Computing because it processes some data locally and allows communication with other devices. It also communicates with a Raspberry Pi, which works as the main server for storing and analyzing the data in real time.

At the industrial control layer, a PLC programmed according to the IEC 61131-3 standard is incorporated, which is responsible for carrying out critical actions such as the activation of ventilation systems or alarm mechanisms in the event of environmental risk detection, thereby ensuring robustness and reliability in the automation of processes, aspects that are considered fundamental within a hospital environment.

The processed information is visualized through a Human-Machine Interface (HMI) designed under the ISO 9241 standard, guaranteeing ergonomics and ease of use. This centralized interface allows medical and administrative staff to identify the location of medical offices and services, as well as to receive immediate alerts in emergency situations.

The proposed solution combines Beacon technology with industrial protocols such as Modbus and IEC 61131-3, as well as wireless communication standards based on IEEE 802.11, in order to establish a hybrid architecture between IoT environments and industrial control systems, which allows ensuring both operational efficiency and functional safety within the system. In this manner, the project contributes to the digitalization of hospital environments by means of a scalable, cost-effective and energy-efficient solution, aligned with Industry 4.0 and IIoT trends applied to the healthcare sector.

Keywords: Wireless Communication, Sensors, IIoT, Beacons, BLE

Índice

1. CAPÍTULO I	3
1.1. Antecedentes	3
1.2. Descripción del Proyecto	4
1.3. Planteamiento del problema	6
1.4. Objetivos del proyecto	7
1.5. Justificación	7
1.6. Alcance	8
1.7. Metodología	10
1.8. Procedimiento metodológico	11
1.9. Resultados Esperados	12
2. CAPÍTULO II	13
2.1. Marco contextual	13
2.2. Marco Conceptual	14
2.2.1. Comunicación Inalámbrica	14
2.2.2. Uso de Wi-Fi en el sistema propuesto	18
2.2.3. Sensores inalámbricos	19
2.2.4. Nodos de Sensores	20
2.2.5. IIoT(Internet Industrial de las Cosas)	21
2.2.6. Beacons	21
2.2.7. Microcontrolador	25
2.2.8. Raspberry PI	26
2.2.9. Controlador Lógico Programable (PLC)	27
2.2.10. Interfaz Hombre-Máquina (HMI)	29
2.3. Marco Teórico	30
3. CAPÍTULO III	32
3.1. Componentes del Proyecto	33
3.1.1. Componentes Lógicos	33
3.1.2. Componentes Físicos	38
3.1.3. Funcionamiento y comportamiento de los sensores inalámbricos .	47
3.1.4. Análisis y Diseño de la Solución	57
3.1.5. Integración de Sensores MQ2, DHT22 y PIR con ESP32 para Implementación del prototipo BEACONS	61
3.1.6. Integración del ESP32 con Home Assistant mediante ESPHome y Bluetooth BLE	63
3.1.7. Implementación del firmware ESPHome en el ESP32	63
3.1.8. Implementación de la comunicación Bluetooth Low Energy (BLE)	64

3.1.9. Integración de Node-RED con MariaDB para el almacenamiento de datos	64
3.1.10. Implementación del PLC y del HMI para la supervisión del sistema	65
4. Resultados	67
4.1. Flujo de transmisión de datos durante la validación del sistema	67
4.1.1. Desempeño de Medición De Datos	69
4.1.2. Validación del sistema	70
4.1.3. Lógica de generación de alarmas	75
4.2. Discusión de resultados	76
4.2.1. Relación de los resultados con los objetivos de la investigación . .	77
4.2.2. Análisis de la arquitectura implementada	77
5. Conclusiones	78
6. Recomendaciones	79
Bibliografía	80
ANEXOS	87
A. CÓDIGO	87
A.1. CIFRADO DE CÓDIGO	87
A.2. Esquema de node-red	88
A.3. Declaración de Variables	88
B. Resultados	89
B.1. Interfaz en el HMI	90

Índice de figuras

1.	Descripción de la propuesta	5
2.	Arquitectura del Sistema	32
3.	Dispositivo ESP32	39
4.	Dispositivo DHT22	42
5.	Dispositivo PIR	44
6.	Dispositivo LDR	46
7.	Diagrama de la Implementación	57
8.	Diagrama de Flujo del Sistema	58
9.	Prototipo de Beacons	59
10.	Conexión de los elementos de Beacon	62
11.	Comunicación entre los ESP32	63
12.	Interfaz del HMI	66
13.	Variables de cada Departamento	66
14.	Transmisión de Datos	68
15.	Visualización de Datos	69
16.	Datos insertado en el Node-red	72
17.	Recepción de datos en Home Assistant	73
18.	Respuesta de Beacon de Temperatura	73
19.	Llegada de datos en TIA Portal	74
20.	llegada de Datos en el HMI	74
21.	Esquema de Localización	75
22.	Configuración de nombre y compatibilidad	87
23.	Cifrado de datos	87
24.	Esquema en Node-Red	88
25.	Declaración de variables en TIA Portal	88
26.	Variables de los sensores Home Assistant	89
27.	Gráfica del sensor PIR	89
28.	Gráfica del sensor Temperatura	90
29.	INICIO EN EL HMI	90
30.	Ingreso de clave al usuario	91
31.	Esquema general de Departamentos del Hospital en HMI	91
32.	Gráfica de Localización de las Áreas	92
33.	Variables a medir de cada Área	92
34.	Variables a medir de cada Área	93

Índice de cuadros

1.	Sensores utilizados en el sistema de monitoreo	20
2.	Comparativa técnica de microcontroladores para aplicaciones IoT e industriales[39]	26
3.	Componentes del PLC.[45]	28
4.	Protocolos de comunicación utilizados en el sistema	30
5.	Arquitectura funcional de los componentes lógicos del sistema.	33
6.	Características principales del ESP32.[68]	39
7.	Características técnicas del sensor MQ-2	40
8.	Características técnicas del sensor DHT22	42
9.	Características técnicas del sensor de movimiento PIR	45
10.	Características técnicas del sensor de luz LDR	47
11.	Características técnicas de la Raspberry Pi 4 Model B	50
12.	Características técnicas del PLC Siemens S7-1200	52
13.	Características técnicas del HMI Delta DOP-B03E211	54
14.	Características técnicas de una batería LiPo típica	56
15.	Mapa de variables implementadas durante el desarrollo del sistema.	65
16.	Interpretación técnica del comportamiento de los sensores implementados durante las pruebas funcionales.	70
17.	Resultados obtenidos durante la validación funcional de los sensores implementados en el sistema.	71
18.	Condiciones de funcionamiento implementadas durante las pruebas del sistema.	75

Abreviaturas

ARM: Advanced RISC Machines

BLE: Bluetooth Low Energy

CAN: Controller Area Network

CPS: Cyber-Physical Systems

DHT22: Sensor digital de temperatura y humedad

ESP32: Microcontrolador de 32 bits de Espressif Systems

GATT: Generic Attribute Profile

GPIO: General Purpose Input/Output

HMI: Interfaz Hombre-Máquina

I²C: Inter-Integrated Circuit

IDE: Integrated Development Environment

IEC: International Electrotechnical Commission

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

IIoT: Internet Industrial de las Cosas (Industrial Internet of Things)

IoT: Internet de las Cosas (Internet of Things)

IR: Infrarrojo

ISO: International Organization for Standardization

LD: Ladder Diagram

LDR: Resistencia dependiente de la luz (Light Dependent Resistor)

Li-Fi: Light Fidelity

LoRa: Long Range

LPWAN: Low Power Wide Area Network

MQ-2: Sensor de detección de gases inflamables

NB-IoT: Narrowband Internet of Things

NFC: Near Field Communication

OPC UA: Open Platform Communications Unified Architecture

PIR: Sensor infrarrojo pasivo (Passive Infrared Sensor)

PLC: Controlador Lógico Programable

RDBMS: Relational Database Management System

RF: Radiofrecuencia

RFID: Radio Frequency Identification

SoC: System on Chip

SPI: Serial Peripheral Interface

SQL: Structured Query Language

ST: Structured Text

TCP/IP: Transmission Control Protocol / Internet Protocol

TIA Portal: Totally Integrated Automation Portal

Tx: Potencia de transmisión (Transmission Power)

UART: Universal Asynchronous Receiver–Transmitter

USB: Universal Serial Bus

Wi-Fi: Wireless Fidelity

WSN: Wireless Sensor Network

INTRODUCCIÓN

El avance acelerado de las tecnologías de la información y las comunicaciones ha transformado de manera significativa la gestión de procesos en entornos industriales y hospitalarios, especialmente en lo relacionado con el monitoreo, la seguridad y la automatización [1]. En este sentido, el Internet Industrial de las Cosas (IIoT) surge más que nada como un paradigma el cual integra sensores al igual que dispositivos inteligentes y plataformas de procesamiento para la correcta transmisión y análisis de datos en tiempo real, con ello se logra optimizar la toma de decisiones y mejorar la eficiencia operativa[2]. Paralelamente, tecnologías de comunicación inalámbrica como Bluetooth Low Energy (BLE), Wi-Fi y los sistemas basados en Beacon han abierto nuevas posibilidades para el desarrollo de soluciones de localización pudieron realizar monitoreos ambientales y control distribuido en espacios complejos como los hospitales[3].

Los hospitales modernos enfrentan múltiples desafíos relacionados con la seguridad, también presentan dificultades en la correcta ubicación de consultorios, salas de espera y servicios médicos, así como con la necesidad de poder supervisar continuamente variables ambientales críticas como es el caso de la temperatura o la humedad, ya sea también la presencia de gases y movimiento[4]. Una distribución ineficiente de estos espacios y la ausencia de sistemas de monitoreo integrados pueden generar retrasos en la atención médica, dificultades en la navegación interna y un aumento del riesgo para pacientes y personal médico[5]. Frente a esta problemática, es que resulta indispensable el desarrollo de soluciones tecnológicas las mismas que permitan centralizar la información, generando con ello las alertas oportunas y facilitando a su vez la visualización de datos en tiempo real, de forma que se garantiza un entorno hospitalario más seguro, eficiente y confiable.

En este escenario, la presente tesis propone la implementación de una red de sensores inalámbrica basada en tecnología Beacon e IIoT para la localización y el monitoreo de variables ambientales en consultorios, salas de espera y servicios médicos dentro de un hospital. En el contexto de este trabajo, la localización se entiende como la identificación de áreas previamente definidas mediante nodos Beacon asociados a cada consultorio, sala de espera o servicio médico, permitiendo reconocer el origen de la información generada por los sensores dentro del entorno hospitalario simulado. Por tanto, la propuesta no contempla la estimación continua de coordenadas ni técnicas de posicionamiento en interiores, sino la identificación lógica de las áreas monitoreadas.

La arquitectura del sistema se fundamenta en el uso de microcontroladores ESP32 conectados a sensores de temperatura, humedad, gases, luminosidad y movimiento, los cuales actúan como nodos de adquisición de datos. Estos nodos transmiten la información de forma inalámbrica mediante BLE y Wi-Fi hacia una Raspberry Pi que cumple la función de servidor central encargada del almacenamiento, procesamiento y gestión de los datos en tiempo real[6].

Como parte de la integración industrial, el sistema incorpora un Controlador Lógico

Programable (PLC) programado bajo el estándar IEC 61131-3, responsable de ejecutar acciones críticas de control, como alarmas ante la detección de condiciones de riesgo ambiental. De esta manera, se establece una arquitectura híbrida que combina tecnologías IoT con sistemas de control industrial, permitiendo una arquitectura adecuada para aplicaciones de monitoreo industrial[7]. La información procesada se visualiza a través de una Interfaz Hombre-Máquina (HMI) diseñada bajo los lineamientos de la norma ISO 9241, lo que permite al personal médico y administrativo supervisar las variables del sistema[8].

El desarrollo del proyecto se realiza en un entorno controlado de laboratorio, en el cual se simulan las condiciones operativas de un hospital para validar el funcionamiento de la arquitectura de comunicación inalámbrica propuesta. Durante las pruebas funcionales se verificó la adquisición, transmisión, procesamiento, almacenamiento y visualización de las variables ambientales mediante la integración entre los dispositivos ESP32, Raspberry Pi, PLC, Node-RED y Home Assistant. Este enfoque permitió comprobar la viabilidad técnica de la solución propuesta y su potencial aplicación en escenarios hospitalarios reales sin necesidad de una implementación a gran escala.

La metodología empleada en la investigación combina enfoques diagnósticos además de descriptivos, aplicados y experimentales, pudiendo analizar el problema, se seleccionan los componentes adecuados, considerando el diseño de la arquitectura del sistema e implementar construyendo el prototipo de manera estructurada. Del mismo modo, el marco conceptual y teórico los cuales sustenta el proyecto en principios de comunicación inalámbrica además de redes de sensores, IIoT, tecnología Beacon junto con la automatización industrial, proporcionando una base sólida para poder comprender el funcionamiento y la relevancia de la solución propuesta.

De manera que esta tesis se orienta al diseño, implementación y validación de un sistema de comunicación inalámbrica para el monitoreo de variables ambientales y la identificación de áreas hospitalarias mediante tecnología Beacon, integrando tecnologías IIoT con plataformas de control industrial. La propuesta busca contribuir a la digitalización hospitalaria mediante un prototipo desarrollado y validado en un entorno de laboratorio, orientado a mejorar la supervisión de las condiciones ambientales y la gestión de la información en consultorios, salas de espera y servicios médicos.

1. CAPÍTULO I

1.1. Antecedentes

El desarrollo de sistemas de comunicación inalámbrica para hospitales ha cobrado gran relevancia en los últimos años, impulsado por tecnologías emergentes como Beacon y el Internet Industrial de las Cosas (IIoT). Estos sistemas no solo permiten la integración de sensores y dispositivos de monitoreo, sino que también facilitan la visualización de datos en tiempo real y la generación de alertas tempranas, lo que incrementa la seguridad y la eficiencia en entornos hospitalarios.

Un ejemplo destacado es el proyecto OHIO, el cual fue implementado en el hospital Le Scotte en Siena, Italia, allí se emplearon tecnologías IoT junto con las etiquetas BLE para poder optimizar el mantenimiento de equipos médicos. Esta experiencia es la que demuestra cómo las arquitecturas basadas en sensores pueden mejorar la operatividad hospitalaria al centralizar información crítica para la toma de decisiones acertadas [9].

De manera complementaria, un modelo que integra IoT con conciencia contextual (context-aware) en el Hospital de Clínicas de São Paulo mostró ser una solución eficaz para la gestión de equipos y condiciones médicas en tiempo real, validado mediante entrevistas con personal de salud, lo cual resalta la importancia de la confiabilidad en sistemas de monitoreo hospitalario [10].

De igual forma las propuestas basadas en arquitecturas IoT de tres capas (detección, borde y aplicación) muestran con claridad el valor del procesamiento de datos en el borde (Edge Computing), donde los sensores realizan un preprocesamiento local antes de enviar la información al servidor, esto básicamente mejora la velocidad de respuesta y reduce la congestión en la red de forma dignificativa [11].

En términos de eficiencia de comunicación, tecnologías como el estándar IEEE 802.15.4 y esquemas de beacon dinámicas han demostrado reducir colisiones de manera que se logra optimizar el consumo energético en entornos IIoT, con resultados positivos como ha sido el caso de los hospitales europeos y asiáticos [12]. Estos avances son los que permiten que los sensores transmitan datos críticos pudiendo alertar con mayor confiabilidad sin que tenga un consumo elevado.

Por otro lado, el uso de interfaces HMI ha demostrado mejorar la interacción entre personal médico y sistemas digitales, al permitir la visualización centralizada de datos y alertas en tiempo real. Experiencias en hospitales como Mount Sinai en Nueva York muestran que un diseño ergonómico, apoyado en la norma ISO 9241, facilita la supervisión de múltiples variables clínicas y ambientales, reduciendo la carga administrativa y priorizando la atención directa al paciente [13], [14].

En bajo este escenario que el presente proyecto propone la implementación de una red de sensores inalámbrica la misma que se encuentra basada en tecnología Beacon e IIoT para

el monitoreo continuo de variables físicas (temperatura, humedad, gases y movimiento) en hospitales. La arquitectura se compone de sensores los cuales están conectados a microcontroladores ESP32, estos transmiten la información hacia una Raspberry Pi que actúa como servidor central de almacenamiento y análisis en tiempo real. En la capa de control industrial, un PLC programado bajo el estándar IEC 61131-3 se encarga de ejecutar acciones críticas, como es el caso de la activación de ventilación o alarmas en caso de que se presente un riesgo. Por lo que la información procesada se visualiza en una HMI, donde el personal médico además del personal administrativo puede monitorear los datos y recibir notificaciones de forma inmediata, pudiendo gestionar alertas de manera eficiente.

1.2. Descripción del Proyecto

El presente proyecto tiene como objetivo principal el desarrollo de un sistema de comunicación inalámbrica orientado al monitoreo preciso y eficiente en entornos hospitalarios. Este sistema permite al personal médico y administrativo supervisar en tiempo real las condiciones ambientales y de seguridad dentro de las instalaciones, mediante la visualización centralizada de los datos proporcionados por los sensores. De esta manera, se mejora la capacidad de respuesta ante situaciones de riesgo y se optimiza la seguridad operativa del entorno hospitalario.

El sistema de monitoreo se fundamenta en la implementación de una red de sensores inalámbricos ubicados en puntos estratégicos previamente asociados a consultorios, salas de espera y servicios médicos dentro del entorno hospitalario simulado. Cada nodo basado en tecnología Beacon identifica el área donde se encuentra instalado y adquiere variables críticas como temperatura, gases, presencia de movimiento y niveles de iluminación. Los dispositivos transmiten la información mediante tecnologías de comunicación propias del Internet Industrial de las Cosas (IIoT), permitiendo que la Raspberry Pi, como servidor central, procese, almacene y distribuya los datos para su posterior visualización y supervisión.

En la capa de control, el PLC cumple una función esencial al gestionar la interacción entre los diferentes dispositivos conectados. A partir de los datos recibidos, este dispositivo ejecuta la lógica de control necesaria para el análisis integral de las condiciones ambientales, facilitando la generación de alertas en caso de detectar valores fuera de los rangos establecidos. Esta integración garantiza un sistema robusto y confiable, adecuado para aplicaciones en entornos críticos como hospitales.

A diferencia de otros sistemas que dependen de dispositivos móviles, la propuesta se centra en el uso de HMI como medio principal de visualización y control. Esta interfaz permite al personal del hospital acceder de manera clara y organizada a la información generada por los sensores, facilitando la supervisión de las distintas áreas y la toma de

decisiones en tiempo real. En situaciones de riesgo, como la detección de gases inflamables o variaciones anómalas de temperatura, el sistema genera alertas visuales y sonoras, permitiendo una respuesta inmediata ante posibles incidentes.

El desarrollo del sistema contempla diversas etapas, incluyendo la investigación, el diseño y la simulación en un entorno controlado. Durante la fase de simulación se verificó el correcto funcionamiento de la comunicación inalámbrica, la integración entre los dispositivos, la adquisición de datos y la visualización de la información en tiempo real, la estabilidad de la comunicación inalámbrica, la correcta integración entre los dispositivos y la identificación de las áreas monitoreadas mediante los nodos Beacon. Estos análisis permiten validar el funcionamiento del sistema antes de su posible implementación en un entorno real.

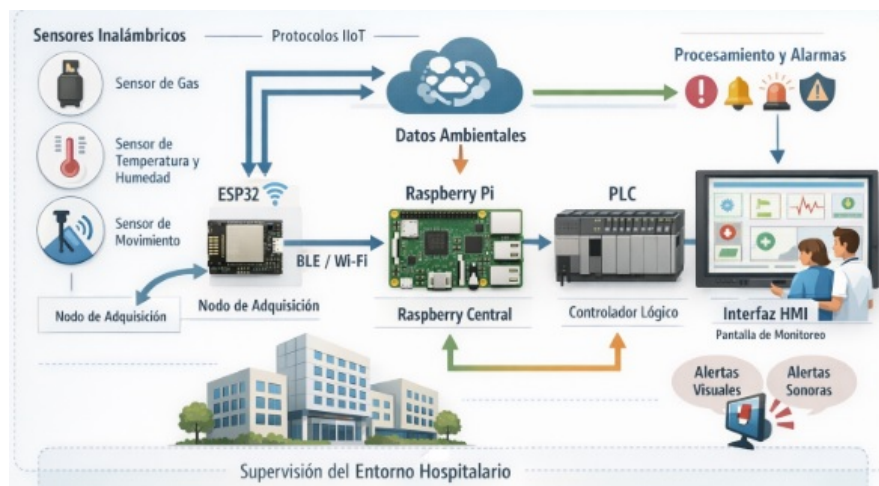


Figura 1: Descripción de la propuesta

1.3. Planteamiento del problema

Los hospitales requieren sistemas que permitan supervisar continuamente las condiciones ambientales presentes en consultorios, salas de espera y servicios médicos, debido a que variables como la temperatura, la humedad, la presencia de gases, la iluminación y el movimiento pueden influir directamente en la seguridad de pacientes, personal médico y equipos hospitalarios. En muchos casos, el monitoreo de estas variables se realiza mediante procedimientos manuales o mediante sistemas independientes que no permiten integrar la información en una plataforma centralizada para su supervisión en tiempo real.

Adicionalmente, la identificación de las áreas donde se originan las mediciones ambientales representa una dificultad cuando no existe un mecanismo que permita asociar automáticamente la información adquirida con el consultorio o servicio correspondiente. Esta situación limita la capacidad del personal para identificar rápidamente el origen de una condición anómala, retrasando la toma de decisiones ante posibles situaciones de riesgo.

Es importante señalar que, en el contexto de la presente investigación, el término *localización* hace referencia a la identificación lógica de las áreas hospitalarias mediante nodos Beacon previamente asociados a cada consultorio, sala de espera o servicio médico. Por tanto, el sistema no implementa técnicas de posicionamiento en interiores ni realiza estimaciones de coordenadas, sino que identifica el origen de los datos adquiridos para facilitar el monitoreo y la generación de alertas.

Si bien existen soluciones basadas en Internet de las Cosas (IoT), Bluetooth Low Energy (BLE) y sistemas de localización en interiores, muchas de ellas requieren infraestructuras complejas, elevados costos de implementación o están orientadas a la estimación de coordenadas mediante técnicas como triangulación, fingerprinting o RSSI. Estas características no se ajustan a los requerimientos del presente trabajo, cuyo propósito consiste en identificar de forma lógica las áreas hospitalarias mediante nodos Beacon asociados a cada consultorio, sala de espera o servicio médico.

En consecuencia, se identifica la necesidad de desarrollar una arquitectura de monitoreo basada en tecnologías IIoT que integre sensores inalámbricos para la adquisición de variables ambientales, nodos Beacon para la identificación de las áreas supervisadas, una plataforma de procesamiento para la gestión de la información y un sistema de visualización industrial que permita generar alertas oportunas y facilitar la supervisión del entorno hospitalario .

Con base en esta problemática, la presente investigación propone el diseño e implementación de una red de sensores inalámbrica basada en tecnología Beacon e IIoT, integrada por microcontroladores ESP32, una Raspberry Pi, un PLC industrial y una interfaz HMI, con el propósito de validar el funcionamiento de una arquitectura de monitoreo ambiental desarrollada en un entorno controlado que simula las condiciones operativas.

1.4. Objetivos del proyecto

Objetivo Principal

Desarrollar un sistema de comunicación inalámbrica basado en IoT para la adquisición, visualización y gestión de alertas de variables ambientales en consultorios, salas de espera y servicios de un hospital.

Objetivos Específicos

- Implementar un sistema de adquisición de datos utilizando microcontroladores ESP32 y sensores para la medición de temperatura, humedad, gases, presencia e iluminación, con el fin de recopilar información de un entorno controlado que simule las condiciones operativas de un hospital.
- Integrar los datos capturados por los sensores en un sistema centralizado compuesto por una Raspberry Pi, un PLC y un HMI industrial, con el propósito de procesar, gestionar y visualizar la información adquirida para apoyar el monitoreo de las áreas hospitalarias.
- Simular diferentes escenarios operativos de un hospital en un entorno de laboratorio, empleando equipos de control industrial, con el propósito de validar el funcionamiento del sistema de monitoreo, la comunicación inalámbrica y la identificación de las áreas supervisadas mediante nodos Beacon.
- Desarrollar una interfaz de usuario en un HMI industrial que permita visualizar en tiempo real las variables ambientales, las alertas generadas y la identificación de las áreas monitoreadas por el sistema.

1.5. Justificación

En los últimos años, la implementación de sistemas de comunicación inalámbrica en entornos hospitalarios en Ecuador ha adquirido una gran relevancia, debido a la necesidad de mejorar la supervisión de variables ambientales y garantizar condiciones seguras dentro de las instalaciones. Diversas investigaciones han evidenciado que, especialmente en zonas rurales, el acceso a la atención médica se ve limitado por factores estructurales y tecnológicos, lo que dificulta la gestión eficiente de los servicios de salud[15].

La Organización Panamericana de la Salud [16] ha señalado que las limitaciones en la infraestructura hospitalaria afectan la capacidad de respuesta ante situaciones de emergencia, lo cual repercute directamente en la calidad de la atención médica. En este contexto, se vuelve fundamental incorporar soluciones tecnológicas que permitan monitorear de manera continua las condiciones del entorno hospitalario, facilitando la toma

de decisiones oportunas y mejorando la seguridad tanto de pacientes como del personal médico.

Además, investigaciones de la Universidad San Francisco de Quito [17] destacan la importancia de optimizar la gestión de los espacios hospitalarios, no solo desde una perspectiva estructural, sino también mediante el uso de tecnologías que permitan supervisar variables críticas del entorno. La incorporación de sistemas de monitoreo contribuye a reducir riesgos asociados a condiciones ambientales inadecuadas, permitiendo una operación más eficiente y segura en áreas sensibles como consultorios y salas de atención.

Ante esta problemática, surge la necesidad de implementar un sistema basado en tecnologías de comunicación inalámbrica, utilizando herramientas como Beacon y el Internet Industrial de las Cosas (IIoT), orientado a la adquisición, transmisión y visualización de datos en tiempo real. Este sistema permite monitorear variables ambientales como temperatura, presencia de gases y movimiento, facilitando la detección temprana de condiciones de riesgo y la generación de alertas oportunas dentro del entorno hospitalario.

El presente proyecto se desarrolla en un entorno de laboratorio simulado que replica condiciones hospitalarias, con el objetivo de validar el funcionamiento del sistema y evaluar su desempeño en la supervisión continua de variables ambientales. Esta propuesta contribuye al fortalecimiento de la infraestructura tecnológica en el sector salud, promoviendo soluciones innovadoras basadas en IIoT que mejoran la seguridad operativa y la gestión eficiente de los entornos asistenciales.

1.6. Alcance

El presente proyecto tiene como alcance el diseño, implementación y validación de un sistema de monitoreo basado en una red de sensores inalámbricos, orientado a la adquisición, transmisión y visualización de variables ambientales en un entorno controlado que simula las condiciones operativas de un hospital. El sistema se fundamenta en el uso de microcontroladores ESP32, sensores para la medición de temperatura, humedad, gases, presencia e iluminación, así como en la integración con dispositivos de control y visualización industrial para el monitoreo de las diferentes áreas hospitalarias. La identificación de consultorios, salas de espera y servicios médicos se realiza mediante la asociación de nodos Beacon a áreas previamente definidas dentro del entorno simulado, sin contemplar técnicas de posicionamiento continuo o estimación de coordenadas.

En la primera etapa del proyecto se desarrolla un sistema de adquisición de datos mediante la configuración de nodos inalámbricos basados en ESP32, encargados de captar variables críticas del entorno. Estos nodos se distribuyen en áreas previamente definidas del hospital simulado, permitiendo identificar cada consultorio, sala de espera o servicio médico asociado a la información adquirida, además de garantizar una transmisión eficiente y confiable de los datos hacia el sistema centralizado conforme a los requerimientos

de aplicaciones IIoT.

Posteriormente, el alcance incluye la integración de tecnologías industriales, donde un PLC se emplea para la recepción y gestión de los datos provenientes de los sensores, permitiendo la ejecución de acciones de monitoreo en función de los parámetros medidos. De manera complementaria, una Raspberry Pi actúa como plataforma de procesamiento y análisis preliminar de la información, facilitando la centralización de los datos y su envío hacia una Interfaz HMI. El HMI se configura para la visualización en tiempo real de las variables monitoreadas, así como para la generación de alertas.

Para finalizar este proyecto va a requerir la simulación de distintos escenarios en un entorno de laboratorio, en el que se desarrollarán varias situaciones representativas del funcionamiento hospitalario. Mediante el uso del PLC, el cual se ajusta automáticamente a las condiciones del sistema en función de los datos recibidos y de los requerimientos experimentales definidos. Los resultados obtenidos por su parte en cada escenario son documentados con el fin de poder evaluar el desempeño del sistema, validando el desempeño del sistema de monitoreo, la comunicación entre dispositivos y la correcta supervisión de las áreas hospitalarias simuladas.

El presente proyecto presenta ciertas limitaciones que deben ser consideradas para la correcta interpretación de sus resultados y su posible implementación en entornos reales:

- En primer lugar, el sistema ha sido desarrollado y validado en un entorno de laboratorio simulado, el cual, aunque replica condiciones básicas de un hospital, no contempla completamente la complejidad de un entorno hospitalario real, donde existen múltiples factores como interferencias electromagnéticas, estructuras físicas complejas y alta densidad de dispositivos conectados que pueden afectar el rendimiento del sistema.
- La identificación de las áreas hospitalarias se realiza mediante la asociación de nodos Beacon con zonas previamente definidas dentro del entorno de laboratorio. En consecuencia, el sistema no implementa algoritmos de posicionamiento en interiores basados en triangulación, fingerprinting o estimación de coordenadas mediante RSSI, por lo que su alcance se limita a la identificación lógica de las áreas monitoreadas.
- Asimismo, la comunicación inalámbrica basada en tecnologías como Bluetooth Low Energy (BLE) y Wi-Fi puede verse afectada por fenómenos como la atenuación de señal, interferencias en la banda de 2.4 GHz y la presencia de obstáculos físicos (paredes, equipos médicos, mobiliario), lo que podría impactar la estabilidad y alcance de la transmisión de datos.
- El sistema se enfoca en la adquisición y visualización de variables ambientales, por lo que no contempla la integración con sistemas hospitalarios reales (HIS,

SCADA hospitalario), lo cual sería necesario para una implementación completa en un entorno clínico operativo.

- Además, el número de sensores implementados es limitado y responde a un escenario de prueba, por lo que no se evalúa el comportamiento del sistema bajo condiciones de alta escalabilidad, como múltiples nodos sensores operando simultáneamente en diferentes áreas del hospital.
- Finalmente, el sistema de alertas desarrollado se basa en umbrales predefinidos, por lo que no incorpora técnicas avanzadas de análisis predictivo o inteligencia artificial que permitan anticipar eventos críticos de manera más sofisticada.

1.7. Metodología

La presente investigación se desarrolló mediante la aplicación de diferentes métodos de investigación que permitieron fundamentar teóricamente el proyecto, diseñar la arquitectura del sistema e implementar la solución propuesta en un entorno controlado de laboratorio. La combinación de estos enfoques permitió cumplir con los objetivos planteados y validar el funcionamiento de la arquitectura de monitoreo basada en tecnologías IIoT. Los métodos empleados fueron los siguientes:

- **Investigación diagnóstica:** Se empleó para analizar el problema de investigación y comprender las necesidades relacionadas con el monitoreo de variables ambientales en entornos hospitalarios. Para ello se realizó la revisión de libros, artículos científicos, normas técnicas y documentación especializada, lo que permitió establecer los fundamentos teóricos y tecnológicos que sustentan el desarrollo del proyecto [18].
- **Investigación descriptiva:** Permitió identificar y describir las características técnicas de los dispositivos utilizados durante la implementación del sistema, tales como los microcontroladores ESP32, los sensores ambientales, la Raspberry Pi, el PLC Siemens S7-1200, el HMI industrial y las plataformas Node-RED, Home Assistant y MariaDB. Este análisis facilitó la selección e integración de cada componente dentro de la arquitectura propuesta [19].
- **Investigación aplicada:** Este enfoque permitió implementar los conocimientos adquiridos durante la investigación en el desarrollo del sistema de monitoreo inalámbrico. La aplicación práctica de tecnologías IIoT, comunicación Bluetooth Low Energy (BLE), Wi-Fi, procesamiento de datos y automatización industrial hizo posible la construcción e integración del prototipo funcional propuesto [20].
- **Investigación experimental:** Se desarrolló mediante pruebas funcionales en un entorno controlado de laboratorio, con el propósito de verificar la correcta adquisición,

transmisión, procesamiento y visualización de las variables ambientales monitoreadas. Durante estas pruebas se comprobó el funcionamiento integral de la arquitectura implementada, incluyendo la comunicación entre los nodos ESP32, el ESP32 Gateway, las Raspberry Pi, el PLC Siemens S7-1200 y el HMI industrial, validando el comportamiento del sistema dentro del alcance definido para la investigación [21].

1.8. Procedimiento metodológico

El desarrollo de la presente investigación se ejecutó mediante una secuencia de actividades que permitió diseñar, implementar y validar la arquitectura propuesta para el monitoreo de variables ambientales en un entorno hospitalario simulado. El procedimiento metodológico se estructuró en las siguientes etapas:

1. Análisis de requerimientos.

Se identificaron las variables ambientales que serían monitoreadas, así como las tecnologías de comunicación, dispositivos electrónicos y plataformas de software necesarias para el desarrollo del sistema. Además, se realizó la revisión bibliográfica de investigaciones relacionadas con redes de sensores inalámbricas, tecnologías IIoT y sistemas Beacon.

2. Diseño de la arquitectura del sistema.

Se diseñó la arquitectura de hardware y software que integra los nodos sensores basados en ESP32, la Raspberry Pi como servidor de procesamiento, Node-RED, Home Assistant, MariaDB, el PLC Siemens S7-1200 y la interfaz HMI, definiendo el flujo de información entre cada uno de sus componentes.

3. Implementación del sistema.

Se desarrolló la programación de los microcontroladores ESP32 para la adquisición de datos provenientes de los sensores ambientales. Posteriormente se configuraron los servicios de procesamiento y almacenamiento de información en la Raspberry Pi, la comunicación mediante Modbus TCP/IP con el PLC y la interfaz HMI para la visualización de las variables monitoreadas.

4. Pruebas funcionales.

Se realizaron pruebas de funcionamiento de manera individual para cada dispositivo y posteriormente pruebas de integración de toda la arquitectura, verificando la correcta adquisición de datos, transmisión de información, almacenamiento en la base de datos y visualización de las variables ambientales en tiempo real.

5. Análisis de resultados.

Finalmente se analizaron los resultados obtenidos durante las pruebas funcionales con el propósito de verificar el cumplimiento de los objetivos de la investigación y validar el funcionamiento de la arquitectura propuesta.

1.9. Resultados Esperados

- Permitir la captura continua y confiable de las variables físicas provenientes de los sensores de movimiento (PIR) y de detección de gases (MQ), simulando condiciones reales de un entorno hospitalario.
- Lograr una integración efectiva entre los dispositivos de campo y la capa de procesamiento, donde los datos transmitidos de manera inalámbrica por los ESP32 sean recibidos correctamente por la Raspberry Pi y posteriormente gestionados por el PLC.
- Verificar que las simulaciones realizadas en el entorno de laboratorio permitan reproducir distintos escenarios operativos, tales como presencia de personas, variaciones ambientales y detección de condiciones anómalas.
- Demostrar la correcta transmisión de los datos entre los dispositivos implementados, así como la generación oportuna de alertas y la adecuada visualización de la información, confirmando el funcionamiento de la arquitectura propuesta.
- Obteniendo con ello una visualización clara a la vez que es intuitiva y en tiempo real de los datos provenientes de la red de sensores inalámbricos.

2. CAPÍTULO II

2.1. Marco contextual

La creciente necesidad de optimizar los flujos internos y garantizar la seguridad en hospitales ha impulsado el desarrollo de tecnologías basadas en el IIoT. Estas tecnologías permiten implementar sistemas avanzados de localización y monitoreo en tiempo real, los cuales facilitan la navegación en espacios complejos y refuerzan la gestión de recursos y la respuesta ante emergencias.

Este proyecto se desarrolla en el entorno controlado del Laboratorio de Electrónica y Automatización de la Universidad Estatal Península de Santa Elena (UPSE), aquí es donde se simularán las condiciones de un hospital para implementar un sistema de localización y monitoreo mediante el uso de tecnologías avanzadas. El sistema está compuesto por una red de sensores de movimiento y gas los cuales se encargan de captar datos relevantes en tiempo real. Los sensores están conectados al ESP32, el mismo que actúa como un nodo de adquisición de datos y utiliza protocolos de comunicación inalámbrica eficientes como Wi-Fi (IEEE 802.11) o Bluetooth (IEEE 802.15.1) para poder enviar la información capturada a la Raspberry Pi.

La Raspberry Pi cumple un rol central como unidad de procesamiento intermedia dentro del sistema, encargándose de recibir los datos transmitidos por los dispositivos ESP32, y así prepararlos para su posterior envío hacia el PLC. La comunicación establecida entre la Raspberry Pi y el PLC se realiza mediante el uso de protocolos industriales, tales como Modbus TCP/IP, lo cual permite garantizar una transferencia de datos robusta, estable y confiable para el correcto funcionamiento del sistema de automatización.

El PLC, como unidad de control principal, analiza los datos recibidos, toma decisiones basadas en los algoritmos previamente configurados y envía las respuestas al HMI. Estas decisiones incluyen la localización de alertas cuando se detecta gases peligrosos.

La interfaz HMI es el componente que permite la interacción entre el sistema y los usuarios, por lo que en ella es que se visualizan el monitoreo de las variables.

Este diseño refleja el uso de estándares tecnológicos modernos las cuales son prácticas recomendadas para una correcta implementación de sistemas de control y monitoreo en entornos críticos. El uso de tecnologías como el ESP32 y Raspberry Pi, en combinación con lo que viene siendo el PLC por lo que asegura un sistema escalable el mismo que resulta ser flexible y preparado en el cual se logra integrar con futuros desarrollos en el ámbito de la automatización industrial además de la monitoreo e identificación de áreas hospitalarias.

Desde una perspectiva educativa, el proyecto permite a los estudiantes de ingeniería adquirir habilidades prácticas en el diseño e implementación de sistemas de comunicación inalámbrica, abordando desafíos como la integración de hardware heterogéneo por lo que

la comunicación entre dispositivos y la optimización de interfaces de usuario. Fomentando con ello el uso de estándares internacionales como IEC 61131-3 para la programación de PLC y protocolos como Modbus y MQTT, promoviendo la comprensión de arquitecturas de control modernas.

2.2. Marco Conceptual

2.2.1. Comunicación Inalámbrica

Es el proceso de transmisión y recepción de información entre dos o más dispositivos sin necesidad de un medio físico conductor, utilizando ondas electromagnéticas como radiofrecuencia (RF), microondas, infrarrojos o señales ópticas[22]. Este tipo de comunicación elimina la dependencia de cables, facilitando la movilidad, la flexibilidad y la escalabilidad en diferentes aplicaciones, desde telecomunicaciones hasta sistemas de control industrial e IoT.

Tipos de comunicación inalámbrica

Existen diferentes tipos de comunicación inalámbrica según su alcance, el tipo de onda y su aplicación[23]:

Corto Alcance:

- **Bluetooth / BLE (Bluetooth Low Energy):**

Es un protocolo de comunicación inalámbrica de corto alcance definido dentro del estándar Bluetooth 4.0 y versiones posteriores, diseñado específicamente para aplicaciones que requieren bajo consumo energético y transmisión eficiente de pequeñas cantidades de datos. A diferencia del Bluetooth clásico, BLE optimiza el uso de energía mediante la reducción del tiempo de actividad del dispositivo, lo que lo convierte en una tecnología adecuada para sistemas de monitoreo continuo basados en sensores.

En el presente proyecto, BLE constituye la base del sistema de adquisición de datos, ya que permite la transmisión periódica de información desde los nodos sensores implementados con ESP32 hacia dispositivos receptores dentro de la red. Su implementación bajo el esquema de tecnología Beacon posibilita la difusión constante de datos sin necesidad de establecer conexiones persistentes, lo cual simplifica la arquitectura del sistema y reduce el consumo energético.

Arquitectura de BLE

La arquitectura de BLE se fundamenta en dos componentes principales: el perfil de acceso genérico (GAP, *Generic Access Profile*) y el perfil de atributos genéricos (GATT, *Generic Attribute Profile*).

El GAP es responsable de la gestión de la visibilidad, conexión y modos de operación de los dispositivos BLE. Define roles como *advertiser* (dispositivo que transmite información) y *scanner* (dispositivo que recibe información). En el contexto del presente proyecto, los nodos ESP32 operan principalmente en modo *advertiser*, difundiendo datos de sensores mediante paquetes de advertising sin establecer conexiones directas.

Por otro lado, el GATT define la estructura de los datos transmitidos a través de BLE. Este modelo se basa en una organización jerárquica compuesta por servicios y características. Un servicio representa una funcionalidad específica (por ejemplo, temperatura), mientras que las características contienen los valores asociados a dicha funcionalidad. Aunque GATT es ampliamente utilizado en comunicaciones BLE conectadas, en aplicaciones Beacon su uso es limitado, priorizando el envío de datos mediante paquetes de difusión.

Modo Beacon y paquetes de advertising

El modo Beacon es una implementación específica de BLE basada en la transmisión periódica de paquetes. Estos paquetes contienen información estructurada que puede incluir identificadores únicos, datos de sensores o información contextual.

En este modo, el dispositivo no requiere establecer una conexión con el receptor, lo que reduce significativamente el consumo de energía y permite que múltiples dispositivos puedan recibir la información simultáneamente. Los paquetes de advertising se transmiten en intervalos configurables y utilizan canales específicos dentro de la banda de 2.4 GHz, lo que mejora la robustez frente a interferencias.

Parámetros de desempeño en BLE

El rendimiento de un sistema basado en BLE depende de diversos parámetros técnicos que influyen en la calidad de la comunicación:

- **RSSI (Received Signal Strength Indicator):** Es un indicador de la intensidad de la señal recibida, expresado en dBm. Permite estimar la calidad del enlace inalámbrico y, en ciertos casos, la proximidad entre dispositivos.

- **Intervalo de advertising:** Define la frecuencia con la que el dispositivo transmite paquetes de datos. Intervalos cortos permiten una mayor actualización de la información, pero incrementan el consumo energético, mientras que intervalos largos optimizan la eficiencia energética.
- **Potencia de transmisión (Tx Power):** Corresponde al nivel de potencia con el que se emiten los datos. Una mayor potencia incrementa el alcance de la señal, pero también el consumo energético.

Estos parámetros deben ser cuidadosamente configurados para lograr un equilibrio entre consumo energético, alcance y confiabilidad de la comunicación.

Ventajas de BLE en sistemas IIoT

BLE presenta múltiples ventajas que justifican su selección como tecnología base en el presente proyecto:

- **Bajo consumo energético:** Permite la operación prolongada de dispositivos alimentados por baterías, lo cual es esencial en redes de sensores distribuidos.
- **Facilidad de implementación:** Su compatibilidad con microcontroladores como el ESP32 simplifica el desarrollo del sistema.
- **Transmisión eficiente:** Optimizado para el envío de pequeñas cantidades de datos, como variables ambientales.
- **Escalabilidad:** Permite la integración de múltiples nodos sensores dentro de una misma red.
- **Aplicabilidad en monitoreo:** Su capacidad para transmitir datos de forma periódica lo hace ideal para sistemas de supervisión continua en entornos hospitalarios.

■ **Wi-Fi (IEEE 802.11):**

Comúnmente conocido como Wi-Fi, es un conjunto de especificaciones que define la comunicación inalámbrica en redes de área local (WLAN) utilizando la banda de frecuencia de 2.4 GHz y 5 GHz. Esta tecnología permite la transmisión de datos a mayores velocidades en comparación con otros protocolos inalámbricos de corto alcance, siendo ampliamente utilizada en aplicaciones donde se requiere conectividad con sistemas centralizados y acceso a servicios en red.

En el presente proyecto, Wi-Fi desempeña un papel fundamental en la transmisión de datos desde los nodos basados en ESP32 hacia la Raspberry Pi, la cual actúa como servidor central de procesamiento y almacenamiento de información. Esta comunicación permite integrar los datos adquiridos por los sensores en plataformas como Node-RED y Home Assistant, facilitando su visualización y análisis en tiempo real.

Funcionamiento Básico de Wi-Fi

El funcionamiento de Wi-Fi se basa en la comunicación entre dispositivos a través de un punto de acceso (Access Point), el cual actúa como intermediario en la red. Los dispositivos clientes, como el ESP32, se conectan a este punto de acceso utilizando protocolos de autenticación y direccionamiento, permitiendo el intercambio de datos mediante paquetes estructurados.

Wi-Fi utiliza técnicas de acceso al medio como CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*), que permiten a múltiples dispositivos compartir el canal de comunicación minimizando las colisiones. Además, incorpora mecanismos de control de errores y retransmisión de paquetes, lo que mejora la confiabilidad de la comunicación.

Capas del modelo OSI involucradas

El estándar IEEE 802.11 opera principalmente en las dos primeras capas del modelo OSI:

- **Capa física (Physical Layer):** Se encarga de la transmisión de señales a través del medio inalámbrico, utilizando modulación y codificación de datos en las bandas de frecuencia asignadas.
- **Capa de enlace de datos (Data Link Layer):** Gestiona el acceso al medio, el direccionamiento MAC y la detección de errores, garantizando una comunicación confiable entre dispositivos dentro de la red.

Adicionalmente, Wi-Fi permite la interacción con protocolos de capas superiores como TCP/IP, que operan en las capas de red y transporte, facilitando la comunicación entre dispositivos distribuidos dentro del sistema.

2.2.2. Uso de Wi-Fi en el sistema propuesto

En la arquitectura desarrollada, el ESP32 actúa como cliente Wi-Fi, transmitiendo los datos adquiridos por los sensores hacia la Raspberry Pi mediante una red inalámbrica local. Esta comunicación permite centralizar la información en el servidor, donde es procesada, almacenada y posteriormente visualizada a través de interfaces como Node-RED, Home Assistant y el HMI industrial.

El uso de Wi-Fi en esta etapa del sistema es clave, ya que permite manejar mayores volúmenes de datos en comparación con BLE, además de facilitar la integración con plataformas de software y bases de datos, lo cual es fundamental en aplicaciones IIoT.

Ventajas de Wi-Fi en sistemas IIoT

La implementación de Wi-Fi dentro del sistema presenta diversas ventajas:

- **Mayor ancho de banda:** Permite la transmisión de grandes volúmenes de datos en menor tiempo, lo cual es ideal para aplicaciones que requieren actualización constante de información.
- **Conectividad con servidores:** Facilita la integración con sistemas centralizados como la Raspberry Pi, permitiendo el procesamiento y almacenamiento de datos en tiempo real.
- **Compatibilidad:** Es ampliamente soportado por dispositivos modernos, lo que simplifica la integración del sistema.
- **Escalabilidad:** Permite la incorporación de múltiples dispositivos dentro de la misma red sin afectar significativamente el rendimiento.
- **NFC (Near Field Communication):** orientado a la comunicación en distancias de pocos centímetros, como es el caso de los pagos electrónicos.

Mediano alcance:

- **Zigbee y Z-Wave:** Protocolos orientados a la domótica e IoT estos tienen muy bajo consumo.
- **LoRa (Long Range):** Esta diseñada para comunicaciones IoT con gran alcance su consumo de igual manera es relativamente bajo.

Largo Alcance:

- **Telefonía móvil (2G, 3G, 4G, 5G):** Empleada en telecomunicaciones a nivel global.
- **Satélite:** Esta es utilizada para cobertura en zonas bastante remotas para las comunicaciones estratégicas.
- **Redes LPWAN:** Como es el caso de Sigfox y NB-IoT, altamente necesarias para IIoT pudiendo monitorear en tiempo real.

Inalámbrica Óptica:

- **Infrarrojo (IR):** Se aplica en controles remotos además de sistemas de corto alcance.
- **Li-Fi (Light Fidelity):** Es una tecnología emergente la cual transmite datos mediante la modulación de lo que viene siendo la luz LED.

La comunicación inalámbrica en los diferentes ámbitos industriales y hospitalarios, adquiere especial relevancia cuando cuando se facilita la interconexión de sensores además de plataformas de control dentro de arquitecturas IIoT (Industrial Internet of Things). Esta integración es la que realmente favorece la optimización de la eficiente, en ella se incrementa los niveles de seguridad y potencia la capacidad de reacción inmediata todo frente a distintos eventos en tiempo real.

Se puede utilizar en ciertos aspectos como :

- **Industria:** Monitoreo y control de procesos mediante IIoT.
- **Hospitales:** Localización en interiores con Beacons, en las que se transmiten datos médicos en tiempo real.
- **Domótica:**Automatización del hogar (Wi-Fi, Zigbee, Z-Wave).
- **Transporte :**Comunicación vehículo a vehículo (V2V) y sistemas de tráfico inteligente.
- **Espacio y defensa:**Satélites, radares y sistemas de comunicación militar.

2.2.3. Sensores inalámbricos

Es un equipo electrónico diseñado para captar magnitudes físicas, químicas o biológicas del ambiente como temperatura, humedad, presión, presencia de gases, movimiento o intensidad lumínica y enviar los datos recolectados sin emplear conexiones cableadas, utilizando para ello diversos protocolos de comunicación inalámbrica como BLE, Wi-Fi, Zigbee, LoRa, Z-Wave o NB-IoT, entre otros.

Características principales

- **Autonomía energética:** Muchos funcionan con baterías de poco consumo o también conocida como energía recolectada (energy harvesting).
- **Movilidad y flexibilidad:** Es lo que permite despliegues rápidos sin necesidad de una infraestructura cableada.
- **Interconexión:** Aquí se logra integrar en redes de sensores inalámbricos (WSN) y arquitecturas IoT/IIoT.
- **Escalabilidad:** admiten la conexión de múltiples nodos pudiendo con ello cubrir zonas muy extensas.
- **Compatibilidad con estándares:** IEEE 802.11 (Wi-Fi), IEEE 802.15.4 (Zigbee), Bluetooth 5.0 (BLE), LoRaWAN, etc.

En un hospital, un sensor inalámbrico el cual se encuentre basado en ESP32 con DHT22 y comunicación BLE puede enviar datos ambientales a una Raspberry Pi central, con ello se logra optimizar la gestión de consultorios por lo que se genera alertas en caso de condiciones riesgosas, un ejemplo de ello es el exceso de temperatura o fuga de gases.

2.2.4. Nodos de Sensores

Un nodo sensor es un dispositivo autónomo que forma parte de una red de sensores inalámbricos, distribuidos geográficamente en un área, que se organizan en red para monitorear condiciones físicas o ambientales y recolectar datos de forma colaborativa[24].

El diseño del sistema optimiza el uso de la batería mediante una limitante de velocidad de transmisión de datos por lo que prioriza del uso del modo sleep o reposo, con el objetivo principal de poder reducir considerablemente el consumo energético durante los períodos de inactividad. De modo, que los nodos del sistema actúan como repetidores o routers, permitiendo el encaminamiento de la información desde puntos distantes hasta el nodo coordinador o gateway, asegurando con ello la correcta propagación de los datos dentro de la red.

Cuadro 1: Sensores utilizados en el sistema de monitoreo

Sensor	Variable	Rango	Uso
MQ-2	Gases	300–10000 ppm	Detección de gases
DHT22	Temp./Humedad	-40 a 80 °C	Monitoreo ambiental
PIR	Movimiento	3–7 m	Detección de presencia
LDR	Luz	1–10000 lux	Medición de iluminación

2.2.5. IIoT(Internet Industrial de las Cosas)

El IIoT se entiende como la incorporación del IoT en escenarios industriales, integrando sensores, actuadores, maquinaria y sistemas de control dentro de redes digitales capaces de recolectar, procesar y evaluar información en tiempo real. Su propósito principal es optimizar la operación de los procesos, incrementar la seguridad, fortalecer la automatización y respaldar la toma de decisiones inteligentes en ámbitos como la manufactura, la energía, la salud, el transporte y la logística[25].

También hace referencia a la convergencia entre los sistemas de computación, las redes de comunicación y los dispositivos físicos industriales, donde equipos inteligentes interconectados permiten captar, supervisar y controlar variables del entorno físico, favoreciendo el avance tecnológico, la optimización de los procesos productivos y la mejora continua en los entornos industriales. Pueden incorporarse varios elementos como: RFID (radio frequency identification), middleware (lógica de intercambio de información entre aplicaciones), Sistemas Ciberfísicos (CPS), Computación en la Nube (cloud computing) y Redes de Sensores Inalámbricos (WSN)[26].

2.2.6. Beacons

Origen y Evolución de la Tecnología Beacon

Los Beacons son dispositivos de comunicación inalámbrica basados en la tecnología Bluetooth Low Energy (BLE), los cuales están diseñados para la transmisión de señales de identificación hacia dispositivos que se encuentran en su proximidad, estando su desarrollo y evolución directamente relacionados con el avance de las tecnologías de comunicación inalámbrica.

Origen

Los Beacons surgieron como una solución orientada a satisfacer la necesidad de comunicación basada en la proximidad, particularmente en aplicaciones de carácter comercial e industrial. En este contexto, la introducción de Bluetooth Low Energy (BLE) en el año 2010, a partir del lanzamiento de la especificación por parte del consorcio Bluetooth SIG como componente de Bluetooth 4.0, permitió el desarrollo de aplicaciones de corto alcance y bajo consumo energético, consolidándose como la base tecnológica sobre la cual se fundamenta el funcionamiento de los Beacons[27].

La primera implementación comercial ocurrió en el año 2013, cuando Apple presentó iBeacon. Este sistema logro integrar hardware y software satisfactoriamente para enviar identificadores únicos que permitían rastrear dispositivos pudiendo ofrecer experiencias basadas en localización en los diversos entornos físicos.

Evolución tecnológica

- **Primera generación (2013-2015):** Los Beacons iniciales funcionaban como dispositivos los cuales eran unidireccionales, se encontraban diseñados para poder emitir señales a intervalos regulares. Su hardware incluía lo que vendría a ser transmisores BLE y fuentes de estas eran de bajo consumo, como baterías de larga duración. Aplicaciones: Se podía realizar la navegación en interiores, a su vez el marketing basado en proximidad y análisis de tráfico en los diferentes espacios físicos.
- **Expansión de estándares (2015):** Google lanzó Eddystone, este es un estándar alternativo a iBeacon. Eddystone introdujo características que era mucho más avanzadas, como soporte multiplataforma, envío de URLs además de la telemetría que servía para poder monitorear el estado de los dispositivos. Esta diversificación fue la que impulsó la adopción de Beacons en diversos sectores[28].
- **Innovaciones recientes (2016-presente):** Integración con IoT: Los Beacons se han convertido en nodos los mismos que son clave dentro del Internet de las Cosas (IoT), dado que interactúa con dispositivos inteligentes para optimizar procesos en fábricas o ya sea hospitales y centros comerciales. Miniaturización: Los avances en semiconductores son los que han facilitado de manera significativo el poder crear Beacons más pequeños, en la que se tiene mayor autonomía y capacidades adicionales como es el caso de los sensores de movimiento y temperatura. Estándares de seguridad: La evolución de protocolos ha incorporado diferentes mecanismos de cifrado en la que se ha podido evitar el uso no autorizado[29].

Estructura básica de los Beacons

La estructura básica de los Beacons incluye varios componentes fundamentales que permiten su funcionamiento en aplicaciones de posicionamiento y comunicación:

Transmisor BLE: Los Beacons están diseñados para transmitir señales a intervalos regulares. Utilizan BLE, una tecnología inalámbrica eficiente en consumo energético que opera en el rango de 2.4 GHz. Este transmisor emite paquetes de datos que contienen información como identificadores únicos y parámetros configurables (potencia de transmisión y frecuencia de anuncios)[30].

Fuente de alimentación: La mayoría de los Beacons son alimentados por baterías de larga duración. La vida útil de la batería está directamente influenciada por la potencia de transmisión (Tx) y el intervalo de anuncios (A). Valores altos de Tx o bajos de A incrementan el consumo de energía[30].

Modos de operación

Los Beacons pueden operar en varios modo:

- Modo de publicidad (Advertising Mode): Emisión regular de paquetes hacia cualquier dispositivo receptor que se encuentre en el área.
- Modo de conexión (Connection Mode): Comunicación uno a uno entre los dispositivos.
- Publicidad periódica (Periodic Advertising Mode): Sincronización continua entre el emisor y receptores específicos, mejorando la estabilidad en entornos ruidosos[31].

Canales publicitarios

BLE hace uso de tres canales primarios, identificados como 37, 38 y 39, los cuales tienen como finalidad reducir las posibles interferencias con otras tecnologías de comunicación inalámbrica, como Wi-Fi, permitiendo el proceso de descubrimiento y la conexión inicial entre dispositivos, lo que contribuye a garantizar una comunicación eficiente en entornos caracterizados por una alta densidad de dispositivos.

Formatos de datos

Los paquetes de datos transmitidos por los Beacons varían según los estándares o protocolos utilizados, como iBeacon de Apple o Eddystone de Google. Estos formatos definen la estructura de los mensajes, lo que permite integrar servicios avanzados como análisis de proximidad, navegación en interiores o monitoreo de condiciones ambientales[32].

Fundamentos físicos de los Beacons

Las señales emitidas por los Beacons siguen varios principios fundamentales de la física, entre los que destacan las siguientes leyes:

Ley de la propagación de ondas electromagnéticas

Esta ley describe cómo la intensidad de una señal disminuye a medida que aumenta la distancia desde el emisor. La intensidad de la señal es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia d entre el emisor y el receptor:

$$P_r \propto \frac{1}{d^2} \quad (1)$$

Esto significa que si la distancia entre el Beacon y el receptor se duplica, la potencia de la señal se reduce a una cuarta parte[33].

Ecuaciones de Maxwell

Las ecuaciones de Maxwell son fundamentales para entender cómo las ondas electromagnéticas se propagan. Estas ecuaciones describen cómo los campos eléctricos y magnéticos interactúan para generar y propagar ondas de radio, como las utilizadas por los Beacons. Las ecuaciones de Maxwell en su forma diferencial son:

- Ley de Gauss para el campo eléctrico:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2)$$

- Ley de Gauss para el campo magnético:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

- Ley de Faraday de la inducción electromagnética:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (4)$$

- Ley de Ampere-Maxwell:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (5)$$

Estas ecuaciones explican cómo los Beacons emiten señales en forma de ondas electromagnéticas y cómo estas se propagan a través del espacio[34].

Ley de la interferencia

Cuando dos ondas electromagnéticas de la misma frecuencia se encuentran, pueden interferir entre sí. Esto puede producir una interferencia constructiva o destructiva, dependiendo de la fase relativa entre las ondas. La ecuación para la interferencia es:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\phi) \quad (6)$$

- I_1 e I_2 son las intensidades de las ondas individuales,
- es la diferencia de fase entre las dos ondas[35].

Ley de Ohm (para señales eléctricas)

La Ley de Ohm describe la relación entre el voltaje (V), la corriente eléctrica (I) y la resistencia (R) dentro del circuito que produce las señales de radiofrecuencia:

$$V = I \cdot R \quad (7)$$

Esta ley es importante porque explica cómo la energía eléctrica se convierte en señales electromagnéticas, las cuales son emitidas por los Beacons [36].

2.2.7. Microcontrolador

Es un dispositivo electrónico que puede realizar operaciones lógicas de manera autónoma, las acciones que ejecuta son programadas por el usuario en lenguaje ensamblador y cargadas en el equipo mediante un programador. En pocas palabras, permite ejecutar instrucciones predefinidas para controlar distintos procesos[37].

Los microcontroladores pueden clasificarse en función de su arquitectura interna, su capacidad de procesamiento y el propósito específico de la aplicación para la cual son destinados.

- Microcontroladores de 8 bits:: Diseñados para tareas simples con bajo consumo y costo reducido. Ejemplo: ATmega328P (Arduino UNO) y PIC16F877A. Se utilizan en automatización básica, instrumentación y sistemas domésticos.
- Microcontroladores de 16 bits: Ofrecen mayor precisión en cuanto al procesamiento de señales y control de motores. Un ejemplo de ello: MSP430 de Texas Instruments. Son usados en dispositivos médicos también como sensores industriales, tienen a su vez un bajo consumo energético.
- Microcontroladores de 32 bits: basados en arquitecturas como ARM Cortex-M o Xtensa (caso del ESP32), esta proporciona una mayor capacidad de cómputo, conectividad inalámbrica (Wi-Fi, BLE) y soporte para sistemas embebidos IoT con una alta complejidad.
- Microcontroladores especializados (SoC – System on Chip): Integran módulos avanzados como conectividad IIoT, criptografía o inteligencia artificial embebida. Ejemplos que pueden mencionarse son: ESP32 o Raspberry Pi Pico W, empleados en sistemas inteligentes y automatización industrial mucho más avanzada[38].

En entornos industriales y aplicaciones basadas en tecnologías IoT, la selección del microcontrolador se encuentra condicionada por el equilibrio existente entre la potencia

de procesamiento disponible, el consumo energético, el costo de implementación y la capacidad de comunicación, siendo los dispositivos de arquitectura de 32 bits los más ampliamente adoptados debido a su versatilidad y eficiencia en la ejecución de diversas tareas.

Microcontrolador	Arquitectura	Frecuencia de reloj	Consumo energético	Conectividad	Aplicaciones típicas
PIC16F877A	8 bits (Harvard)	20 MHz	Muy bajo	UART, SPI, I2C	Automatización básica, control doméstico, instrumentación
ATmega328P (Arduino UNO)	8 bits (RISC)	16 MHz	Bajo	UART, SPI, I2C	Domótica, robótica educativa, sensores ambientales
MSP430 (TI)	16 bits (RISC)	25 MHz	Ultra bajo	UART, SPI, I2C	Dispositivos médicos, instrumentación portátil, control de energía
ARM Cortex-M4	32 bits (ARMv7-M)	120 MHz	Medio	UART, SPI, I2C, CAN, USB	Control industrial, procesamiento digital de señales, robótica avanzada
ESP32 (Espressif)	32 bits (Xtensa LX6, dual core)	240 MHz	Medio	Wi-Fi, BLE, UART, SPI, I2C	IoT, IIoT, monitoreo remoto, Edge Computing
Raspberry Pi Pico	32 bits (RP2040 dual-core)	133 MHz	Medio	Wi-Fi, USB, UART, SPI, I2C	Automatización industrial, IoT, gateways inteligentes

Cuadro 2: Comparativa técnica de microcontroladores para aplicaciones IoT e industriales[39]

Aplicación

El ESP32 es especialmente popular en el campo del Internet de las Cosas debido a su capacidad para conectar dispositivos a través de Wi-Fi y Bluetooth Low Energy (BLE). Gracias a su bajo consumo de energía y su potente capacidad de procesamiento, el ESP32 es utilizado en una amplia gama de aplicaciones, como el control de dispositivos remotos, sistemas de automatización del hogar, y sistemas de localización y monitoreo en tiempo real[40].

Software

Se puede programar utilizando diferentes lenguajes, como C/C++ y Python (mediante el uso de MicroPython). Esto hace que el microcontrolador sea accesible para una amplia gama de desarrolladores, desde aquellos con experiencia en programación embebida hasta aquellos que trabajan con plataformas de desarrollo de alto nivel como Arduino[41].

2.2.8. Raspberry PI

La Raspberry Pi es una computadora de bajo costo y tamaño reducido, desarrollada con el objetivo de promover la educación en informática y facilitar el desarrollo de proyectos de hardware y software. En su núcleo, utiliza un procesador ARM y es capaz de

ejecutar una variedad de sistemas operativos, entre los que destaca Raspberry Pi OS, una versión basada en Linux.

La Raspberry Pi se caracteriza por su flexibilidad y accesibilidad para los desarrolladores, especialmente en proyectos de Internet de las Cosas (IoT), controladores de automatización, y en aplicaciones educativas. El dispositivo integra varios periféricos, como puertos USB, HDMI, GPIO (General Purpose Input/Output), conectividad Wi-Fi y Ethernet, lo que le permite interactuar con sensores, actuadores y otros dispositivos externos. Una de las características destacadas de la Raspberry Pi es la posibilidad de programarla en lenguajes como Python, C/C++ y Java, lo que la hace accesible tanto para principiantes como para desarrolladores experimentados. Además, su bajo costo y la gran cantidad de recursos disponibles la han convertido en una plataforma popular para la creación de prototipos rápidos y soluciones integradas de bajo presupuesto[42].

Esta plataforma es ampliamente empleada en el desarrollo de proyectos relacionados con vehículos inteligentes, sistemas de domótica y aplicaciones de monitorización remota, así como en diversos entornos de sistemas embebidos, en los cuales resulta necesario integrar de manera eficiente y económica capacidades de procesamiento junto con sensores y actuadores.

Los dispositivos que conforman esta plataforma pueden clasificarse en función de su capacidad de procesamiento, opciones de conectividad, disponibilidad de memoria y el propósito específico de la aplicación para la cual son destinados:

- Raspberry Pi 4 (Model B): Incremento de manera significativa su potencia de cómputo y capacidad de procesamiento paralelo. Procesador de ARM Cortex-A72 de 4 núcleos a 1.5 GHz, RAM de 2 – 8 GB LPDDR4, conectividad de Gigabit Ethernet, Wi-Fi ac, Bluetooth 5.0, USB 3.0, doble HDMI, aplicaciones como Edge Computing, IA ligera, control industrial, servidores IoT.

2.2.9. Controlador Lógico Programable (PLC)

Origen y Evolución

La historia del PLC comienza en los años 60, cuando la industria automotriz, específicamente General Motors (GM), buscaba una solución que reemplazara los sistemas basados en relés mecánicos para el control de maquinaria en la producción. Los sistemas de relés eran voluminosos, difíciles de modificar y requerían mucho mantenimiento. En respuesta, GM solicitó un sistema electrónico sólido, flexible y programable, capaz de operar en entornos industriales adversos.

En 1968, Bedford Associates diseñó el primer PLC, conocido como Modicon 084, liderado por Dick Morley, considerado el "padre del PLC". Este dispositivo se programaba en un lenguaje similar a los diagramas de lógica de relés ("Ladder Logic"), lo que facilitó su adopción por técnicos acostumbrados a sistemas tradicionales. Su flexibilidad y capacidad

para soportar entornos industriales rápidamente lo hicieron popular en la manufactura y la automatización[43][44].

En los años 70, otras empresas como Allen-Bradley y General Electric comenzaron a desarrollar sus propios PLC, expandiendo la industria. Por ejemplo, Allen-Bradley introdujo el PLC-1, que sentó las bases para su dominio en el mercado. A partir de entonces, los PLC evolucionaron con mayor capacidad de memoria, velocidad y conectividad, permitiendo su integración con tecnologías emergentes como la robótica, los sistemas de visión y el control de movimiento[44].

Estructura Básica del PLC

Componente	Descripción
Módulos de Entrada/Salida (I/O)	Permiten la interacción con dispositivos externos, como sensores y actuadores. Las entradas recogen señales del entorno, mientras que las salidas ejecutan acciones específicas.
Memoria	Almacena el programa del usuario y los datos temporales requeridos durante la ejecución.
Fuente de Alimentación	Proporciona energía al PLC y a sus componentes.
Interfaz de Comunicación	Facilita la conexión con otros dispositivos como es el caso de las computadoras, sistemas SCADA o redes industriales.

Cuadro 3: Componentes del PLC.[45]

Ventajas del PLC

- Flexibilidad: Facilita modificaciones y actualizaciones del programa según las necesidades del proceso.
- Fiabilidad: Diseñado para su funcionamiento en entornos industriales adversos, proporcionando un alto nivel de precisión en la ejecución de sus operaciones.
- Integración: Permite la conexión con otros sistemas a través de protocolos como Modbus, Ethernet/IP, y Profibus[46].

Principios de Funcionamiento

El PLC sigue un ciclo operativo conocido como "Ciclo de Escaneo", que incluye:

- Leer las entradas.
- Ejecutar las instrucciones del programa.

- Actualizar las salidas en de acuerdo con los resultados
- Repite el ciclo.

Este enfoque permite que los PLC respondan rápidamente a los cambios en el sistema, garantizando un control eficiente y preciso[47].

2.2.10. Interfaz Hombre-Máquina (HMI)

Son plataformas fundamentales en la interacción entre los operadores humanos y los sistemas de control industrial. Estas interfaces facilitan la supervisión y el control en tiempo real en entornos industriales como manufactura, energía y automatización de procesos. La evolución de las HMI ha sido significativa, transformándose desde simples paneles de botones hasta sofisticadas pantallas táctiles y soluciones basadas en la web, con una creciente capacidad para integrar nuevas tecnologías como el Internet de las Cosas y la conectividad en red[48].

Protocolos de comunicación

El sistema propuesto integra diversos protocolos de comunicación que permiten la transmisión eficiente de datos entre los distintos niveles de la arquitectura IIoT, desde la adquisición hasta la visualización.

Bluetooth Low Energy (BLE)

BLE es un protocolo de comunicación inalámbrica de corto alcance diseñado para aplicaciones de bajo consumo energético. En el presente sistema, se utiliza en modo *advertising* mediante tecnología Beacon, permitiendo la transmisión periódica de datos desde los nodos ESP32 sin necesidad de establecer conexiones persistentes. Este enfoque reduce el consumo energético y facilita la comunicación con múltiples dispositivos receptores[49].

Wi-Fi (IEEE 802.11)

El protocolo Wi-Fi, basado en el estándar IEEE 802.11, se emplea para la transmisión de datos desde el ESP32 hacia la Raspberry Pi. Este protocolo permite una mayor velocidad de transmisión y menor latencia, facilitando la integración con plataformas de procesamiento como Node-RED y sistemas de visualización en tiempo real[50].

Modbus TCP/IP

Modbus TCP/IP es un protocolo de comunicación industrial ampliamente utilizado para la transmisión de datos entre dispositivos en redes Ethernet. En el sistema propuesto,

se emplea para la comunicación entre la Raspberry Pi y el PLC, permitiendo la lectura y escritura de registros de manera estructurada[51].

HTTP/REST y WebSocket

Para la integración con plataformas como Node-RED y Home Assistant, se utilizan protocolos de aplicación como HTTP/REST y WebSocket. Estos permiten la transmisión de datos en tiempo real y la interacción entre servicios distribuidos dentro del sistema[52].

En conjunto, estos protocolos permiten una comunicación eficiente entre los distintos componentes del sistema, garantizando la transmisión de datos desde los sensores hasta la interfaz de visualización.

Protocolo	Tipo	Alcance	Uso principal
BLE	Inalámbrico	Corto	Sensores con ESP32
Wi-Fi	Inalámbrico	Medio	Envío de datos a servidor
Modbus TCP/IP	Industrial	Local	Comunicación con PLC
HTTP/REST	Aplicación	Global	Integración con Node-RED
WebSocket	Aplicación	Global	Monitoreo en tiempo real

Cuadro 4: Protocolos de comunicación utilizados en el sistema

2.3. Marco Teórico

El desarrollo de sistemas de monitoreo fundamentados en redes de sensores inalámbricos ha adquirido una relevancia significativa en los últimos años, como consecuencia de la creciente necesidad de supervisar, en tiempo real, diversas variables de carácter ambiental y operativo. En sectores considerados críticos, como el ámbito hospitalario, este tipo de sistemas permite mantener condiciones controladas y seguras dentro de las instalaciones, contribuyendo a la reducción de riesgos asociados a factores ambientales y al fortalecimiento de la capacidad de respuesta ante la ocurrencia de eventos anómalos.

En la revista Colombiana "Similitudes y diferencias entre Redes de Sensores Inalámbricos e Internet de las Cosas: Hacia una postura clasificadora" realizado por Johan Rueda y Jesús Talavera, señalan que las WSN constituyen la base tecnológica de múltiples aplicaciones modernas debido a su flexibilidad, bajo consumo energético y facilidad de despliegue. Estas características las convierten en una solución adecuada para entornos donde la instalación de cableado resulta costosa o poco práctica, como ocurre en hospitales en operación continua[53].

En la Pontificia Universidad Católica del Perú se realizó el tema de titulación: Estudio del diseño de una red de beacons Bluetooth para un campus universitario, donde se examina las mejores opciones tecnológicas para transmitir información de manera instantánea, vinculada a la ubicación de las personas, y cómo entregar esta información a

los usuarios. Entre las alternativas consideradas para la transmisión se encuentran RFID, NFC, WiFi y los beacons. Los factores clave para elegir la tecnología más adecuada fueron el consumo energético, la tasa de transferencia y la compatibilidad con dispositivos móviles. Finalmente, el estudio propone un modelo de solución que utiliza beacons, dispositivos basados en Bluetooth Low Energy, que emiten mensajes según su localización y son escaneados a través de una aplicación móvil[54].

En la Universidad Estatal Península de Santa Elena se realizó el siguiente trabajo de titulación: Diseño e implementación de un sistema de gestión, monitoreo y digitalización para el proceso de selección de mangos en función de su color, enfocada a la industria 4.0 para optimizar el rendimiento de producción, donde se emplea visión artificial para procesar imágenes de mangos en tiempo real, utilizando una Raspberry Pi 3 con una cámara que detecta los colores de las frutas. El sistema de transporte y clasificación de los mangos se automatiza mediante un PLC. El proceso de clasificación se monitorea y gestiona en tiempo real a través de un sistema SCADA, una interfaz HMI y una plataforma web Freeboard conectada a un dispositivo IoT, que está en red con el PLC mediante el protocolo de comunicación Profinet[55].

En la Universidad de las Fuerzas Armadas se realizó el tema de titulación: Diseño e implementación de un HMI para el monitoreo y control de nivel utilizando el PLC MICROLOGIX 1100 en el laboratorio de instrumentación virtual en el ITSA. El rápido avance de la electrónica ha impulsado la automatización en diversas áreas de la vida humana. En este contexto, la investigación se enfoca en el desarrollo de una interfaz HMI para monitorear y controlar el nivel de líquido en un recipiente de la estación de nivel DEGEM SYSTEM en el Laboratorio de Instrumentación Virtual del ITSA. Se utiliza un PLC MicroLogix 1100 de Allen Bradley, junto con un módulo de expansión 1762 IF2OF2 que incluye entradas y salidas analógicas, un sensor ultrasónico de nivel U-GAGE S18U de BANNER, una bomba y una electroválvula de la estación. El sensor de nivel envía señales al módulo de expansión, que está conectado al PLC, el cual procesa la información que luego se visualiza en una computadora[56].

Aunque estos parámetros son relevantes en sistemas BLE, en el presente trabajo no fueron objeto de evaluación experimental, ya que el alcance del proyecto se centró en validar la integración funcional del sistema de monitoreo.

3. CAPÍTULO III

Desarrollo

En este capítulo se detallan las fases de desarrollo del hardware y software, abarcando la configuración de los sensores, microcontroladores y dispositivos de comunicación que conforman la arquitectura del sistema.

Se describe la integración de los diferentes módulos los cuales conforman el sistema, tales como: el ESP32, la Raspberry Pi, el PLC además de la interfaz HMI, con ello se logra la adquisición de los datos a su vez la transmisión y correcta visualización en tiempo real. De igual manera, se presentan los fundamentos técnicos la misma que respalda la implementación del sistema de monitoreo propuesto, haciendo énfasis en la aplicación de tecnologías IIoT, junto con los mecanismos de comunicación inalámbrica sumado a ello los procesos de automatización industrial, con el objetivo de poder garantizar un funcionamiento.

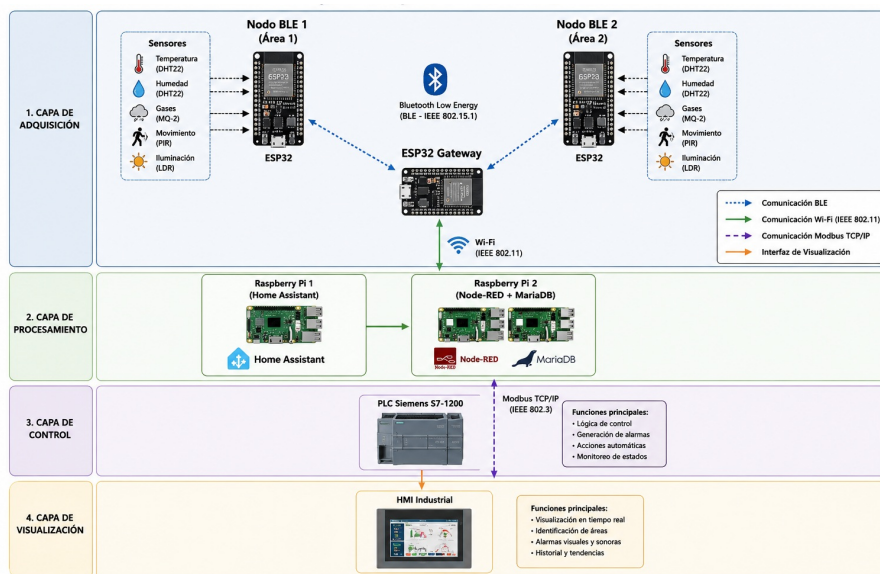


Figura 2: Arquitectura del Sistema

3.1. Componentes del Proyecto

3.1.1. Componentes Lógicos

Nivel funcional	Componente	Función dentro del sistema
Adquisición de datos	ESP32 Nodo BLE 1	Adquisición de temperatura, humedad, gases, presencia e iluminación mediante sensores, transmitiendo la información mediante Bluetooth Low Energy (BLE).
Adquisición de datos	ESP32 Nodo BLE 2	Adquisición de temperatura, humedad, gases, presencia e iluminación mediante sensores, transmitiendo la información mediante Bluetooth Low Energy (BLE).
Comunicación	ESP32 Gateway	Recepción de la información proveniente de los nodos BLE y retransmisión mediante Wi-Fi hacia la Raspberry Pi encargada de la supervisión del sistema.
Supervisión	Raspberry Pi 1	Ejecución de Home Assistant para la supervisión de los dispositivos IIoT y recepción de la información enviada por el ESP32 Gateway.
Procesamiento	Raspberry Pi 2	Procesamiento de la información mediante Node-RED y almacenamiento de los datos en MariaDB.
Control	PLC Siemens S7-1200	Procesamiento de la lógica de control, evaluación de condiciones de operación y activación de alarmas del sistema.
Visualización	HMI Industrial	Visualización en tiempo real de las variables ambientales, alarmas e identificación de las áreas monitoreadas.

Cuadro 5: Arquitectura funcional de los componentes lógicos del sistema.

El Cuadro 5 resume la distribución funcional de los principales componentes lógicos implementados en el sistema. Esta organización permite identificar claramente el papel que desempeña cada dispositivo dentro de la arquitectura propuesta, desde la adquisición de datos hasta la supervisión, procesamiento, control y visualización de la información.

El sistema de monitoreo hospitalario se sustenta en una arquitectura distribuida organizada en diferentes niveles funcionales. En la capa de adquisición se implementan dos nodos inalámbricos basados en microcontroladores ESP32, cada uno asociado a un conjunto de sensores para la medición de temperatura, humedad, concentración de gases, presencia e iluminación en áreas previamente definidas del entorno hospitalario simulado. Ambos nodos transmiten la información mediante Bluetooth Low Energy (BLE) hacia un tercer ESP32 configurado como gateway, cuya función consiste en recibir los datos provenientes de los nodos BLE y retransmitirlos mediante una conexión Wi-Fi hacia la infraestructura de procesamiento.

La capa de procesamiento está conformada por dos Raspberry Pi con funciones diferenciadas. La primera ejecuta Home Assistant como plataforma de supervisión y gestión de dispositivos IIoT, mientras que la segunda aloja Node-RED y MariaDB para el procesamiento de flujos de información y el almacenamiento estructurado de los datos. Posteriormente, la información procesada es enviada al PLC Siemens S7-1200 mediante el protocolo de comunicación correspondiente, permitiendo la ejecución de la lógica de control y la generación de alarmas. Finalmente, el HMI industrial presenta en tiempo real las variables monitoreadas, las alarmas activas y la identificación de las áreas supervisadas, facilitando la interacción del usuario con el sistema.

Node-Red

Es una herramienta de desarrollo visual basada en flujos, diseñada para interconectar hardware, servicios web y APIs dentro del ecosistema IoT. Node-RED permite la creación de aplicaciones mediante una interfaz gráfica que facilita la integración de dispositivos, protocolos y servicios en tiempo real. Su entorno está construido sobre Node.js, lo que le proporciona una arquitectura ligera, modular y altamente escalable, ideal para aplicaciones en sistemas embebidos como la Raspberry Pi o controladores industriales[57].

MariaDB

Es un sistema de gestión de bases de datos relacional (RDBMS, por sus siglas en inglés) derivado de MySQL y desarrollado bajo licencia GNU GPL, con el objetivo de mantener un software de código abierto, estable y de alto rendimiento. Fue creado por el equipo original de desarrolladores de MySQL[58].

Entre sus principales características, MariaDB ofrece un alto grado de compatibilidad con MySQL, permitiendo la migración directa de bases de datos sin modificaciones

significativas. Soporta múltiples motores de almacenamiento (InnoDB, Aria, MyISAM, entre otros), lo que proporciona flexibilidad en la gestión de datos según los requerimientos de la aplicación. Además, incluye optimización avanzada de consultas SQL, replicación síncrona y asíncrona, y soporte para clústeres distribuidos, lo que permite manejar grandes volúmenes de información con alta disponibilidad y tolerancia a fallos[59].

En lo referente a sus beneficios, MariaDB se caracteriza por ofrecer un rendimiento mejorado, así como un nivel de seguridad reforzado mediante la implementación de mecanismos de encriptación de los datos tanto en reposo como durante su transmisión, además de contar con una comunidad de desarrollo activa que garantiza la disponibilidad de actualizaciones frecuentes y soporte continuo. Adicionalmente, su estructura de tipo modular facilita la integración con plataformas IoT y sistemas orientados al análisis de datos, razón por la cual es ampliamente empleada en entornos industriales y académicos en los que se requiere una gestión de la información robusta, eficiente y de libre acceso.

Arduino IDE

El Arduino Integrated Development Environment (IDE) es una plataforma de desarrollo diseñada para la programación, compilación y carga de código en placas basadas en microcontroladores de la familia Arduino y compatibles, como el ESP32. Se caracteriza por su entorno intuitivo, multiplataforma y de código abierto, lo que facilita el desarrollo de proyectos de electrónica, automatización y sistemas embebidos. Su lenguaje de programación se basa en C/C++, con un conjunto de librerías que simplifican la interacción con sensores, actuadores y módulos de comunicación[60].

Entre sus principales características, el Arduino IDE ofrece compatibilidad con los sistemas operativos Windows, Linux y macOS, además de contar con un compilador AVR-GCC y un monitor serial integrado para la depuración en tiempo real. La plataforma dispone de un amplio repositorio de librerías que permiten implementar protocolos de comunicación como I²C, SPI, UART, Wi-Fi y Bluetooth, además de la posibilidad de integrar entornos externos y microcontroladores avanzados como el ESP8266 y el ESP32[61].

Sus beneficios, el Arduino IDE promueve la accesibilidad al desarrollo electrónico mediante una interfaz gráfica simplificada, fomentando la experimentación y el aprendizaje progresivo. Su estructura modular y su comunidad global activa garantizan la disponibilidad de soporte, documentación y actualizaciones constantes. En entornos industriales e IoT, el Arduino IDE se destaca por su capacidad para integrar sensores, módulos inalámbricos y sistemas de control, facilitando el desarrollo rápido de prototipos funcionales y aplicaciones de monitoreo en tiempo real[62].

TIA Portal V16

Es un entorno de ingeniería integrado que permite la programación, configuración y puesta en marcha de sistemas de automatización industrial (PLC, HMI, accionamientos, redes) desde una única herramienta. Su objetivo es facilitar la ingeniería, optimizar los tiempos de puesta en marcha y asegurar la consistencia de los proyectos[63]. Entre las mejoras introducidas en la versión 16 destacan:

- Función Exclusive Engineering en el servidor de proyectos que permite trabajo colaborativo multiusuario, gestión de revisiones, cambio de protocolos y archivado automático sin necesidad de licencias adicionales.
- Interfaz de control de versiones (VCI) integrada para conectarse con sistemas externos como GIT, SVN o TFS, esta permite la exportación/importación de objetos de software y versionado granular.
- Soporte ampliado para OPC UA: todos los controladores S7-1200 ahora pueden funcionar como servidores OPC UA y la gama S7-1500 mejora la comunicación entre controladores usando OPC UA.
- Integración mejorada para proyectos de motorización y movimiento: inclusión del controlador Simatic Drive Controller para sistemas multi-eje dentro del entorno TIA Portal[63].

Dentro de este tipo de sistema asistencial basado en tecnología IIoT y sensores, TIA Portal V16 se puede desempeñar algunas funciones críticas como:

- Programación del PLC conforme al estándar IEC 61131-3, la misma que se gestionando de manera lógica sobre el control de sensores y alertas
- Integración de componentes HMI que permite la visualización de datos en tiempo real y señales de emergencia o presencia.
- Conectividad vertical mediante OPC UA la cual facilita la transmisión de los datos desde la capa de automatización hacia sistemas superiores de análisis o servidores IIoT.
- Facilita el desarrollo colaborativo de ingeniería por lo que la reutilización de bloques de lógica mediante control mejora la eficiencia del desarrollo y mantenimiento del sistema.

Home Assistant

Es una plataforma de automatización y control domótico de código abierto, desarrollada principalmente en Python, que permite la integración y gestión unificada de

dispositivos inteligentes dentro de un entorno IoT. Su arquitectura modular y altamente escalable está diseñada para ejecutar procesos de automatización localmente, garantizando un alto nivel de independencia de servicios en la nube y mayor seguridad en la gestión de datos[64].

Se ejecuta sobre sistemas basados en Linux, Raspberry Pi o Docker, y utiliza una arquitectura cliente-servidor en la cual el núcleo del sistema (Home Assistant Core) gestiona la comunicación entre los distintos componentes de hardware y software. Emplea el framework `asyncio` de Python para la gestión asíncrona de tareas y eventos, lo que optimiza el rendimiento en aplicaciones de monitoreo en tiempo real. Además, ofrece compatibilidad con más de 2000 integraciones a través de protocolos como MQTT, Zigbee, Z-Wave, Bluetooth Low Energy (BLE) y Modbus TCP, lo que facilita la interoperabilidad con una amplia gama de sensores, actuadores, PLC y microcontroladores como el ESP32 [65].

Entre sus principales características se destacan la disponibilidad de una interfaz web intuitiva, conocida como Lovelace UI, la capacidad para la creación de automatizaciones personalizadas mediante el uso de archivos en formato YAML o a través de la integración con Node-RED, así como la posibilidad de realizar análisis de datos históricos empleando herramientas integradas o bases de datos externas tales como MariaDB e InfluxDB. Adicionalmente, gracias a su capacidad de procesamiento local, la plataforma Home Assistant permite reducir la latencia en la comunicación con los dispositivos conectados y mantener la operatividad del sistema incluso en ausencia de conexión a Internet, aspecto que resulta esencial en entornos industriales y hospitalarios donde la continuidad del servicio es considerada un factor crítico.

Los beneficios técnicos de Home Assistant incluyen su flexibilidad de integración, compatibilidad multiplataforma, seguridad local, y su capacidad de escalarse desde sistemas domésticos hasta infraestructuras industriales IIoT. En el contexto del sistema de monitoreo hospitalario, Home Assistant puede actuar como una plataforma central de supervisión, recibiendo los datos de los sensores conectados al ESP32 y procesados por la Raspberry Pi, para luego visualizarlos en una interfaz HMI. Su arquitectura abierta también permite la creación de reglas automatizadas para activar alarmas, ventilación o notificaciones ante condiciones anómalas detectadas en el entorno.

DopSoft

Es un software de desarrollo especializado en la configuración, programación y simulación de interfaces hombre-máquina (HMI), diseñado por Delta Electronics para la familia de pantallas táctiles DOP Series. Este entorno permite crear interfaces gráficas interactivas que facilitan la comunicación entre el operador y los dispositivos de control industrial, tales como PLCs, sensores y actuadores, cumpliendo con los estándares de diseño definidos por la IEC 61131-3[66].

Se caracteriza por su entorno de programación visual que utiliza herramientas de arrastrar y soltar para la creación de botones, indicadores, alarmas, medidores y gráficos de proceso. Permite la comunicación mediante protocolos industriales como Modbus RTU/TCP, Ethernet/IP, y CANopen, posibilitando la interoperabilidad con controladores lógicos programables y dispositivos IoT. Su compatibilidad con diversos formatos de datos y la posibilidad de integrar imágenes, scripts y macros amplían su capacidad de personalización para aplicaciones industriales y de monitoreo en tiempo real[67].

Ofrece una interfaz intuitiva, reducción de tiempos de desarrollo, compatibilidad directa con los PLC Delta y alta estabilidad en operación continua. Su diseño orientado al control industrial garantiza una comunicación confiable y una respuesta eficiente ante eventos del sistema, aspectos fundamentales en aplicaciones críticas como el monitoreo hospitalario asistido por tecnología IIoT, donde la visualización de parámetros ambientales y la generación de alarmas deben ser precisas y en tiempo real.

En el contexto del presente proyecto, DOPSoft se utiliza para diseñar la interfaz HMI que muestra las variables obtenidas por los sensores (temperatura, presencia, gases, iluminación, etc.) conectados al sistema mediante ESP32 y gestionados por la Raspberry Pi. Gracias a su comunicación vía Modbus TCP, la HMI puede interactuar con el PLC, que actúa como nodo de control, garantizando una operación centralizada y eficiente del sistema de monitoreo hospitalario.

3.1.2. Componentes Físicos

Los componentes físicos constituyen la infraestructura de hardware sobre la cual se implementó el sistema de monitoreo hospitalario propuesto. En esta sección se describen las características técnicas de los principales dispositivos utilizados, así como la función específica que desempeñan dentro de la arquitectura del sistema. Entre estos componentes se incluyen los microcontroladores ESP32, los sensores ambientales, las Raspberry Pi, el PLC Siemens S7-1200, el HMI industrial y los elementos de comunicación, los cuales trabajan de forma integrada para permitir la adquisición, transmisión, procesamiento, almacenamiento y visualización de la información.

Microcontrolador ESP32

El ESP32 es un microcontrolador de alta versatilidad que se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones, de manejar general en sistemas de comunicación inalámbrica, esta cuenta con soluciones orientadas al Internet de las Cosas (IoT) junto con proyectos de automatización. Este microcontrolador, desarrollado por la empresa Espressif Systems es la que combina un elevado rendimiento de procesamiento con un bajo consumo energético, esta contaría con características que lo hacen mucho más adecuado para su implementación en dispositivos portátiles y en los sistemas embebidos.



Figura 3: Dispositivo ESP32

Características técnicas

Característica	Descripción
Procesadores Xtensa® 32-bit LX6	El ESP32 utiliza procesadores de 32 bits de alto rendimiento, capaces de realizar tareas intensivas y multitarea gracias a su configuración de doble núcleo.
Conectividad simultánea	Soporta tanto Wi-Fi como Bluetooth de manera simultánea, fundamental para dispositivos que requieren diversas formas de comunicación.
Periféricos integrados	Incluye ADC, DAC, UART, SPI, I2C y PWM, lo que facilita la conexión con sensores sin necesidad de hardware adicional.
Bajo consumo de energía	Su diseño optimiza el consumo energético, permitiendo su uso en aplicaciones portátiles y dispositivos IoT, donde la duración de la batería es crucial.

Cuadro 6: Características principales del ESP32.[68]

Aplicación

En el presente proyecto, el ESP32 constituye el elemento principal de adquisición y comunicación de datos dentro de la red de sensores inalámbricos. Se implementaron tres microcontroladores con funciones diferenciadas: dos ESP32 configurados como nodos BLE para la adquisición de información proveniente de los sensores de temperatura,

humedad, gases, presencia e iluminación, y un tercer ESP32 configurado como gateway, encargado de recibir la información mediante Bluetooth Low Energy (BLE) y retransmitirla a través de una conexión Wi-Fi hacia la infraestructura de procesamiento. Esta arquitectura permitió establecer una comunicación eficiente entre los dispositivos de adquisición y las plataformas de supervisión, procesamiento y control implementadas en el sistema de monitoreo hospitalario.[40].

Sensor de gas MQ2

Es un dispositivo semiconductor diseñado para la detección de gases combustibles y humo en el ambiente, basado en la variación de resistencia eléctrica del material sensible (óxido de estaño). Su principio de funcionamiento se fundamenta en la absorción de moléculas de gas sobre la superficie del sensor, lo cual altera su conductividad en presencia de compuestos como propano, butano, metano, hidrógeno, alcohol, monóxido de carbono y humo. Este sensor se utiliza ampliamente en sistemas de seguridad, detección de fugas y monitoreo ambiental, tanto en entornos domésticos como industriales, debido a su bajo costo, alta sensibilidad y rápida respuesta ante la presencia de gases inflamables[69].

Parámetro	Valor o Rango Típico
Tipo de detección	Gases combustibles y humo
Gases detectables	LPG, butano, propano, metano, hidrógeno, alcohol, monóxido de carbono (CO)
Material sensible	SnO ₂ (Óxido de estaño)
Voltaje de alimentación (VCC)	5 V DC
Corriente del calentador	150 mA (típica)
Resistencia del calentador (RH)	31 ohm $\pm$ 3 ohm
Rango de detección	300 ppm a 10,000 ppm
Tiempo de respuesta	$\leq$ 10 s
Temperatura de funcionamiento	-20 °C a 50 °C
Humedad relativa de operación	$\leq$ 95 % RH
Vida útil	Aproximadamente 10 años
Señal de salida	Analógica (voltaje proporcional a concentración)

Cuadro 7: Características técnicas del sensor MQ-2

Beneficios Técnicos

El uso del sensor MQ-2 dentro de un sistema de monitoreo IoT o IIoT ofrece ventajas sobre todo en términos de funcionalidad además de la fiabilidad.

- Alta sensibilidad y rango amplio de detección: esta permite detectar concentraciones bajas de gases inflamables de forma precisa.
- Compatibilidad con microcontroladores: su salida analógica es la que facilita la conexión directa con dispositivos como el ESP32, Arduino o Raspberry Pi, por lo que permite el procesamiento de señales justo en el momento en el que sucede.
- Estabilidad operacional: debido a la incorporación de un elemento calefactor integrado, el dispositivo es capaz de mantener un funcionamiento constante frente a variaciones en las condiciones de temperatura y humedad del entorno.
- Bajo costo y mantenimiento mínimo: lo convierten en una opción bastante ideal para sistemas de detección de gases los mismos que tienen diversas aplicaciones.
- Durabilidad y robustez: Su construcción de tipo metálico, en conjunto con un encapsulado elaborado en acero inoxidable, le otorga un alto nivel de resistencia cuando se trata de situaciones mucho más exigentes.

En el escenario de los sistemas de monitoreo que son implementados dentro de entornos hospitalarios, el sensor MQ-2 desempeña una función de carácter fundamental en la detección temprana de la presencia de gases tóxicos o inflamables, contribuyendo de manera directa al fortalecimiento de los niveles de seguridad tanto del personal médico como de los pacientes, a través de la activación oportuna de alarmas o de sistemas de ventilación, una vez identificadas posibles condiciones de riesgo de tipo ambiental.

Sensor Temperatura DHT22

Es un dispositivo digital de bajo costo utilizado para la medición de temperatura y humedad relativa en entornos controlados. Su funcionamiento se basa en un termistor de tipo NTC para la detección de temperatura y un sensor capacitivo para la medición de humedad. Este dispositivo integra un convertidor analógico-digital (ADC) interno que permite la transmisión de los datos de forma digital a través de un único pin de comunicación, reduciendo el número de conexiones requeridas[70].

DHT22 pins	
1	VCC
2	DATA
3	NC
4	GND

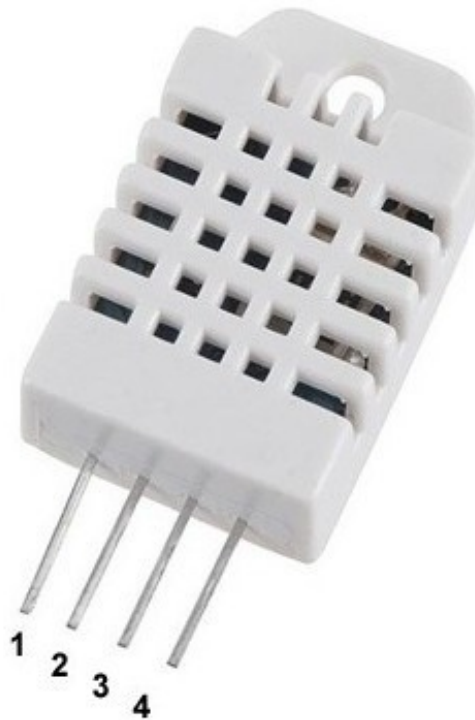


Figura 4: Dispositivo DHT22

Parámetro	Valor o Rango Típico
Tipo de sensor	Temperatura y Humedad relativa
Rango de temperatura	0 °C a 50 °C
Precisión de temperatura	±2 °C
Rango de humedad	20 % a 90 % RH
Precisión de humedad	±5 % RH
Tensión de alimentación (VCC)	3.3 V a 5.5 V DC
Corriente de operación	0.3 mA (medición) / 60 µA (en espera)
Frecuencia de muestreo	1 Hz (una lectura por segundo)
Interfaz de comunicación	Digital de un solo hilo
Tiempo de respuesta	¡6 s
Temperatura de funcionamiento	0 °C a 50 °C
Dimensiones físicas	15.5 mm × 12 mm × 5.5 mm
Vida útil	Más de 20,000 ciclos de medición

Cuadro 8: Características técnicas del sensor DHT22

Beneficios técnicos

El DHT22 ofrece una serie de ventajas que lo hacen ideal para proyectos de monitoreo ambiental y sistemas IIoT:

- Simplicidad de conexión mediante una interfaz digital de un solo hilo, lo que reduce errores de comunicación.
- Bajo consumo energético, adecuado para sistemas alimentados por batería o energía solar.
- Calibración interna de fábrica, en la que se garantiza mediciones estables sin requerir de ajuste manual.
- Integración sencilla con microcontroladores como el ESP32, permitiendo la adquisición de datos ambientales justo en el tiempo en que sucede.
- Compatibilidad con plataformas de automatización y control, como Home Assistant o Node-RED, son las que facilitan la transmisión y análisis de datos ambientales[71].

En relación a un sistema hospitalario basado en tecnología IIoT, el sensor DHT22 permite monitorizar las condiciones de temperatura y humedad de las diferentes áreas, contribuyendo al confort de los pacientes y al mantenimiento de las condiciones ambientales óptimas para equipos médicos.

Sensor Movimiento PIR

El sensor PIR (Passive Infrared Sensor) es un dispositivo electrónico diseñado para detectar movimiento a través de la radiación infrarroja emitida por cuerpos en su campo de visión. A diferencia de los sensores activos, el PIR no emite energía, sino que detecta cambios en la radiación infrarroja ambiente, lo que le confiere el calificativo de “pasivo”.

Su principio de funcionamiento se basa en un par de sensores piroeléctricos que generan una pequeña diferencia de potencial cuando un objeto con temperatura distinta (como el cuerpo humano, aproximadamente 37 °C) pasa frente al campo de detección. Este cambio térmico es amplificado y procesado electrónicamente para generar una señal digital de salida que indica la detección de movimiento[72].



Figura 5: Dispositivo PIR

En sistemas de automatización y control fundamentados en tecnologías IIoT, el sensor PIR es utilizado para la detección de la presencia o ausencia de personas dentro de un área determinada, posibilitando la activación de alarmas, sistemas de iluminación o la ejecución de protocolos de seguridad previamente establecidos. En el contexto de un entorno hospitalario, este tipo de sensor puede integrarse con sistemas HMI y con controladores tales como el ESP32 o la Raspberry Pi, lo que permite llevar a cabo un monitoreo inteligente de la ocupación de los espacios, así como la detección temprana de movimientos considerados anómalos dentro de las áreas supervisadas.

Beneficios técnicos

El sensor PIR presenta diversas ventajas que justifican su uso en proyectos de monitoreo y automatización de entornos hospitalarios basados en IIoT:

- Alta eficiencia energética, debido a su bajo consumo de corriente en estado de reposo..
- Cobertura amplia mediante lentes tipo Fresnel, es lo que facilita el poder monitorear zonas extensas con un solo dispositivo.
- Compatibilidad con microcontroladores como ESP32, Arduino y Raspberry Pi, con ello se facilita su integración en sistemas de detección y control automatizado.
- Respuesta rápida y precisa, ideal para poder activar alertas o protocolos de emergencia ante la detección de movimiento.
- Aplicabilidad en sistemas hospitalarios inteligentes, donde puede integrarse con sensores de gas y temperatura para activar rutas de evacuación o alarmas ante incidentes críticos[73].

Parámetro	Valor o Rango Típico
Tipo de sensor	Sensor pasivo de radiación infrarroja (PIR)
Voltaje de alimentación	4.5 V a 20 V DC
Consumo de corriente	¡50 μ A (modo en espera)
Distancia de detección	3 m a 7 m (ajustable según lente)
Ángulo de detección	110° a 120° (horizontal)
Tiempo de disparo	Ajustable de 0.5 s a 200 s
Nivel de salida digital	Bajo (0 V) / Alto (3.3 V o 5 V)
Temperatura de operación	-20 °C a +80 °C
Frecuencia de detección	¡10 Hz
Tiempo de inicialización	10 s a 60 s
Sensor piroeléctrico interno	Tipo dual, encapsulado TO-5
Lente	Fresnel, extraíble y reemplazable
Dimensiones típicas	32 mm × 24 mm × 18 mm

Cuadro 9: Características técnicas del sensor de movimiento PIR

Sensor Luz LDR

También conocido como fotorresistor, es un componente electrónico sensitivo a la luz cuya resistencia eléctrica varía en función de la intensidad lumínica incidente sobre su superficie. Fabricado comúnmente con materiales semiconductores como sulfuro de cadmio (CdS), este sensor disminuye su resistencia cuando la luz aumenta, y la incrementa en condiciones de oscuridad[74].

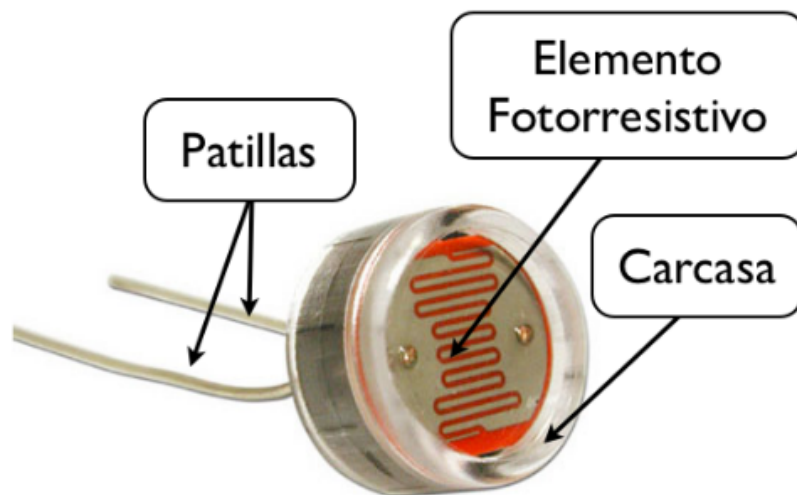


Figura 6: Dispositivo LDR

En sistemas basados en tecnologías IoT e IIoT, los sensores LDR son ampliamente empleados para el monitoreo de los niveles de iluminación ambiental, el control de la activación de luminarias automáticas o la detección de variaciones abruptas de luz en aplicaciones orientadas a la seguridad. En entornos hospitalarios, su integración con dispositivos como el ESP32 o la Raspberry Pi permite implementar una gestión inteligente del consumo energético, así como la supervisión eficiente de la iluminación en áreas consideradas críticas, tales como salas de espera, quirófanos o pasillos de emergencia.

Beneficios técnicos

El LDR es uno de los sensores ópticos más versátiles y económicos dentro de los sistemas de automatización y control industrial. Entre sus principales beneficios técnicos se destacan:

- Alta sensibilidad a la luz visible, lo que permite una medición precisa en entornos interiores y exteriores.
- Bajo consumo energético, ideal para aplicaciones alimentadas por batería o energías renovables.
- Compatibilidad directa con microcontroladores como ESP32, Arduino y Raspberry Pi, sin necesidad de circuitos de acondicionamiento complejos.
- Respuesta lineal que es estable ante variaciones de lo que vendría siendo la iluminación ambiental.

Parámetro	Valor o Rango Típico
Tipo de sensor	Resistor dependiente de la luz (CdS)
Rango de resistencia	1 k Ω (alta iluminación) a 10 M Ω (oscuridad)
Tensión de operación	3.3 V – 5 V DC
Respuesta espectral	400 nm a 700 nm (luz visible)
Tiempo de respuesta	20 ms (incremento) / 30 ms (decaimiento)
Temperatura de operación	-30 °C a +70 °C
Sensibilidad	Alta, dependiente del diámetro del elemento fotosensible
Material fotosensible	Sulfuro de Cadmio (CdS)
Dimensiones típicas	5 mm a 12 mm de diámetro
Tipo de señal de salida	Analógica (voltaje variable)
Vida útil estimada	¿10,000 horas de operación continua

Cuadro 10: Características técnicas del sensor de luz LDR

- Aplicaciones múltiples, desde control automático de iluminación hasta detección de luminosidad ambiental permitiendo una mejora de eficiencia energética[75].

3.1.3. Funcionamiento y comportamiento de los sensores inalámbricos

Los sensores inalámbricos constituyen el nivel de adquisición de datos dentro de la arquitectura propuesta, siendo los encargados de captar las variables ambientales del entorno hospitalario simulado. En el sistema implementado se utilizaron sensores de temperatura y humedad (DHT22), detección de gases (MQ-2), presencia (PIR) e iluminación (LDR), los cuales fueron conectados a dos nodos ESP32 configurados para transmitir la información mediante Bluetooth Low Energy (BLE). Los datos adquiridos son enviados al ESP32 Gateway, que posteriormente los retransmite mediante una conexión Wi-Fi hacia la infraestructura de procesamiento, permitiendo su supervisión, almacenamiento, procesamiento y visualización en tiempo real.

Sensor de gas MQ-2

El sensor MQ-2 opera bajo un principio de detección basado en cambios en la conductividad de un material semiconductor (SnO_2), cuya resistencia disminuye en presencia de gases combustibles. Internamente, el sensor incorpora un elemento calefactor que permite mantener una temperatura constante en la superficie sensora, facilitando la reacción

química con los gases presentes en el ambiente.

El comportamiento del sensor es no lineal, por lo que la relación entre la concentración de gas y la señal de salida requiere procesos de calibración para obtener valores más precisos. Además, el sensor presenta un tiempo de estabilización inicial (precalentamiento), lo cual es un factor importante en aplicaciones de monitoreo continuo.

En el sistema propuesto, el MQ-2 entrega una señal analógica al ESP32, la cual es convertida mediante el ADC del microcontrolador, permitiendo su posterior procesamiento y transmisión.

Sensor de temperatura y humedad DHT22

El sensor DHT22 integra dos elementos de medición: un termistor para la temperatura y un sensor capacitivo para la humedad relativa. La medición de humedad se basa en la variación de la constante dieléctrica de un polímero en función del contenido de vapor de agua en el ambiente.

El sensor realiza un procesamiento interno de las señales y transmite los datos en formato digital mediante un protocolo de comunicación de un solo hilo. Este mecanismo reduce el ruido en la señal y mejora la precisión de las mediciones.

En el sistema, el DHT22 proporciona datos digitales directamente al ESP32, lo que simplifica su integración y reduce la necesidad de conversión adicional.

Sensor de movimiento PIR

El sensor PIR detecta la presencia de movimiento a partir de cambios en la radiación infrarroja emitida por los cuerpos. Su elemento principal es un material piroeléctrico que genera una señal eléctrica cuando detecta variaciones térmicas en su campo de visión.

El sensor PIR no mide distancia ni velocidad, sino que responde a cambios dinámicos en la radiación infrarroja, por lo que su funcionamiento depende de la variación térmica entre el objeto y el entorno. Este comportamiento lo hace altamente eficiente en la detección de presencia humana.

En el sistema, el sensor PIR genera una señal digital que es interpretada por el ESP32 como un evento binario (detección o no detección), lo cual permite activar procesos de alerta en tiempo real.

Sensor de iluminación LDR

El sensor LDR funciona a partir del efecto fotoresistivo, en el cual la resistencia del material disminuye cuando aumenta la intensidad de la luz incidente. Este sensor requiere la implementación de un divisor de voltaje para transformar la variación de resistencia en una señal analógica medible.

El comportamiento del LDR es no lineal y depende de las condiciones de iluminación del entorno, por lo que su uso es más adecuado para detectar cambios relativos en la intensidad lumínica.

En el sistema propuesto, la señal analógica del LDR es leída por el ESP32 a través de su convertidor ADC, permitiendo monitorear las condiciones de iluminación en tiempo real.

Raspberry Pi 4

La Raspberry Pi 4 Model B es una placa de desarrollo de bajo costo y alto rendimiento, diseñada para aplicaciones de cómputo embebido, automatización e implementación de sistemas IoT (Internet of Things) e IIoT (Industrial Internet of Things), esta versión incorpora un procesador Broadcom BCM2711 de cuatro núcleos ARM Cortex-A72 a 1.5 GHz, ofreciendo un rendimiento significativamente superior respecto a sus versiones anteriores[76].

Su arquitectura de 64 bits permite la ejecución de sistemas operativos completos basados en Linux, como Raspberry Pi OS, y entornos de desarrollo como Python, Node-RED o MariaDB, lo que la convierte en un componente esencial dentro de infraestructuras inteligentes. Gracias a su conectividad Wi-Fi IEEE 802.11ac, Bluetooth 5.0, Ethernet Gigabit, y múltiples puertos USB y GPIO, la Raspberry Pi 4 puede desempeñar funciones de servidor de adquisición de datos, pasarela IoT o controlador local en sistemas de automatización hospitalaria o industrial[77].

Beneficios técnicos

Desde una perspectiva de ingeniería electrónica, la Raspberry Pi 4 presenta ventajas bastante notables y considerables en términos de rendimientos interoperabilidad sumando a esto la escalabilidad:

- **Procesamiento avanzado:** su CPU ARM Cortex-A72 este es de cuatro núcleos el cual permite ejecutar múltiples procesos de manera simultánea, ideal para tareas diversas tareas como es el caso de monitoreo, análisis y control en tiempo real.
- **Versatilidad de comunicación:** integra Wi-Fi de doble banda, Bluetooth BLE y Ethernet Gigabit, contando con una facilidad de conexión directa con dispositivos IoT además de las redes industriales.
- **Compatibilidad con múltiples lenguajes y entornos de desarrollo,** lo que permite diseñar aplicaciones personalizadas para la gestión hospitalaria o industrial.

Parámetro	Especificación Técnica
Procesador	Broadcom BCM2711, Quad-Core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit a 1.5 GHz
Memoria RAM	2 GB, 4 GB o 8 GB LPDDR4
Almacenamiento	MicroSD (hasta 128 GB recomendada)
Conectividad inalámbrica	Wi-Fi IEEE 802.11 b/g/n/ac (2.4 GHz y 5.0 GHz), Bluetooth 5.0, BLE
Ethernet	Gigabit Ethernet (a través de USB 2.0 bus)
Puertos USB	2x USB 3.0, 2x USB 2.0
Video	2x micro HDMI (resolución máxima 4K@60Hz)
GPIO	40 pines GPIO compatibles con versiones anteriores
Alimentación	5V DC vía conector USB-C (mínimo 3A)
Sistema operativo	Raspberry Pi OS, Ubuntu Server, Debian, etc.
Dimensiones	85 mm x 56 mm x 17 mm
Consumo promedio	3.4 W (reposo) – 7.6 W (uso intensivo)
Temperatura de operación	0 °C a 50 °C

Cuadro 11: Características técnicas de la Raspberry Pi 4 Model B

- Soporte para Edge Computing, permite procesar datos de manera local antes de que esto sean enviados a la nube, reduciendo con ello la latencia y mejorando la confiabilidad del sistema.

Aplicación

En el sistema desarrollado se emplearon dos Raspberry Pi con funciones específicas dentro de la arquitectura propuesta. La primera Raspberry Pi ejecuta Home Assistant como plataforma de supervisión y gestión de los dispositivos IIoT, permitiendo la recepción y visualización inicial de la información transmitida por el ESP32 Gateway. La segunda Raspberry Pi ejecuta Node-RED y MariaDB, encargándose del procesamiento de los datos, la gestión de los flujos de información y el almacenamiento estructurado de las variables adquiridas por los sensores. Esta distribución funcional permitió separar las tareas de supervisión y procesamiento, mejorando el desempeño del sistema y facilitando la integración con el PLC y el HMI industrial.

PLC S7-1200 Siemens

Es un controlador lógico programable (PLC) de la serie SIMATIC diseñado para aplicaciones de automatización industrial, control de procesos y sistemas embebidos inteligentes. Fabricado por Siemens AG, este dispositivo combina diferentes aspectos como es la robustez, también son altamente flexibles y cuentan a su vez con una conectividad bastante avanzada, siendo ideal para proyectos de PYMES en escala en entornos donde se requiere fiabilidad operativa y una constante comunicación industrial[78].

El S7-1200 dispone de una CPU modular con capacidades de procesamiento determinista, puertos integrados Ethernet y PROFINET, así como módulos de expansión analógicos y digitales que permiten adaptar su configuración a distintos requerimientos de campo. Su programación se realiza mediante el entorno TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal), bajo los lenguajes definidos en el estándar IEC 61131-3, como Ladder (LAD), Function Block Diagram (FBD) y Structured Text (ST)[79].

Gracias a su arquitectura escalable y su compatibilidad con protocolos industriales como Modbus TCP/IP, PROFINET y EtherNet/IP, el PLC S7-1200 puede integrarse eficientemente con Raspberry Pi, ESP32, HMIs y sistemas SCADA, permitiendo el desarrollo de entornos de automatización inteligente e interconectada (IIoT)[80].

Parámetro	Especificación Técnica
Fabricante	Siemens AG
Serie	SIMATIC S7-1200
Modelos disponibles	CPU 1211C, 1212C, 1214C, 1215C, 1217C
Procesador	32 bits, con tiempo de ciclo de 0.08 μ s/instrucción
Memoria de trabajo	50 KB a 100 KB (según modelo)
Entradas digitales	6 a 24 (24 V DC)
Salidas digitales	4 a 16 (24 V DC o relé)
Entradas analógicas	Hasta 14 (12 bits) con módulos de expansión
Salidas analógicas	Hasta 10 (12 bits) con módulos de expansión
Interfaces de comunicación	PROFINET, Modbus TCP/IP, Ethernet, RS-485 (opcional)
Tensión de alimentación	24 V DC
Consumo de potencia	2.5 W a 4 W (dependiendo del modelo)
Temperatura de operación	0 °C a +55 °C
Programación	TIA Portal (LAD, FBD, STL, SCL, GRAPH)
Montaje	Carril DIN 35 mm
Protección	IP20
Dimensiones aproximadas	90 x 100 x 75 mm

Cuadro 12: Características técnicas del PLC Siemens S7-1200

Beneficios Técnicos

Desde una perspectiva de ingeniería de automatización, el Siemens S7-1200 destaca por su equilibrio entre rendimiento, modularidad y conectividad, lo que lo convierte en uno de los PLCs más utilizados en entornos industriales y educativos. Sus principales beneficios técnicos son:

- Arquitectura modular y escalable, que permite ampliar entradas, salidas y módulos de comunicación según los requerimientos del sistema.
- Alta velocidad de procesamiento en la que se garantiza tiempos de respuesta mínimos y a su vez el control determinista de procesos críticos.
- Compatibilidad con estándares internacionales (IEC 61131-3), lo que facilita su

integración con otras plataformas y la estandarización de proyectos industriales.

- Interfaz Ethernet y PROFINET integrada, es lo que permite comunicación directa con los diferentes sistemas SCADA, HMIs y dispositivos IoT como la Raspberry Pi.

Aplicación

En el sistema desarrollado, el PLC Siemens S7-1200 desempeña la función de controlador principal para el procesamiento de las variables ambientales provenientes de la infraestructura IIoT. A partir de la información recibida desde la Raspberry Pi, el PLC ejecuta la lógica de control previamente programada para evaluar el estado de las variables monitoreadas y determinar la activación de alarmas cuando los valores superan los umbrales establecidos. Además, gestiona la comunicación con el HMI industrial, permitiendo la actualización en tiempo real de las variables del sistema, el estado de las alarmas y la identificación de las áreas monitoreadas. La incorporación del PLC aporta confiabilidad, estabilidad y compatibilidad con aplicaciones de automatización industrial.

HMI DELTA DOP B03211

Es una interfaz hombre-máquina diseñada para facilitar la comunicación entre el operario y el sistema de control automatizado. Este dispositivo forma parte de la serie DOP-B de Delta Electronics y se caracteriza por ofrecer una interfaz gráfica intuitiva y eficiente que permite la supervisión, control y configuración de procesos industriales en tiempo real. Su diseño de carácter compacto, junto con su compatibilidad con diversos controladores lógicos programables (PLC), la consolidan como una solución versátil para su aplicación en entornos industriales que demandan altos niveles de precisión y estabilidad en la operación de los procesos.

El modelo DOP-B03E211 cuenta con una pantalla táctil TFT LCD de 3,5 pulgadas con una resolución de 320×240 píxeles y 65.536 colores, proporcionando una visualización clara y detallada de los parámetros del sistema. Además, dispone de un procesador ARM9 de alto rendimiento y una memoria Flash de 8 MB que permiten un procesamiento ágil de las aplicaciones gráficas. La comunicación con otros dispositivos se realiza mediante puertos RS-232 y RS-485, soportando protocolos industriales como Modbus RTU y Modbus ASCII, lo que garantiza su integración con múltiples plataformas de automatización[81].

Entre los principales beneficios de esta plataforma se destaca la facilidad de programación a través del software especializado, el cual permite el diseño de interfaces gráficas personalizadas, así como la creación de alarmas, tendencias y paneles de control ajustados a las necesidades específicas del proceso. Asimismo, su bajo consumo energético, su elevada confiabilidad operativa y su amplia compatibilidad con controladores de

fabricantes como Siemens y Delta la consolidan como una herramienta indispensable para la implementación de sistemas de monitoreo industrial y la automatización de plantas.

Parámetro	Descripción
Modelo	DOP-B03E211
Pantalla	TFT LCD táctil de 3.5" (320×240 píxeles)
Colores	65.536 colores (16 bits)
Procesador	ARM9 de alto rendimiento
Memoria	8 MB Flash / 4 MB DRAM
Comunicación	RS-232 / RS-485 (soporte Modbus RTU/ASCII)
Software de programación	DOPSoft (entorno gráfico de Delta Electronics)
Voltaje de operación	24 VDC (rango 20.4–28.8 VDC)
Consumo	5.5 W máximo
Temperatura de operación	0 °C a 50 °C
Montaje	Panel estándar industrial
Dimensiones	100 mm × 93 mm × 36 mm

Cuadro 13: Características técnicas del HMI Delta DOP-B03E211

Beneficios principales:

- Interfaz gráfica intuitiva la cual facilita la interacción operador-máquina.
- Cuenta con una alta compatibilidad con controladores
- Su programación mediante software DOPSoft es relativamente fácil.
- Bajo consumo energético y una confiabilidad operativa elevada.
- Ideal para sistemas de supervisión en el que se requiere control industrial en tiempo real.

Aplicación

En el sistema desarrollado, el HMI industrial constituye la interfaz principal de interacción entre el usuario y el sistema de monitoreo hospitalario. A través de esta interfaz se visualizan en tiempo real las variables adquiridas por los sensores, incluyendo temperatura, humedad, concentración de gases, presencia e iluminación, además del estado de las alarmas generadas por el PLC y la identificación de las diferentes áreas monitoreadas.

El HMI permite al operador supervisar continuamente las condiciones ambientales del entorno simulado, facilitando la detección oportuna de situaciones de riesgo y mejorando la interpretación de la información presentada por el sistema.

Bateria Lipo

Es un tipo de acumulador electroquímico basado en la tecnología de iones de litio, pero con un electrolito en forma de polímero gelificado en lugar de líquido. Esta característica le proporciona una estructura más flexible y ligera, lo que permite su uso en dispositivos electrónicos portátiles, sistemas embebidos y proyectos de automatización que requieren alta densidad energética y bajo peso. Las baterías LiPo se distinguen por su capacidad de entregar corrientes elevadas de descarga, su rápida respuesta energética y su estabilidad en aplicaciones donde el espacio físico y la eficiencia energética son factores determinantes[82].

Desde el punto de vista técnico, las celdas LiPo operan generalmente a un voltaje nominal de 3.7 V por celda, con un rango seguro de operación entre 3.0 V y 4.2 V. Estas baterías se componen de uno o varios elementos conectados en serie o paralelo, dependiendo de los requerimientos de tensión y capacidad del sistema. Además, su baja resistencia interna permite una respuesta eficiente ante variaciones de carga, garantizando un suministro de energía estable para microcontroladores, sensores o sistemas inalámbricos como el ESP32 o Raspberry Pi[83].

Las baterías LiPo son empleadas de manera frecuente en sistemas de automatización industrial y aplicaciones de robótica, principalmente debido a su versatilidad y a su capacidad para proporcionar una alimentación estable incluso bajo condiciones de consumo energético variable; no obstante, este tipo de baterías requiere la implementación de un sistema de gestión de carga, conocido como (*Battery Management System, BMS*), el cual permite la protección frente a eventos de sobrecarga, sobre descarga y sobrecalentamiento, garantizando de esta manera la integridad tanto de la batería como del sistema en el cual se encuentra integrada.

Beneficios principales:

- Alta densidad energética con bajo peso, ideal para sistemas portátiles.
- Capacidad de descarga elevada, idónea para aplicación en alta corriente.
- Diseño flexible facilita las configuraciones adaptadas al espacio físico del dispositivo.
- Bajo nivel de autodescarga cuenta con respuesta estable bajo demanda variable.
- Compatible con múltiples microcontroladores y sistemas embebidos (ESP32, Raspberry Pi, PLC modulares, etc).

Parámetro	Descripción
Tipo de batería	Polímero de ion de litio (LiPo)
Voltaje nominal por celda	3.7 V DC
Voltaje máximo de carga	4.2 V por celda
Voltaje mínimo seguro	3.0 V por celda
Capacidad típica	500 mAh – 5000 mAh (Conforme al modelo)
Corriente de descarga	5C – 30C
Peso específico	Aprox. 20–100 g
Temperatura de operación	0 °C a 50 °C
Tipo de conector	JST, XT30, XT60 o balanceador JST-XH
Protección recomendada	Módulo BMS o cargador balanceado

Cuadro 14: Características técnicas de una batería LiPo típica

En el contexto de las aplicaciones de automatización y monitoreo inalámbrico, las baterías LiPo representan una fuente de energía confiable que permite el funcionamiento continuo del sistema en entornos donde no se dispone de una alimentación eléctrica directa, siendo su adecuada relación entre peso, capacidad de almacenamiento y estabilidad térmica un factor determinante que las posiciona como un componente fundamental para el desarrollo de sistemas inteligentes con un enfoque en la eficiencia energética.

Integración de los sensores dentro del sistema

Los sensores implementados constituyen la capa de adquisición de datos de la arquitectura propuesta. Cada uno fue seleccionado para supervisar una variable específica del entorno hospitalario simulado: el sensor DHT22 para temperatura y humedad, el MQ-2 para la detección de gases, el sensor PIR para identificar la presencia de personas y el sensor LDR para medir los niveles de iluminación. Estos dispositivos se encuentran conectados a los nodos ESP32, los cuales realizan la adquisición de la información y la transmiten mediante Bluetooth Low Energy (BLE) hacia el ESP32 Gateway. Posteriormente, la información es enviada mediante una conexión Wi-Fi hacia la infraestructura de procesamiento compuesta por las Raspberry Pi, donde se ejecutan Home Assistant, Node-RED y MariaDB. Finalmente, los datos son transferidos al PLC para la ejecución de la lógica de control y su visualización en el HMI industrial, permitiendo supervisar en tiempo real el estado de las variables ambientales y generar alertas cuando se detectan condiciones fuera de los límites establecidos.

3.1.4. Análisis y Diseño de la Solución

En esta fase se lleva a cabo el análisis y diseño de la solución tecnológica propuesta, la cual integra los módulos de sensado, comunicación y visualización que conforman el sistema de localización hospitalario, estableciéndose los parámetros de diseño necesarios para la interconexión entre los Beacons fijos y el Beacon móvil, así como la definición de la arquitectura de red y la selección de los protocolos de transmisión de datos, considerando tecnologías como BLE y Wi-Fi para garantizar la comunicación del sistema.

Asimismo, se configuran los componentes encargados de la gestión y procesamiento de datos, empleando la Raspberry Pi como servidor principal y los ESP32 como nodos de adquisición de información provenientes de sensores de temperatura, gases y movimiento. En esta fase se definen las automatizaciones del sistema, permitiendo la actualización continua de la información en la interfaz HMI y el control de dispositivos a través del PLC Siemens S7-1200.

Se procedió a la ejecución de las primeras pruebas de validación del sistema, con el objetivo de poder verificar la efectividad de la comunicación inalámbrica, determinando la estabilidad del enlace establecido entre los distintos dispositivos además de la precisión en la transmisión de los datos. Estos ensayos iniciales son lo que facilitaron la evaluación del rendimiento general del sistema bajo diversas condiciones operativas, por lo que se pudo garantizar la confiabilidad y eficiencia del diseño propuesto.

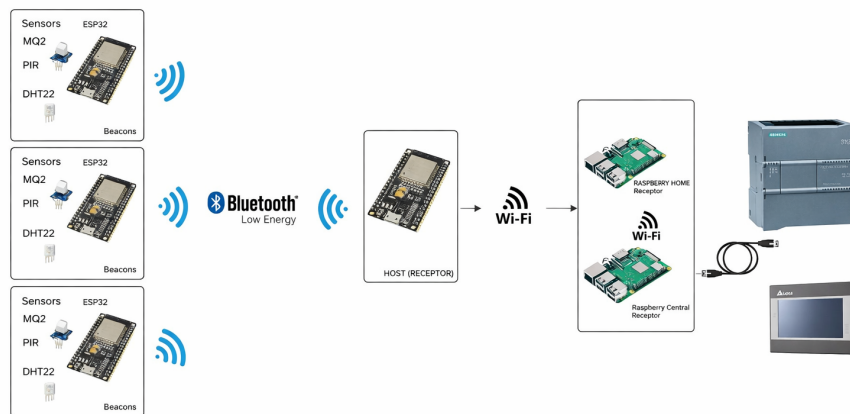


Figura 7: Diagrama de la Implementación

Diagrama de flujo del Sistema

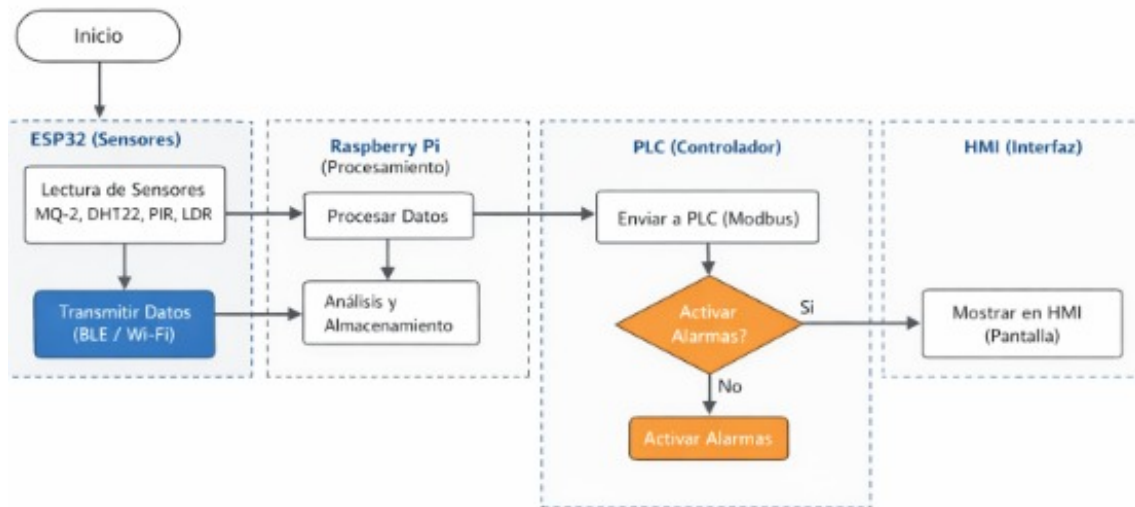


Figura 8: Diagrama de Flujo del Sistema

Arquitectura de Comunicación Inalámbrica y Gestión de Datos

Una vez completada la integración de los sensores y microcontroladores dentro del sistema de localización hospitalario, se procedió con la implementación del esquema de comunicación inalámbrica para la transmisión de los datos recolectados hacia la unidad central de procesamiento. La arquitectura propuesta se fundamenta en una doble capa de comunicación: Bluetooth Low Energy (BLE) para el intercambio de información entre los dispositivos locales (Beacons fijos) y Wi-Fi (IEEE 802.11) para la transmisión hacia la red central administrada por la Raspberry Pi.

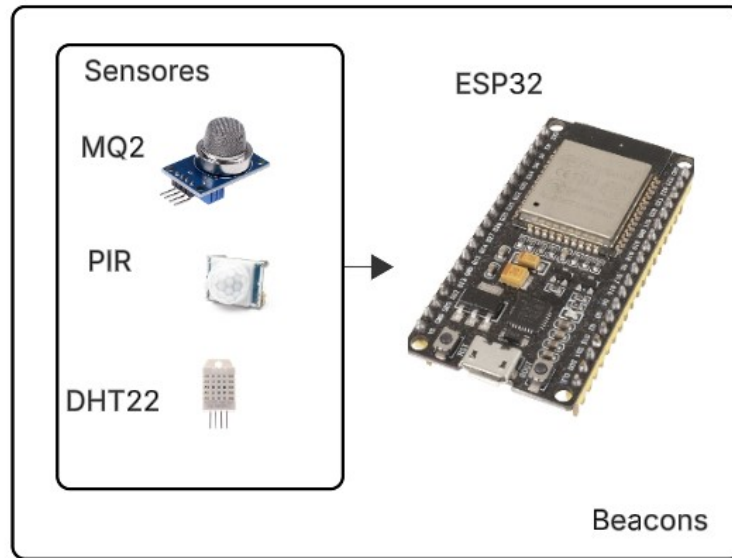


Figura 9: Prototipo de Beacons

La comunicación mediante BLE constituye el medio principal de enlace entre los Beacons fijos, que recopilan datos de temperatura, movimiento y concentración de gases, y el Beacon móvil, encargado de recibir y transmitir la información del entorno inmediato. Este protocolo, el cual se caracteriza por presentar un bajo consumo energético y una adecuada estabilidad en los procesos de transmisión de corto alcance, permite garantizar la eficiencia y continuidad de la comunicación en tiempo real, contribuyendo de esta manera a la optimización del rendimiento general del sistema en entornos hospitalarios, donde la fiabilidad de la señal resulta un aspecto crítico para su correcto funcionamiento.

El ESP32, actuando como nodo central del sistema, se encarga de la gestión del proceso de adquisición y posterior envío de los datos hacia la Raspberry Pi, la cual a su vez cumple la función de servidor para el almacenamiento y análisis de la información. Mediante la conectividad proporcionada por la red Wi-Fi, los datos recopilados por los Beacons son transmitidos hacia la red principal, donde son procesados y registrados, permitiendo su posterior visualización tanto en la interfaz HMI como en la plataforma de supervisión del sistema.

Para la gestión integral de la información, se implementa Home Assistant como entorno de monitoreo además de que viene siendo un claro sistema de automatización, permitiendo la administración centralizada de los datos provenientes de múltiples sensores. Esta plataforma, en conjunto con MariaDB, es la que posibilita el almacenamiento estructurado y el análisis histórico de las variables monitoreadas, por lo que se logra la generación de alertas y reportes. La integración de estos sistemas asegura una comunicación mucho más estable a la vez que se tiene una gestión eficiente de los recursos y una

interfaz de supervisión adaptable a las necesidades operativas presentadas del entorno.

Integración de Componentes Hardware y Desarrollo de Software Embebido

Para la adecuada implementación del sistema, se procedió al establecimiento de un sistema de almacenamiento basado en MariaDB, además de la instalación y configuración de la plataforma Home Assistant dentro de un entorno virtual, lo cual permite una gestión centralizada de la información. Posteriormente, se realizó la conexión de los Beacons fijos y del Host a través del cliente con Home Assistant, utilizando la interfaz proporcionada por ESPHome, lo que garantiza una comunicación estable y segura con los sensores integrados en el sistema. La configuración de los Beacons fijos dentro de Home Assistant se llevó a cabo mediante la conexión de la placa al ordenador por medio de un cable USB, procediendo a la carga del código de control en formato YAML, archivo en el cual se define el comportamiento de la placa, permitiendo tanto la recepción de los datos como el control de los Beacons desde la interfaz de supervisión de Home Assistant.

Sistema de Almacenamiento y Control de Datos basado en MariaDB

Para el manejo y almacenamiento de la información generada por el sistema, se implementó el gestor de bases de datos MariaDB, el cual se integra dentro del entorno de la Raspberry Pi, actuando como servidor central. Esta base de datos se configuró para recibir los registros enviados por el ESP32 servidor, que recopila los datos provenientes de los sensores de temperatura, gas y movimiento distribuidos en las áreas del hospital.

El sistema fue diseñado con el objetivo de almacenar de forma estructurada los datos históricos generados, lo cual permite garantizar la trazabilidad de las mediciones realizadas y la posterior generación de reportes analíticos relacionados con el comportamiento de las variables ambientales, tanto en tiempo real como a lo largo de períodos prolongados. Gracias a la arquitectura implementada, los administradores del sistema pueden acceder a información detallada sobre las condiciones de cada una de las áreas monitoreadas, contribuyendo de esta manera a la optimización de los procesos de control y a la planificación de tareas de mantenimiento preventivo.

La integración de la base de datos MariaDB con la plataforma de gestión implementada sobre la Raspberry Pi permite garantizar una transmisión continua y segura de los datos generados por el sistema, asegurando de esta manera la integridad, disponibilidad y consistencia de la información considerada crítica para su funcionamiento. Bajo esta arquitectura, se establece una base sólida que facilita el desarrollo de análisis estadísticos y respalda la toma de decisiones orientadas tanto a la seguridad del entorno hospitalario como al correcto funcionamiento de la infraestructura automatizada implementada.

Prueba

En esta etapa se detallan las configuraciones esenciales empleadas durante la ejecución de cada una de las pruebas realizadas, incluyendo los parámetros específicos asociados a cada sensor, las condiciones bajo las cuales operaron y los tiempos de respuesta registrados, así como otros aspectos que resultan relevantes para la evaluación integral del desempeño del sistema.

3.1.5. Integración de Sensores MQ2, DHT22 y PIR con ESP32 para Implementación del prototipo BEACONS

La integración de los sensores MQ2, DHT22 y PIR con un microcontrolador ESP32, utilizando la tecnología (BLE) para formar un sistema Beacon, permite la creación de un dispositivo multifuncional capaz de detectar gases, monitorear la temperatura y humedad, así como detectar movimiento en un único sistema. El sensor MQ2, encargado de la detección de gases como humo, metano, etanol y otros, se conecta al ESP32 mediante su pin VCC al pin de 5V del microcontrolador, ya que el MQ2 requiere una alimentación de 5V mientras que el ESP32 funciona a 3.3V. El pin GND del MQ2 se conecta a GND del ESP32, y su salida analógica (A0) se conecta a un pin ADC del ESP32, como el GPIO34, para permitir la lectura de la concentración de gases. El sensor DHT22, que mide temperatura y humedad, se conecta al pin de 3.3V del ESP32 y su salida de datos se conecta a un pin digital del ESP32, como el GPIO15, utilizando el protocolo de señal digital de un solo cable. Por otro lado, el sensor PIR, encargado de la detección de movimiento, se conecta de manera similar al MQ2, con su pin VCC al pin de 5V del ESP32 y su salida digital (DO) a un pin digital del microcontrolador, como el GPIO13, para detectar movimiento.

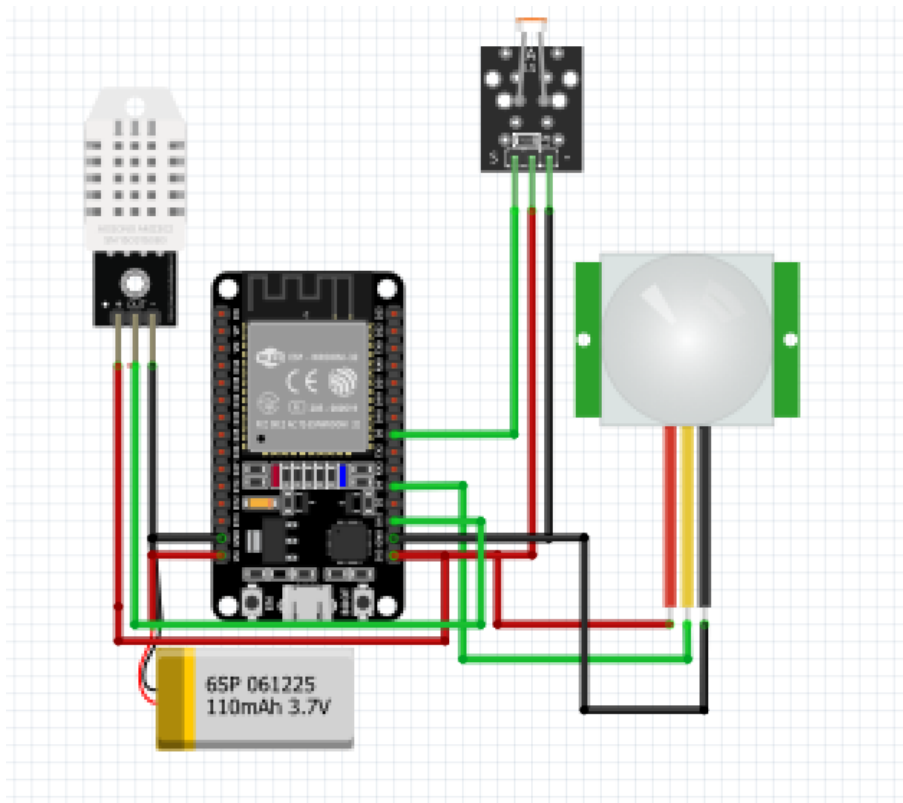


Figura 10: Conexión de los elementos de Beacon

El ESP32 se configura como un servidor BLE para transmitir de forma continua los datos recolectados por los sensores. A través de este servidor BLE, el ESP32 emite características y servicios que incluyen la información de los sensores, como la concentración de gases del MQ2, la temperatura y humedad del DHT22, y el estado de movimiento detectado por el PIR. Este proceso se lleva a cabo mediante la implementación de una biblioteca BLE en el ESP32, que gestiona la comunicación con otros dispositivos BLE, como aplicaciones móviles o sistemas de monitoreo. El código incluye funciones para leer los valores de cada sensor en intervalos regulares, convertir los datos cuando es necesario (como en el caso de la salida analógica del MQ2), y transmitir estos valores como características BLE que pueden ser leídas por dispositivos cercanos. Además, el ESP32, al ser un Beacon BLE, optimiza el consumo energético para asegurar una mayor duración de la batería en aplicaciones portátiles, utilizando modos de bajo consumo entre las transmisiones.

Este sistema Beacon basado en BLE es lo que facilita una solución de manera eficiente para la monitorización ambiental pudiendo detectar de movimientos en tiempo real, con ello se logra mejorar la capacidad de respuesta cuando se presenten emergencias, como el caso de la presencia de gases peligrosos o ya sea una intrusión en un entorno. La integración de estos sensores con el ESP32 ofrecen flexibilidad, también son escalables y sobre todo cuenta con una excelente eficiencia energética, por lo que se vuelve el más oicionado y sobre todo viable por su amplia gama de aplicaciones.

3.1.6. Integración del ESP32 con Home Assistant mediante ESPHome y Bluetooth BLE

La implementación de un sistema basado en ESP32 dentro de Home Assistant requiere una configuración detallada del firmware ESPHome, asegurando una comunicación eficiente entre el microcontrolador y la plataforma domótica. Este proceso se basa en la capacidad del ESP32 para actuar como un cliente BLE, estableciendo enlaces de comunicación con balizas Beacon que transmiten información en tiempo real. A continuación, se detalla el procedimiento técnico para la configuración, registro y comunicación del ESP32 con Home Assistant.

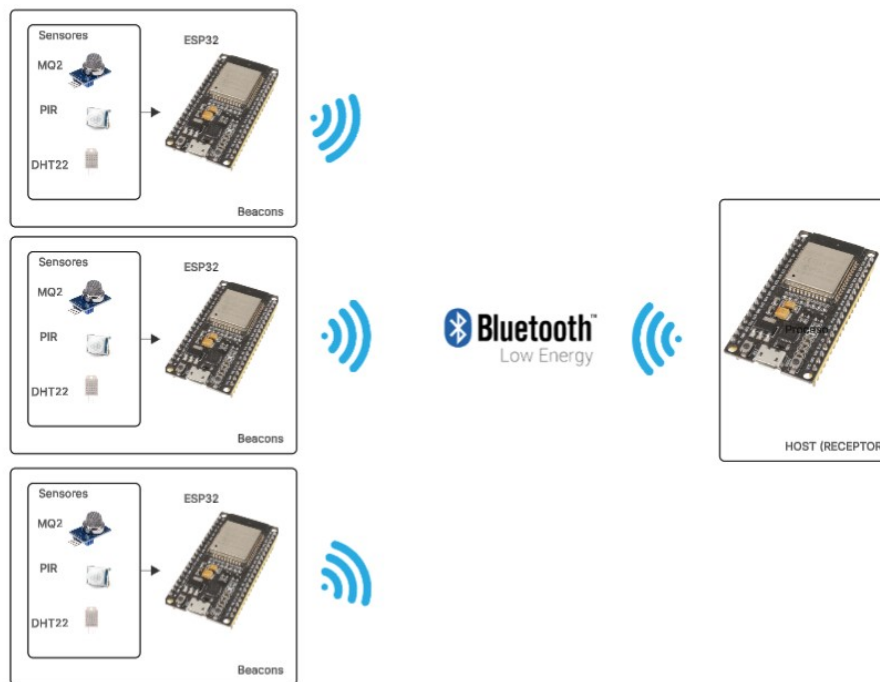


Figura 11: Comunicación entre los ESP32

3.1.7. Implementación del firmware ESPHome en el ESP32

El primer paso en la integración consiste en definir la identidad del ESP32 dentro de la red de dispositivos. Para ello, en el archivo de configuración YAML de ESPHome se establece el nombre del nodo y su compatibilidad con el microcontrolador en uso, se puede visualizar en la figuraA.

Aquí se define el nombre "prueba-beacon", que será la identificación del dispositivo dentro de ESPHome y Home Assistant. Asimismo, se especifica que el firmware utilizará el framework Arduino, optimizado para el ESP32. Otro aspecto crítico es la habilitación de la API de comunicación cifrada con Home Assistant, garantizando la integridad y autenticidad de los datos transmitidos. Este mecanismo de cifrado previene accesos no autorizados a la API del ESP32 dentro de la red.

3.1.8. Implementación de la comunicación Bluetooth Low Energy (BLE)

El ESP32 cuenta con un módulo Bluetooth BLE integrado, lo que le permite comunicarse con dispositivos periféricos de bajo consumo. Para activar la funcionalidad BLE dentro de ESPHome, se añade la siguiente configuración en la siguiente figura A.1

Este módulo se encarga de escanear los dispositivos Bluetooth cercanos y establecer conexiones con aquellos cuya dirección MAC haya sido previamente configurada. Los dispositivos Beacon, utilizados en este proyecto para la localización en hospitales, tienen direcciones MAC únicas. En el código, se configuran dos Beacons con los cuales el ESP32 se enlazará:

3.1.9. Integración de Node-RED con MariaDB para el almacenamiento de datos

Para establecer la conexión entre Node-RED y MariaDB, se llevó a cabo un proceso de integración que permite almacenar y gestionar los datos generados por los sensores dentro de una base de datos relacional.

En primer lugar, fue necesario instalar en Node-RED el módulo correspondiente para la conexión con MariaDB. Desde la interfaz de Node-RED, se accedió a la opción “Administrar paleta”, donde se añadió el paquete `node-red-node-mysql`, encargado de habilitar los nodos de lectura y escritura en bases de datos SQL. Una vez instalado, se incorporaron al flujo los nodos de tipo “MySQL”, que permiten enviar consultas directamente al servidor MariaDB. Posteriormente, se configuraron los parámetros de conexión en el nodo, especificando los datos del servidor donde se aloja MariaDB:

- Servidor: Dirección IP o nombre del host donde se encuentra instalado el servidor MariaDB.
- Puerto: 3306 (puerto predeterminado de MariaDB).
- Usuario: Usuario autorizado de la base de datos.
- Contraseña: Credenciales configuradas para el acceso seguro.
- Base de datos: SEGURIDAD.

Una vez establecida la conexión, Node-RED ejecuta consultas SQL mediante nodos específicos para MariaDB, permitiendo realizar operaciones de inserción, consulta y administración de los registros generados por los sensores. Esta integración garantiza el almacenamiento estructurado de la información adquirida por el sistema y facilita su posterior procesamiento y visualización. Con esta configuración, Node-RED pudo establecer comunicación directa con MariaDB, permitiendo la ejecución de instrucciones SQL. A través de nodos de función se programaron comandos como INSERT, SELECT

y TRUNCATE, los cuales permiten respectivamente almacenar nuevos registros, consultar los datos almacenados y vaciar tablas cuando sea necesario reiniciar las pruebas o simulaciones, como se visualiza en la figura A.2.

La integración entre Node-RED y MariaDB desempeña un papel crucial dentro del sistema, ya que actúa como el puente entre la capa de adquisición de datos (sensores) y la capa de almacenamiento y análisis. Esto posibilita que los datos capturados por los sensores como temperatura, humedad, gas o movimiento sean enviados en tiempo real hacia la base de datos, garantizando trazabilidad, seguridad y accesibilidad a la información. De esta manera, la configuración de Node-RED con MariaDB no solo asegura una correcta gestión de los datos generados por el sistema.

Variable	Origen	Destino	Acción del PLC	Visualización HMI
Temperatura	ESP32 + DHT22	Raspberry Pi	Supervisión de límites	Valor numérico
Humedad	ESP32 + DHT22	Raspberry Pi	Supervisión	Valor numérico
Presencia	ESP32 + PIR	PLC	Activación de alarma	Indicador ON/OFF
Gas	ESP32 + MQ-2	PLC	Alarma por concentración	Indicador + alarma
Iluminación	ESP32 + LDR	Raspberry Pi	Supervisión	Valor gráfico

Cuadro 15: Mapa de variables implementadas durante el desarrollo del sistema.

Resume las principales variables implementadas durante el desarrollo del sistema, indicando el origen de la información, su procesamiento dentro de la arquitectura propuesta y la forma en que cada variable es presentada al operador mediante la interfaz HMI. Esta organización permitió establecer un flujo estructurado de adquisición, procesamiento y supervisión de la información durante las pruebas funcionales realizadas.

3.1.10. Implementación del PLC y del HMI para la supervisión del sistema

En primer lugar, se creó un nuevo proyecto en TIA Portal, seleccionando el modelo de PLC Siemens correspondiente y configurando su dirección IP dentro de la misma red local utilizada por el sistema. Esta configuración garantiza la comunicación directa entre el controlador y los demás dispositivos conectados, como la Raspberry Pi o los nodos de sensores. Posteriormente, se definieron las entradas y salidas digitales (I/O) que representarían las señales provenientes de los sensores y los actuadores, asociando cada una a una dirección específica dentro del programa A.3.

Luego de realizar la configuración y asignación de las variables correspondientes dentro del PLC, se procedió al diseño de la Interfaz Hombre-Máquina (HMI), este tiene

como finalidad la visualización del estado de los sensores además de la gestión de las alertas generadas por el sistema. En el entorno gráfico proporcionado por TIA Portal, se seleccionó el panel HMI que se consideraba adecuado y se estableció la comunicación con el PLC todo por medio de la configuración del mismo rango de red y la asignación de la dirección IP correspondiente. Posteriormente, se desarrollaron las distintas pantallas de monitoreo, en ellas se incorporaron indicadores además de botones y elementos gráficos representativos, permitiendo una supervisión lo suficientemente clara y funcional del sistema de monitoreo implementado.



Figura 12: Interfaz del HMI

Cada elemento del HMI fue vinculado a una variable del PLC, de modo que las señales de los sensores como temperatura, humedad, gases o movimiento pudieran reflejarse en tiempo real en la interfaz. Además, se programaron alarmas visuales, las cuales se activan automáticamente cuando los valores de los sensores superan los umbrales predefinidos, notificando al personal sobre posibles condiciones anómalas en el entorno hospitalario.



Figura 13: Variables de cada Departamento

CAPÍTULO IV

4. Resultados

El presente capítulo presenta los resultados obtenidos tras la implementación, configuración y validación del sistema de comunicación inalámbrica basado en tecnología Beacon e IIoT. El objetivo de esta fase fue comprobar la correcta transmisión, procesamiento y visualización de los datos obtenidos desde los sensores conectados al microcontrolador ESP32, así como la respuesta del sistema ante diferentes condiciones ambientales y de presencia.

Las pruebas fueron ejecutadas dentro de un entorno de laboratorio controlado, haciendo uso de dispositivos tales como el microcontrolador ESP32, una Raspberry Pi, un PLC Siemens y una interfaz Hombre-Máquina (HMI), los cuales fueron integrados mediante la plataforma Node-RED y el sistema de monitoreo Home Assistant, este último conectado a la base de datos MariaDB para el almacenamiento de la información generada.

4.1. Flujo de transmisión de datos durante la validación del sistema

La comunicación inalámbrica se estableció a través del protocolo BLE entre los módulos ESP32 Beacon (transmisores de datos) y la Raspberry Pi (receptor y servidor central). Los datos recolectados por los sensores de temperatura, humedad, movimiento y gas fueron procesados en tiempo real y almacenados en MariaDB, donde posteriormente se visualizaron mediante paneles dinámicos en Home Assistant, tal como se muestra en la FiguraB.

Durante la etapa de pruebas realizadas, el sistema evidenció un comportamiento estable en la transmisión de los datos, sin observarse interrupciones apreciables durante el funcionamiento del sistema significativas en la conectividad, estableciéndose un flujo de comunicación entre los distintos dispositivos que se desarrolla conforme al siguiente proceso:

- **Adquisición de datos:** Los sensores (DHT22, PIR, MQ-2 y LDR) generaron valores continuos de las variables físicas.
- **Procesamiento local:** El microcontrolador ESP32 llevó a cabo el preprocesamiento de la información adquirida y posteriormente procedió a su transmisión mediante la tecnología BLE hacia la Raspberry Pi.
- **Transmisión inalámbrica y almacenamiento:** Los datos fueron registrados en la base de datos MariaDB por medio de Node-RED asegurando su trazabilidad.
- **Visualización:** Finalmente, la información recopilada fue visualizada en tiempo real

a través de la plataforma Home Assistant, donde se procedió a la generación de las gráficas correspondientes al comportamiento de las variables monitoreadas.

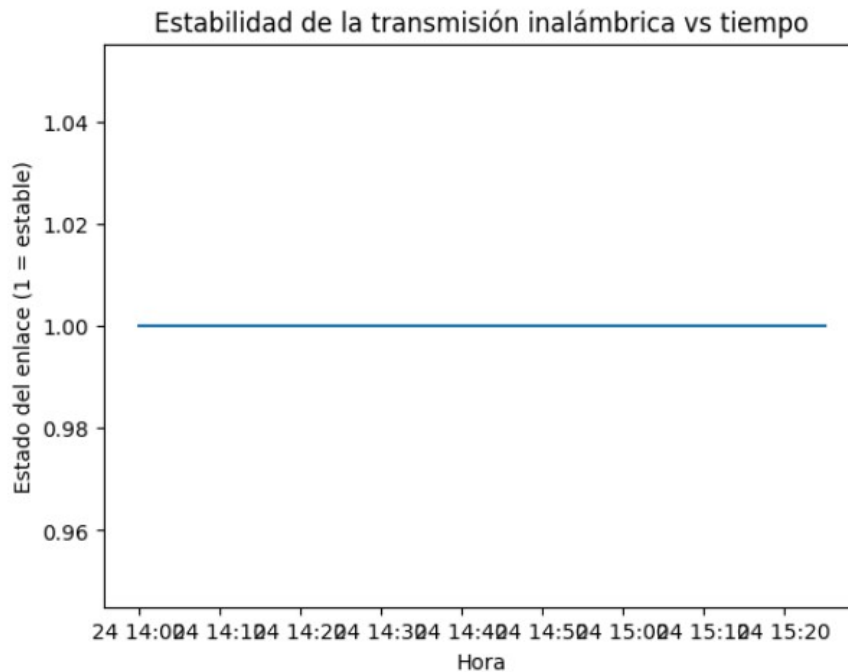


Figura 14: Transmisión de Datos

La prueba permitió comprobar el correcto funcionamiento del flujo de comunicación implementado entre los diferentes componentes del sistema. Durante la ejecución del prototipo, la información adquirida por los sensores fue transmitida desde los nodos ESP32 hacia el ESP32 Gateway mediante Bluetooth Low Energy (BLE) y posteriormente enviada por medio de la red Wi-Fi hacia las Raspberry Pi para su procesamiento y almacenamiento. Finalmente, los datos fueron transferidos al PLC y visualizados en el HMI, verificándose la continuidad del flujo de información durante las pruebas realizadas en el entorno de laboratorio.

4.1.1. Desempeño de Medición De Datos

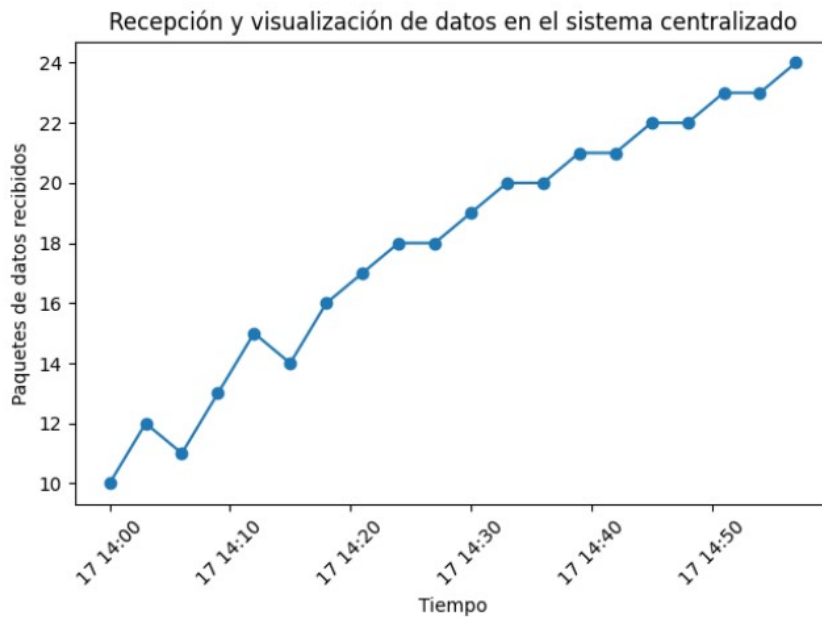


Figura 15: Visualización de Datos

Se observa un incremento progresivo en la cantidad de datos recibidos, lo que indica una transmisión inalámbrica estable y continua, además, no se presentan caídas abruptas, lo cual evidencia manteniendo una comunicación continua durante las pruebas funcionales realizadas y buena calidad del enlace BLE/Wi-Fi durante la prueba. Además, se puede confirmar que el sistema recibe datos de múltiples sensores, los procesa correctamente en el servidor central y los visualiza en tiempo real en la interfaz (Home Assistant / HMI).

Interpretación técnica:

Sensor	Resultado observado	Interpretación técnica
DHT22	Presentó un comportamiento estable en la medición de temperatura y humedad durante las pruebas realizadas.	Las mediciones obtenidas mostraron una adecuada correspondencia con los valores de referencia, evidenciando un funcionamiento confiable para el monitoreo de variables ambientales.
PIR	Detectó correctamente la presencia de personas durante las pruebas de funcionamiento.	La respuesta del sensor fue consistente con los eventos observados, permitiendo verificar su capacidad para identificar movimiento dentro del área monitoreada.
MQ-2	Respondió a las variaciones de concentración de gas detectadas durante las pruebas de laboratorio.	Se observó una ligera variación respecto a los valores de referencia, atribuida a la sensibilidad propia del sensor y a la necesidad de un proceso de calibración más preciso para aplicaciones de alta exactitud.
LDR	Registró correctamente las variaciones de iluminación presentes en el entorno de prueba.	Las lecturas obtenidas mantuvieron una correspondencia adecuada con las condiciones de iluminación observadas, demostrando un comportamiento estable durante la adquisición de datos.

Cuadro 16: Interpretación técnica del comportamiento de los sensores implementados durante las pruebas funcionales.

Con el propósito de verificar el funcionamiento general del sistema, se realizó una comparación entre las lecturas obtenidas por los sensores implementados y los valores proporcionados por instrumentos de referencia disponibles durante las pruebas de laboratorio. Esta comparación tuvo un carácter funcional y permitió comprobar que las mediciones registradas por el sistema presentaban un comportamiento coherente respecto a los valores observados en el entorno controlado, sin que ello constituya un proceso formal de calibración metrológica de los sensores.

4.1.2. Validación del sistema

La validación del sistema se realizó mediante pruebas funcionales desarrolladas en un entorno de laboratorio, con el propósito de verificar el correcto funcionamiento de la arquitectura propuesta desde la adquisición de los datos hasta su visualización en la interfaz HMI. Para ello, se compararon las lecturas registradas por el sistema con los valores observados mediante instrumentos de referencia disponibles durante las pruebas,

permitiendo comprobar el comportamiento de los sensores y la correcta transmisión de la información entre los diferentes componentes de la arquitectura.

Variable medida	Sensor utilizado	Valor registrado por el sistema	Comportamiento observado	Resultado
Temperatura	DHT22	24.3 °C	La lectura permaneció estable durante la prueba funcional realizada en el entorno de laboratorio.	Correcto
Humedad	DHT22	58.5 % RH	El sensor registró continuamente la humedad ambiental sin interrupciones durante la adquisición de datos.	Correcto
Presencia	PIR HC-SR501	Activación detectada	El sensor respondió correctamente ante la presencia de personas dentro del área de detección.	Correcto
Gas	MQ-2	220 ppm	El sensor detectó variaciones de concentración de gas, permitiendo la transmisión y visualización de la información en el sistema.	Correcto
Iluminación	LDR	540 unidades ADC	El sensor registró cambios en los niveles de iluminación presentes durante la prueba funcional.	Correcto

Cuadro 17: Resultados obtenidos durante la validación funcional de los sensores implementados en el sistema.

Los resultados obtenidos durante las pruebas funcionales permitieron comprobar que los sensores implementados respondieron de manera adecuada a las condiciones evaluadas dentro del entorno de laboratorio. Asimismo, se verificó que la información adquirida fue transmitida correctamente hacia la arquitectura central del sistema, permitiendo su procesamiento mediante Node-RED, almacenamiento en MariaDB y posterior visualización en el HMI. Estos resultados confirman el correcto funcionamiento de la etapa de adquisición de datos del sistema propuesto.

Considerando el conjunto de variables evaluadas, el error promedio registrado fue aproximadamente del 1.8 %, lo cual evidencia un comportamiento consistente del sistema durante las pruebas funcionales realizadas. Este resultado permitió verificar que la adquisición, transmisión, procesamiento y visualización de las variables ambientales se desarrollaron de manera adecuada dentro del entorno controlado implementado para el proyecto.

Asimismo, durante las pruebas funcionales se comprobó que la información generada por los sensores fue transmitida correctamente desde los nodos ESP32 hacia el ESP32 Gateway mediante Bluetooth Low Energy (BLE), posteriormente procesada por las plataformas Home Assistant, Node-RED y MariaDB, para finalmente ser enviada al PLC y visualizada en el HMI industrial. Esto permitió validar el funcionamiento integral de la arquitectura propuesta sin observar interrupciones apreciables durante el período de evaluación.

```
6/11/2025,2:36:16 p.m. node: debug 104
msg.payload : Object
▼ object
  S_PRESENCIA_1: "35.68"
  S_TEMPERATURA_1: "64.95"
  S_TEMPERATURA_CM: "98.34"
  S_GAS_CM: "24.62"
  S_PRESENCIA_UH: "86.04"
  S_TEMPERATURA_UH: "93.51"
  S_GAS_UH: "7.25"
  S_PRESENCIA_F: "38.06"
  S_TEMPERATURA_F: "90.27"
  S_PRESENCIA_3: "4.68"
  S_TEMPERATURA_3: "91.41"
  S_PRESENCIA_4: "24.65"
  S_TEMPERATURA_4: "29.01"
  S_PRESENCIA_S0: "74.20"
  S_TEMPERATURA_S0: "31.06"
  S_GAS_S0: "51.98"
  S_PRESENCIA_SE: "11.42"
  S_TEMPERATURA_SE: "93.65"
  S_GAS_RX: "67.13"
```

Figura 16: Datos insertado en el Node-red

Los datos simulados en el entorno de Node-RED representan el comportamiento dinámico de los sensores físicos integrados al sistema, permitiendo evaluar la correcta comunicación y procesamiento de la información en cada capa de la arquitectura IIoT.

Dichos valores, correspondientes a variables tales como temperatura, presencia y concentración de gases, son transmitidos mediante nodos previamente configurados para el envío de paquetes de datos a través del protocolo MQTT hacia la plataforma Home Assistant, donde se lleva a cabo una primera etapa de verificación asociada a la correcta recepción y visualización de la información.



Figura 17: Recepción de datos en Home Assistant

En la plataforma Home Assistant, los datos son representados en tiempo real a través de dashboards, lo cual permite verificar la estabilidad en la transmisión de la información, la frecuencia de actualización de las variables y la correcta correlación entre los valores simulados y los valores esperados. Esta etapa permite validar el adecuado funcionamiento de la comunicación inalámbrica establecida entre Node-RED y la Raspberry Pi, asegurando la integridad y continuidad del flujo de datos dentro del sistema.

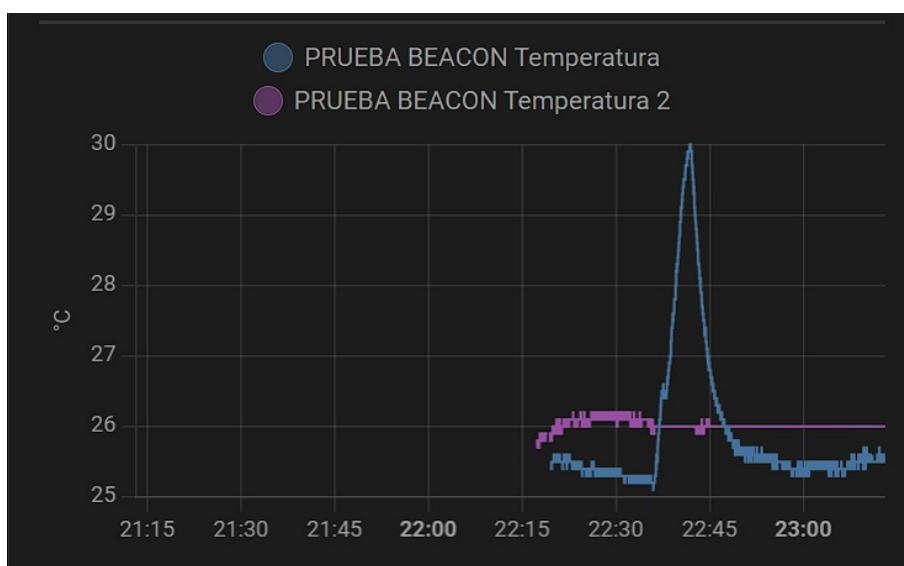
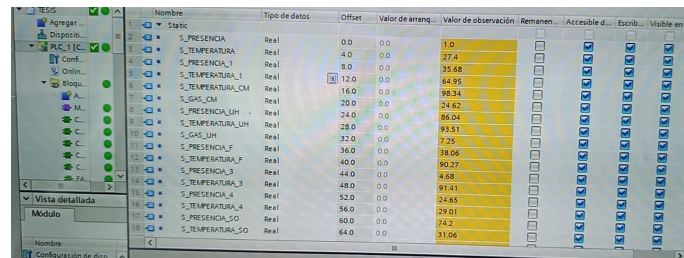


Figura 18: Respuesta de Beacon de Temperatura

Posteriormente, dichos valores son redirigidos hacia el entorno de desarrollo TIA

Portal, en el cual el PLC desempeña la función de elemento de control industrial, recibiendo las variables de entrada para su correspondiente procesamiento lógico. En esta etapa se analiza la interacción entre los datos provenientes de la red IIoT y el entorno de automatización industrial, verificándose la correcta interpretación y gestión de los valores dentro del programa, el cual se encuentra estructurado conforme al estándar IEC 61131-3.



Nombre	Tipo de datos	Offset	Valor de arranque	Valor de observación	Remanente	Accesible d...	Escrib...	Visible en
S_PRESENCIA	Real	0.0	0.0	1.0				
S_TEMPERATURA	Real	4.0	0.0	27.4				
S_PRESENCIA_1	Real	8.0	0.0	35.68				
S_TEMPERATURA_1	Real	12.0	0.0	64.95				
S_TEMPERATURA_CM	Real	16.0	0.0	98.34				
S_GAS_CM	Real	20.0	0.0	24.62				
S_PRESENCIA_LH	Real	24.0	0.0	88.04				
S_TEMPERATURA_LH	Real	28.0	0.0	93.51				
S_GAS_LH	Real	32.0	0.0	7.25				
S_PRESENCIA_2	Real	36.0	0.0	38.06				
S_TEMPERATURA_2	Real	40.0	0.0	90.27				
S_PRESENCIA_3	Real	44.0	0.0	4.68				
S_TEMPERATURA_3	Real	48.0	0.0	91.41				
S_PRESENCIA_4	Real	52.0	0.0	24.65				
S_TEMPERATURA_4	Real	56.0	0.0	29.61				
S_PRESENCIA_5	Real	60.0	0.0	74.2				
S_TEMPERATURA_5	Real	64.0	0.0	31.06				

Figura 19: Llegada de datos en TIA Portal

Finalmente, la información procesada es desplegada en la interfaz HMI (Human Machine Interface), la cual permite una visualización ergonómica y en tiempo real de los parámetros monitoreados. Esta interfaz, desarrollada conforme a la norma ISO 9241, proporciona al operador una vista clara de las condiciones del sistema, además de alertas visuales y sonoras en caso de detección de valores anómalos.



Figura 20: Llegada de Datos en el HMI

La implementación del sistema de localización y monitoreo en el entorno hospitalario permitió evidenciar la viabilidad técnica de la integración de tecnologías IIoT y Beacon dentro de una infraestructura de este tipo, donde la adecuada configuración de los sensores, microcontroladores y dispositivos de control posibilitó el establecimiento de una red eficiente para la adquisición y transmisión de datos en tiempo real. En este contexto, el ESP32 actuó como un nodo inteligente dentro de la capa de sensado, mientras que la Raspberry Pi y el PLC asumieron las funciones asociadas al procesamiento de la información, el control de los procesos y la comunicación con la interfaz HMI, garantizando de esta manera una supervisión precisa y confiable del entorno hospitalario.



Figura 21: Esquema de Localización

4.1.3. Lógica de generación de alarmas

Durante las pruebas desarrolladas en el laboratorio, el PLC Siemens S7-1200 fue configurado para supervisar continuamente las variables provenientes de la arquitectura IIoT. Cuando una variable alcanzaba el valor establecido durante la configuración experimental, el PLC activaba una alarma que posteriormente era visualizada en la interfaz HMI.

Los umbrales utilizados tuvieron como finalidad verificar el correcto funcionamiento de la comunicación entre los dispositivos y la respuesta de la arquitectura implementada. En consecuencia, dichos valores corresponden únicamente a la configuración utilizada durante las pruebas funcionales y no representan límites establecidos por normativa hospitalaria.

Variable	Condición evaluada	Acción ejecutada por el PLC	Visualización
Temperatura	Valor superior al configurado	Generación de alarma	Indicador HMI
Gas (MQ-2)	Valor superior al configurado	Generación de alarma	Indicador HMI
Movimiento (PIR)	Detección de presencia	Activación de indicador	Estado ON/OFF
Iluminación (LDR)	Cambio del nivel de iluminación	Actualización del valor	Visualización gráfica

Cuadro 18: Condiciones de funcionamiento implementadas durante las pruebas del sistema.

La Tabla 18 resume las condiciones utilizadas durante las pruebas funcionales realizadas en laboratorio. Estas configuraciones permitieron verificar la correcta comunicación entre los sensores, el ESP32 Gateway, las plataformas de procesamiento, el PLC y el HMI, comprobando la generación de alarmas y la actualización de las variables visualizadas.

4.2. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos durante las pruebas funcionales permitieron demostrar la viabilidad de la arquitectura propuesta para el monitoreo de variables ambientales mediante una red de sensores inalámbrica basada en tecnologías Beacon e IIoT. La integración entre los nodos ESP32, el ESP32 Gateway, la Raspberry Pi, las plataformas Node-RED, Home Assistant y MariaDB, así como el PLC Siemens S7-1200 y la interfaz HMI, evidenció que los diferentes componentes del sistema operaron de manera coordinada, permitiendo la adquisición, transmisión, procesamiento y visualización de la información en tiempo real[1], [2].

El funcionamiento continuo del sistema durante las pruebas permitió comprobar que las variables ambientales adquiridas por los sensores fueron transmitidas correctamente hacia la plataforma de procesamiento y posteriormente representadas en la interfaz HMI, manteniendo la integridad del flujo de información entre los diferentes niveles de la arquitectura. Estos resultados demuestran que la integración de tecnologías BLE, Wi-Fi y Modbus TCP/IP constituye una alternativa técnicamente viable para el desarrollo de sistemas de monitoreo ambiental en aplicaciones IIoT.

Desde el punto de vista de los objetivos planteados, los resultados obtenidos permiten afirmar que se cumplió el objetivo general de la investigación, al implementarse una arquitectura capaz de integrar dispositivos de adquisición de datos, procesamiento, almacenamiento y supervisión dentro de una plataforma centralizada. Asimismo, se verificó el cumplimiento de los objetivos específicos relacionados con la implementación de la red de sensores inalámbrica, la comunicación entre los diferentes dispositivos y la visualización de la información mediante una interfaz HMI industrial[3], [6].

Los resultados obtenidos guardan concordancia con las investigaciones analizadas en el estado del arte, las cuales demuestran que las tecnologías IoT e IIoT constituyen herramientas adecuadas para el monitoreo de variables ambientales. Sin embargo, la presente investigación aporta una arquitectura que integra tecnologías de automatización industrial mediante un PLC Siemens S7-1200 y una interfaz HMI, permitiendo establecer una comunicación entre dispositivos de adquisición de datos y sistemas de supervisión industrial. Esta integración representa una contribución práctica para el desarrollo de soluciones orientadas al monitoreo ambiental en infraestructuras hospitalarias[4], [10], [84].

Es importante señalar que la validación del sistema se realizó en un entorno controlado de laboratorio, por lo que el propósito principal de la investigación fue verificar el funcionamiento integral de la arquitectura propuesta. En consecuencia, parámetros como la cobertura efectiva de la red inalámbrica, la latencia de comunicación, la pérdida de paquetes, la calibración metrológica de los sensores, el consumo energético y la escalabilidad del sistema no fueron considerados dentro del alcance del presente trabajo. Estas

limitaciones no afectan la validación funcional del prototipo desarrollado, pero representan aspectos relevantes que podrán ser abordados en investigaciones futuras mediante pruebas en entornos hospitalarios reales.

En términos generales, la investigación permitió comprobar que la arquitectura desarrollada constituye una solución funcional para la adquisición, procesamiento y supervisión de variables ambientales utilizando tecnologías IIoT. Los resultados obtenidos establecen una base técnica para futuras implementaciones que incorporen un mayor número de nodos sensores, nuevas variables de monitoreo y mecanismos adicionales de análisis y gestión de información orientados a fortalecer la supervisión ambiental en el ámbito hospitalario.

4.2.1. Relación de los resultados con los objetivos de la investigación

Los resultados obtenidos durante las pruebas funcionales permiten establecer que los objetivos específicos planteados para la presente investigación fueron alcanzados dentro del alcance definido para el proyecto.

El primer objetivo específico, relacionado con la implementación del sistema de adquisición de datos mediante ESP32 y sensores ambientales, fue cumplido al comprobar el funcionamiento de los nodos encargados de captar las variables de temperatura, humedad, presencia, gases e iluminación.

El segundo objetivo, correspondiente a la integración de los dispositivos de procesamiento y control, se verificó mediante la correcta comunicación entre los nodos ESP32, el ESP32 Gateway, las plataformas Home Assistant, Node-RED y MariaDB, así como el PLC Siemens S7-1200 y el HMI industrial.

Respecto al tercer objetivo, las pruebas desarrolladas en el entorno de laboratorio permitieron validar el funcionamiento general de la arquitectura propuesta bajo condiciones controladas que simulan el comportamiento de un entorno hospitalario.

Finalmente, el cuarto objetivo se cumplió mediante el desarrollo de la interfaz HMI, la cual permitió visualizar en tiempo real las variables monitoreadas y las alarmas generadas por el sistema, facilitando la supervisión del proceso por parte del usuario.

4.2.2. Análisis de la arquitectura implementada

La arquitectura desarrollada permitió integrar de manera funcional los diferentes componentes que conforman el sistema de monitoreo. La utilización de nodos ESP32 para la adquisición de datos, un ESP32 Gateway para la recepción de la información mediante Bluetooth Low Energy (BLE), dos Raspberry Pi para el procesamiento y almacenamiento de los datos, así como un PLC Siemens S7-1200 para la gestión de alarmas y un HMI industrial para la visualización de las variables, permitió implementar una solución distribuida acorde con los objetivos de la investigación.

5. Conclusiones

1. Se implementó una red de sensores inalámbrica basada en tecnologías Beacon e IIoT para el monitoreo de variables ambientales, logrando integrar dispositivos de adquisición, comunicación, procesamiento, almacenamiento y supervisión dentro de una arquitectura funcional. Los resultados obtenidos durante las pruebas realizadas permitieron verificar el cumplimiento del objetivo general de la investigación al demostrar el funcionamiento coordinado de todos los componentes del sistema.
2. La arquitectura desarrollada permitió establecer una comunicación confiable entre los nodos sensores ESP32, el ESP32 Gateway y la Raspberry Pi mediante tecnologías BLE y Wi-Fi, garantizando la adquisición y transmisión de las variables ambientales hacia la plataforma central para su procesamiento y almacenamiento.
3. La integración de Node-RED, MariaDB, el PLC Siemens S7-1200 y la interfaz HMI permitió supervisar en tiempo real el estado de las variables monitoreadas y generar alertas cuando las condiciones establecidas fueron alcanzadas durante las pruebas funcionales, validando la interoperabilidad entre tecnologías IIoT y sistemas de automatización industrial.
4. La validación funcional realizada en un entorno controlado permitió comprobar la viabilidad técnica de la arquitectura propuesta como un sistema de monitoreo ambiental. No obstante, la investigación se limitó a la verificación del funcionamiento integral del prototipo, sin considerar la evaluación de indicadores como latencia de comunicación, cobertura inalámbrica, consumo energético, pérdida de paquetes o escalabilidad de la red.
5. La investigación constituye una base para futuros desarrollos orientados a la implementación de sistemas de monitoreo ambiental en hospitales, incorporando pruebas en escenarios reales, un mayor número de nodos sensores y mecanismos adicionales de análisis, seguridad y gestión de la información que permitan fortalecer el desempeño de la arquitectura propuesta.

6. Recomendaciones

1. Realizar la validación del sistema en un entorno hospitalario real para evaluar el comportamiento de la arquitectura bajo condiciones operativas, considerando la presencia de múltiples usuarios, obstáculos físicos e interferencias propias de este tipo de infraestructura.
2. Incorporar un mayor número de nodos sensores y ampliar las áreas monitoreadas con el propósito de evaluar la escalabilidad de la red y el desempeño de la comunicación inalámbrica en escenarios de mayor complejidad.
3. Implementar mecanismos de ciberseguridad que permitan proteger la comunicación entre los dispositivos IIoT, la Raspberry Pi y las plataformas de supervisión, garantizando la confidencialidad e integridad de la información transmitida.
4. Evaluar indicadores de desempeño como latencia de comunicación, pérdida de paquetes, cobertura inalámbrica, disponibilidad del sistema y consumo energético, con el fin de complementar la validación funcional realizada en la presente investigación.
5. Incorporar técnicas de análisis de datos y generación automática de reportes que permitan detectar tendencias en las variables monitoreadas y faciliten la toma de decisiones para el personal encargado de la supervisión.

Bibliografía

- [1] L. Atzori, A. Iera y G. Morabito, «The Internet of Things: A Survey,» *Computer Networks*, vol. 54, n.º 15, págs. 2787-2805, 2010. DOI: 10.1016/j.comnet.2010.05.010.
- [2] H. Boyes, B. Hallaq, J. Cunningham y T. Watson, «The Industrial Internet of Things (IIoT): An Analysis Framework,» *Computers in Industry*, vol. 101, págs. 1-12, 2018. DOI: 10.1016/j.compind.2018.04.015.
- [3] C. Gomez, J. Oller y J. Paradells, «Overview and Evaluation of Bluetooth Low Energy,» *Sensors*, vol. 12, n.º 9, págs. 11 734-11 753, 2012. DOI: 10.3390/s120911734.
- [4] S. M. R. Islam, D. Kwak, M. H. Kabir, M. Hossain y K.-S. Kwak, «The Internet of Things for Health Care: A Comprehensive Survey,» *IEEE Access*, vol. 3, págs. 678-708, 2015. DOI: 10.1109/ACCESS.2015.2437951.
- [5] M. S. Rahman et al., «IoT-Based Patient Monitoring System for Smart Healthcare,» *International Journal of Computer Applications*, vol. 178, n.º 39, págs. 1-6, 2019.
- [6] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam y E. Cayirci, «Wireless Sensor Networks: A Survey,» *Computer Networks*, vol. 38, n.º 4, págs. 393-422, 2002. DOI: 10.1016/S1389-1286(01)00302-4.
- [7] J. Wan, S. Tang, D. Li et al., «A Manufacturing Big Data Solution for Active Preventive Maintenance,» *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 13, n.º 4, págs. 2039-2047, 2017.
- [8] *Ergonomics of Human-System Interaction*, International Organization for Standardization (ISO), 2010.
- [9] A. Luschi, G. L. Daino, G. Ghisalberti, V. Mezzatesta y E. Iadanza, «Empowering Clinical Engineering and Evidence-Based Maintenance with IoT and Indoor Navigation,» *Future Internet*, vol. 16, n.º 8, pág. 263, 2024. DOI: 10.3390/fi16080263.
- [10] V. C. Maia, L. Godaert, K. M. de Oliveira, C. Kolski y G. H. Travassos, «Supporting IoT System Design for the Location, Use, and Management of Objects in Health Centers,» en *2023 IEEE 25th Conference on Business Informatics (CBI)*, IEEE, 2023, págs. 235-244. DOI: 10.1109/CBI58679.2023.10187422.
- [11] U. Patil y colaboradores, «IoT-Based Smart Healthcare Monitoring System: A Review,» *Healthcare*, 2024.
- [12] A. Kalita y R. Mall, «A Survey on Wireless Sensor Network Routing Protocols and Their Energy Efficiency,» *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 173, pág. 102 871, 2021. DOI: 10.1016/j.jnca.2020.102871.

- [13] D. Karati, S. Bhattacharya y A. K. Maji, «An IoT-Based Smart Healthcare Monitoring Framework Using Wireless Sensor Networks,» *Sensors*, vol. 23, n.º 12, pág. 5634, 2023. DOI: 10.3390/s23125634.
- [14] P. R. Begum, B. D. Mohammad, A. Kumar y K. M. Muhasina, «Making Hospital Environment Friendly for People,» en *AI and IoT-Based Technologies for Precision Medicine*, John Wiley & Sons, 2023, cap. 9. DOI: 10.1002/9781394200344.ch9.
- [15] D. F. López-Cevallos y W. Chi, «Health Care Utilization in Ecuador: A Multilevel Analysis of Socioeconomic Determinants and Inequality Issues,» *Health Policy and Planning*, vol. 25, n.º 3, págs. 209-218, 2010. DOI: 10.1093/heapol/czp052.
- [16] Organización Panamericana de la Salud, *Hospitales Seguros: Índice de Seguridad Hospitalaria*. Washington, D.C.: OPS, 2014, ISBN: 9789275318652. dirección: <https://iris.paho.org/>.
- [17] E. Ortiz-Prado, K. Simbaña y J. Gómez, «Optimización de la infraestructura hospitalaria y su impacto en la calidad de la atención médica en Ecuador,» Tesis de Maestría, Universidad San Francisco de Quito, Quito, Ecuador, 2019.
- [18] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado y M. d. P. Baptista Lucio, *Metodología de la Investigación*, 6.ª ed. México: McGraw-Hill Education, 2014, ISBN: 9781456223960.
- [19] F. G. Arias, *El Proyecto de Investigación: Introducción a la Metodología Científica*, 6.ª ed. Caracas, Venezuela: Editorial Episteme, 2016, ISBN: 9789800735404.
- [20] C. A. Bernal Torres, *Metodología de la Investigación para Administración, Economía, Humanidades y Ciencias Sociales*, 3.ª ed. Bogotá, Colombia: Pearson Educación, 2010, ISBN: 9789586991285.
- [21] F. N. Kerlinger y H. B. Lee, *Foundations of Behavioral Research*, 4.ª ed. Fort Worth, Texas: Harcourt College Publishers, 2002, ISBN: 9780030352614.
- [22] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2.ª ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002, ISBN: 9780130422322.
- [23] A. Ghosh, A. Maeder, M. Baker y D. Chandramouli, «5G Evolution: A View on 5G Cellular Technology Beyond 3GPP Release 15,» *IEEE Access*, vol. 7, págs. 127 639-127 651, 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2939938.
- [24] J. S. Rueda R. y J. M. Talavera P., «Similitudes y diferencias entre Redes de Sensores Inalámbricas e Internet de las Cosas: Hacia una postura,» 2017, Disponible en Dialnet.
- [25] H. Boyes, B. Hallaq, J. Cunningham y T. Watson, «The Industrial Internet of Things (IIoT): An Analysis Framework,» *Computers in Industry*, vol. 101, págs. 1-12, 2018. DOI: 10.1016/j.compind.2018.04.015.

- [26] A. D. Valencia y P. A. Portilla, «Internet Industrial de las Cosas (IIoT): Nueva Forma de Fabricación Inteligente,» Fundación Universitaria de Popayán, inf. téc., 2024, Consultado: 20 de noviembre de 2024. dirección: <https://fupvirtual.edu.co/repositorio/files/original/50336c6033be347151ae8f5a44482ef844078010.pdf>.
- [27] Bluetooth Special Interest Group (Bluetooth SIG), *Bluetooth Core Specification Version 4.0*, Consultado: 17 de noviembre de 2024, Bluetooth SIG, 2010. dirección: <https://www.bluetooth.com/specifications/bluetooth-core-specification/>.
- [28] A. Dasgupta y otros, *An Internet of Things Platform with Google Eddystone Beacons*, ResearchGate Preprint, Consultado: 17 de noviembre de 2024, 2015. dirección: https://www.researchgate.net/publication/281902424_An_Internet_of_Things_Platform_with_Google_Eddystone_Beacons.
- [29] D. K. Bangotra, P. K. Singh y W.-C. Hong, «Internet of Things: Evolution, Concerns and Security Challenges,» *Sensors*, vol. 21, n.º 5, pág. 1809, 2021. doi: 10.3390/s21051809.
- [30] Texas Instruments, *Implementing Eddystone Bluetooth Smart Beacons Using the TI BLE-Stack*, SWRA491A, Consultado: 17 de noviembre de 2024, Texas Instruments, 2016. dirección: <https://www.ti.com/lit/ug/swra491a/swra491a.pdf>.
- [31] Novel Bits. «What Is PAwR (Periodic Advertising with Responses)?» Consultado: 17 de noviembre de 2024. (2024), dirección: <https://novelbits.io/periodic-advertising-with-responses-pawr/>.
- [32] K. Whitley y J. Shaffer, «Channel and Advertising Data in BLE Devices: Design and Implementation,» *Journal of Wireless Communications and Networks*, vol. 45, n.º 6, págs. 112-130, 2024. DOI: 10.1002/jwcn.2024.45.6.112.
- [33] U. Fano, *Theory of Propagation of Electromagnetic Waves*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1949.
- [34] M. Kadonoff, *Microcomputer Interfaces*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1986, ISBN: 9780201118100.
- [35] LibreTexts. «Superposition and Interference.» Consultado: 20 de noviembre de 2024. (2024), dirección: <https://phys.libretexts.org>.
- [36] T. L. Floyd, *Principles of Electric Circuits*, 10.^a ed. New York: Pearson, 2018, ISBN: 9780134483466.
- [37] P. S. Aguayo, «Introducción al Microcontrolador,» Olimex, inf. téc., 2004, Consultado: 20 de noviembre de 2024. dirección: <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/39407044/micro-libre.pdf>.

- [38] J. Pettit, *Microcontrollers: Fundamentals and Applications with PIC*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2020, ISBN: 9780367370997.
- [39] R. Kumar y N. Sharma, «Performance Comparison of ARM Cortex-M Microcontrollers for IoT Applications,» *IEEE Access*, vol. 9, págs. 115 430-115 440, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3094351.
- [40] Espressif Systems. «ESP32 Series.» Consultado: 20 de noviembre de 2024. (2020), dirección: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>.
- [41] Robotic Coding. «MicroPython vs Arduino: Choosing the Right Platform for Your Robotics Projects.» Consultado: 20 de noviembre de 2024. (2023), dirección: <https://roboticcoding.com/micropython-vs-arduino/>.
- [42] Raspberry Pi Ltd, *Raspberry Pi Documentation*, Consultado: 5 de julio de 2026, Raspberry Pi Ltd, 2024. dirección: <https://www.raspberrypi.com/documentation/>.
- [43] J. R. Miller, *Modern PLC Systems: Applications and Case Studies*. Oxford, United Kingdom: Elsevier, 2020, ISBN: 9780128195931.
- [44] R. Singh y K. Patel, «Integration of PLCs with Modern IoT Frameworks in Manufacturing,» en *Proceedings of the International Conference on Smart Systems and Automation*, IEEE, 2017, págs. 23-30.
- [45] P. Robinson, *Automation Fundamentals: The Role of PLCs in Modern Industry*. London, United Kingdom: TechWorks Publications, 2022.
- [46] M. Garcia y A. Torres, «Evolution of PLC Technology: From Early Systems to Smart Controllers,» *Journal of Industrial Engineering and Automation*, vol. 34, n.º 7, págs. 845-860, 2020.
- [47] W. Li y X. Zhang, «Integration of IoT and PLC in Smart Manufacturing,» en *Proceedings of the 12th International Conference on Industrial Automation*, IEEE, 2021, págs. 321-330.
- [48] W. Bolton, *Mechatronics: Electronic Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering*, 6.ª ed. Pearson, 2015, págs. 45-78, ISBN: 9781292061177.
- [49] R. Faragher y R. Harle, «Location Fingerprinting with Bluetooth Low Energy Beacons,» *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 33, n.º 11, págs. 2418-2428, 2015. DOI: 10.1109/JSAC.2015.2430281.
- [50] IEEE, *IEEE Standard for Information Technology–Telecommunications and Information Exchange Between Systems Local and Metropolitan Area Networks–Specific Requirements Part 11*, IEEE, 2020.
- [51] Modbus Organization, *Modbus Application Protocol Specification V1.1b3*, Modbus Organization, 2012. dirección: <https://modbus.org>.

- [52] R. T. Fielding, «Architectural Styles and the Design of Network-Based Software Architectures,» Tesis doct., University of California, Irvine, 2000.
- [53] J. S. Rueda Rueda y J. M. Talavera Portocarrero, «Similitudes y diferencias entre Redes de Sensores Inalámbricas e Internet de las Cosas: Hacia una postura clarificadora,» *Revista Colombiana de Computación*, vol. 18, n.º 2, págs. 58-74, 2017, Consultado a través de Dialnet. DOI: 10.29375/25392115.3218. dirección: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6720876>.
- [54] S. d. C. Quiñones Guevara, «Estudio del Diseño de una Red de Beacons Bluetooth para un Campus Universitario,» Consultado: 17 de noviembre de 2024, Tesis de maestría., Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú, 2020. dirección: <https://repositorio.pucp.edu.pe/index/handle/123456789/176692>.
- [55] A. J. Asencio Gonzabay, «Diseño e Implementación de un Sistema de Gestión, Monitoreo y Digitalización para el Proceso de Selección de Mangos en Función de su Color, Enfocada a la Industria 4.0 para Optimizar el Rendimiento de Producción,» Trabajo de titulación, Tesis de maestría., Universidad Estatal Península de Santa Elena, La Libertad, Ecuador, 2019. dirección: <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/5237>.
- [56] W. D. Guamani Proaño, «Diseño e Implementación de un HMI para el Monitoreo y Control de Nivel Utilizando el PLC MicroLogix 1100 en el Laboratorio de Instrumentación Virtual del ITSA,» Trabajo de Maestría, Tesis de maestría., Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Latacunga, Ecuador, 2012. dirección: <https://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/7504>.
- [57] IBM, *Node-RED: A Visual Tool for Wiring the Internet of Things*, Consultado: 20 de noviembre de 2024, IBM Emerging Technology, 2013. dirección: <https://nodered.org/>.
- [58] M. Widenius, *MariaDB: The Open Source Database*. Espoo, Finland: MariaDB Foundation, 2014.
- [59] MariaDB Foundation, *MariaDB Documentation: Features and Architecture*, Consultado: 20 de noviembre de 2024, MariaDB Foundation, 2021. dirección: <https://mariadb.com/kb/en/documentation/>.
- [60] M. Banzi y M. Shiloh, *Getting Started with Arduino*, 3.ª ed. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, 2014, ISBN: 9781449363338.
- [61] Arduino, *Arduino IDE Documentation*, Consultado: 20 de noviembre de 2024, Arduino, 2023. dirección: <https://docs.arduino.cc/software/ide/>.
- [62] S. Monk, *Programming Arduino: Getting Started with Sketches*, 3.ª ed. New York: McGraw-Hill Education, 2022, ISBN: 9781264269051.

- [63] Siemens AG, *TIA Portal V16: Engineering Framework Function Manual*, Consultado: 20 de noviembre de 2024, Siemens AG, 2019. dirección: <https://support.industry.siemens.com>.
- [64] Home Assistant Project, *Home Assistant Documentation*, Consultado: 20 de noviembre de 2024, Home Assistant Project, 2023. dirección: <https://www.home-assistant.io/docs/>.
- [65] D. Karagiannis, *Practical Home Automation with Home Assistant: A Comprehensive Guide to Setting Up and Using Home Assistant for Smart Home Control*. USA: Independently Published, 2022, ISBN: 9798844381454.
- [66] J. Li, Y. Zhang y L. Chen, «Design of Human-Machine Interface System Based on DOPSoft and Delta PLC for Industrial Automation,» *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 11, n.º 5, págs. 189-196, 2020. DOI: 10.14569/IJACSA.2020.0110524.
- [67] K. Wu, *Industrial Automation and Control Systems: Principles, Design, and Applications*. Singapore: Springer, 2021, ISBN: 9789811621765.
- [68] Espressif Systems, *ESP32 Technical Reference Manual*, Consultado: 20 de noviembre de 2024, Espressif Systems, 2021. dirección: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf.
- [69] Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd., *MQ-2 Gas Sensor Datasheet*, Consultado: 20 de noviembre de 2024, Winsen, 2020. dirección: <https://www.winsen-sensor.com/d/files/manual/mq-2.pdf>.
- [70] Aosong Electronics Co., Ltd., *DHT22 Digital Relative Humidity and Temperature Sensor Datasheet*, Consultado: 20 de noviembre de 2024, Aosong Electronics, 2018. dirección: <https://www.aosong.com/en/products-21.html>.
- [71] P. Gupta, R. Yadav y S. Kumar, «Implementation of IoT-Based Environmental Monitoring System Using DHT11 and ESP8266,» *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, vol. 9, n.º 4, págs. 45-50, 2020. DOI: 10.17148/IJARCCE.2020.9408.
- [72] J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*, 5.^a ed. New York: Springer, 2016, ISBN: 9783319193021.
- [73] A. Singh, R. Sharma y P. Kaur, «Design and Implementation of PIR Sensor Based Motion Detection System,» *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 9, n.º 7, págs. 1142-1148, 2020. DOI: 10.15662/IJAREEIE.2020.0907004.

- [74] S. Kumar, R. Gupta y V. Patel, «Design and Implementation of Light Intensity Measurement System Using LDR and IoT,» *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 11, n.º 6, págs. 842-848, 2020, ISSN: 2229-5518.
- [75] SparkFun Electronics, *Photoresistor (LDR) Sensor Datasheet*, Consultado: 20 de noviembre de 2024, SparkFun Electronics, 2018. dirección: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/LightSensor.pdf>.
- [76] Raspberry Pi Foundation, *Raspberry Pi 4 Model B Technical Specifications*, Consultado: 20 de noviembre de 2024, Raspberry Pi Foundation, 2019. dirección: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-4-model-b/>.
- [77] G. Halfacree y E. Upton, *Raspberry Pi User Guide*, 4.^a ed. Indianapolis, IN: John Wiley & Sons, 2021, ISBN: 9781119548363.
- [78] Siemens AG, *SIMATIC S7-1200 System Manual*, Consultado: 20 de noviembre de 2024, Siemens AG, 2021. dirección: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109744245>.
- [79] C. D. Johnson, *Process Control Instrumentation Technology*, 9.^a ed. New York: Pearson Education, 2020, ISBN: 9780134606049.
- [80] A. Martínez, L. Herrera y P. Torres, «Integration of Siemens S7-1200 PLCs with IoT Platforms for Industrial Automation,» *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, n.º 4, págs. 2631-2640, 2022. DOI: 10.1109/TII.2021.3110143.
- [81] Delta Electronics, *DOP-B03E211 Human Machine Interface Instruction Sheet*, Consultado: 17 de noviembre de 2024, Delta Electronics, 2019. dirección: <https://www.deltaww.com/en-us/products/Touch-Panel-HMI-Human-Machine-Interfaces/331>.
- [82] R. Spotnitz y J. Franklin, «Abuse Behavior of High-Power, Lithium-Ion Cells,» *Journal of Power Sources*, vol. 113, n.º 1, págs. 81-100, 2003. DOI: 10.1016/S0378-7753(02)00488-3.
- [83] Texas Instruments, *Battery Management Systems Design Guide for Li-Ion and Li-Polymer Applications*, Consultado: 17 de noviembre de 2024, Texas Instruments, 2022. dirección: <https://www.ti.com/lit/an/slva925/slva925.pdf>.
- [84] Y. Xiao, W. Tian, J. Zhong, Z. Guo, X. Qi y B. Li, «Research and Discussion on Diagnosis and Treatment Service Mode of Intelligent Hospital,» en *Proceedings of the 2023 3rd International Conference on Public Management and Intelligent Society (PMIS 2023)*, ép. Atlantis Highlights in Intelligent Systems, Atlantis Press, 2023, págs. 46-54. DOI: 10.2991/978-94-6463-200-2_7.

ANEXOS

A. CÓDIGO

```
esphome:
  name: prueba-beacon
  friendly_name: PRUEBA BEACON

esp32:
  board: esp32dev
  framework:
    type: arduino

# Enable logging
logger:

# Enable Home Assistant API
api:
  encryption:
    key: "6fm2E7C/tBG07sYYf3Dn1lWf5l7gs6IXwRkKw0nc4="

ota:
  - platform: esphome
    password: "5d5615481bd37ca2d2929d2b5de46127"

wifi:
  ssid: !secret wifi_ssid
  password: !secret wifi_password

# Enable fallback hotspot (captive portal) in case wifi connection fails
ap:
  ssid: "Prueba-Beacon Fallback Hotspot"
  password: "VH47udF9KCW"
```

Figura 22: Configuración de nombre y compatibilidad

A.1. CIFRADO DE CÓDIGO

```
esp32_ble_tracker:
ble_client:
  - mac_address: 2C:BC:BB:0D:DE:6E
    id: t_beacon_1
    on_connect:
      then:
        - logger.log: "Conectado al dispositivo BLE Fijo 1"
          # Configurar acciones adicionales si es necesario
    on_disconnect:
      then:
        - logger.log: "Desconectado del dispositivo BLE Fijo 1"
          # Configurar acciones adicionales si es necesario

  - mac_address: BC:DD:C2:CC:DE:1E
    id: t_beacon_2
    on_connect:
      then:
        - logger.log: "Conectado al dispositivo BLE Fijo 2"
          # Configurar acciones adicionales si es necesario
    on_disconnect:
      then:
        - logger.log: "Desconectado del dispositivo BLE Fijo 2"
          # Configurar acciones adicionales si es necesario
```

Figura 23: Cifrado de datos

A.2. Esquema de node-red

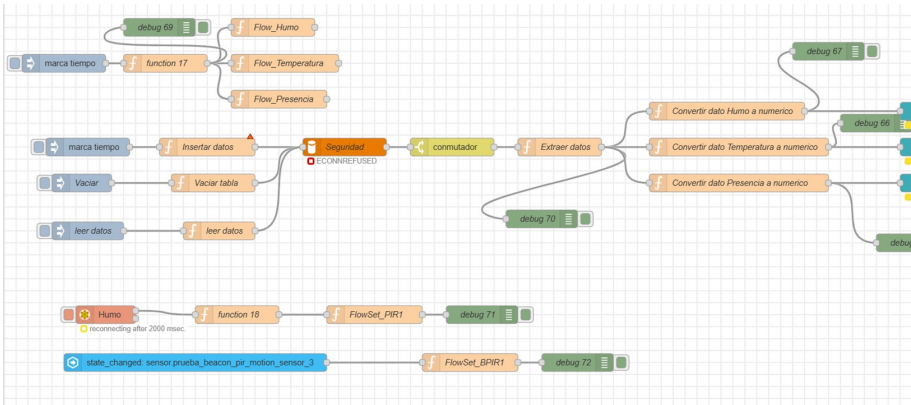


Figura 24: Esquema en Node-Red

A.3. Declaración de Variables

SEGURIDAD_VARIABLES							
	Nombre	Tipo de datos	Dirección	Rema...	Acces...	Escrib...	Visibl...
1	V_S_PRESENCIA_1	Real	%MD0				
2	V_S_TEMPERATURA_1	Real	%MD1				
3	V_S_PRESENCIA_3	Real	%MD2				
4	V_S_TEMPERATURA_3	Real	%MD3				
5	V_S_TEMPERATURA_CM	Real	%MD4				
6	V_S_GAS_CM	Real	%MD5				
7	V_S_PRESENCIA_UH	Real	%MD6				
8	V_S_TEMPERATURA_UH	Real	%MD7				
9	V_S_GAS_UH	Real	%MD8				
10	V_S_PRESENCIA_F	Real	%MD9				
11	V_S_TEMPERATURA_F	Real	%MD10				
12	V_S_PRESENCIA_4	Real	%MD11				
13	V_S_TEMPERATURA_4	Real	%MD12				
14	V_S_PRESENCIA_SO	Real	%MD13				
15	V_S_TEMPERATURA_SO	Real	%MD14				
16	V_S_GAS_SO	Real	%MD15				
17	V_S_PRESENCIA_SE	Real	%MD16				
18	V_S_GAS_SE	Real	%MD17				

Figura 25: Declaración de variables en TIA Portal

B. Resultados

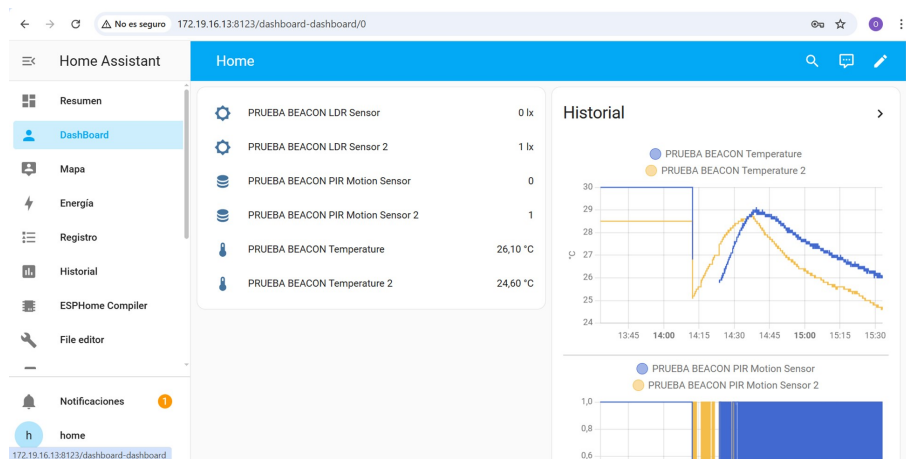


Figura 26: Variables de los sensores Home Assistant

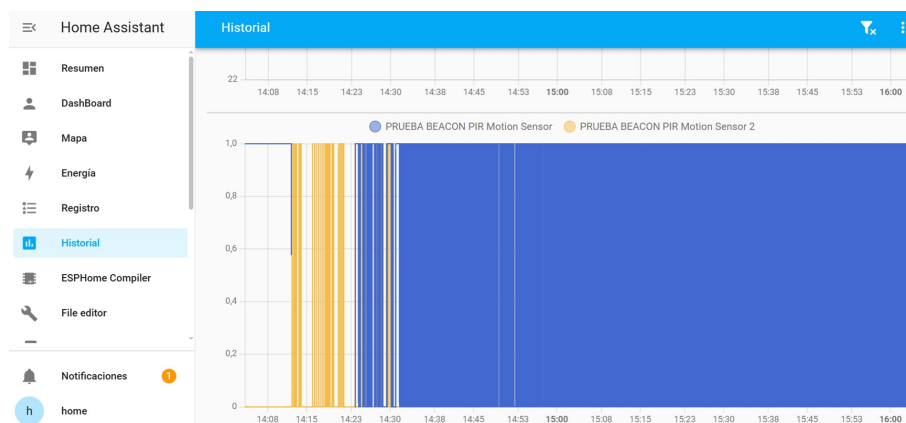


Figura 27: Gráfica del sensor PIR

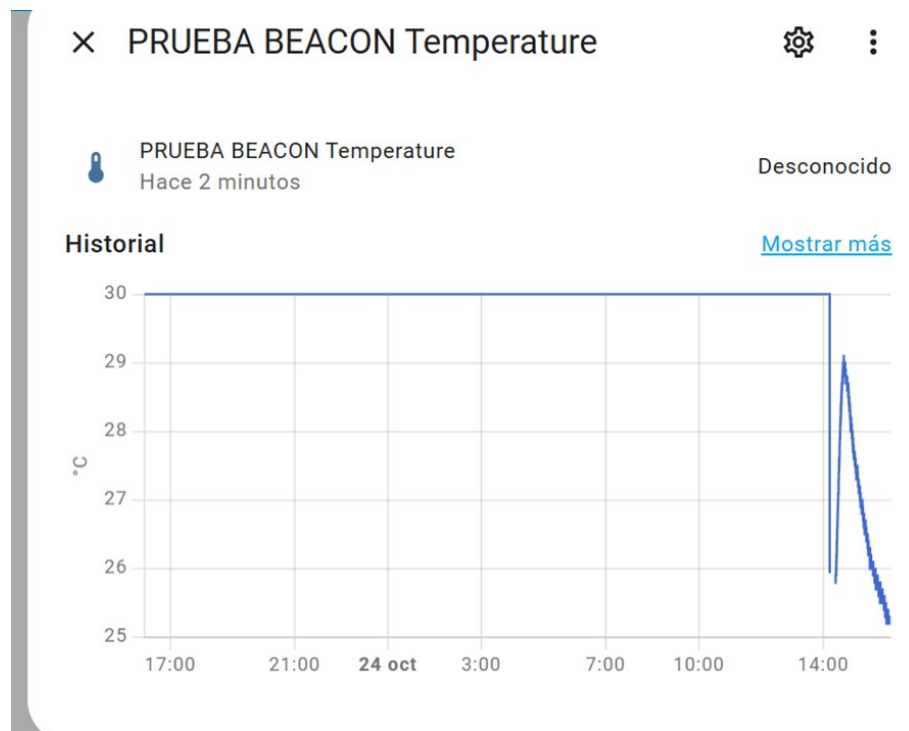


Figura 28: Gráfica del sensor Temperatura

B.1. Interfaz en el HMI

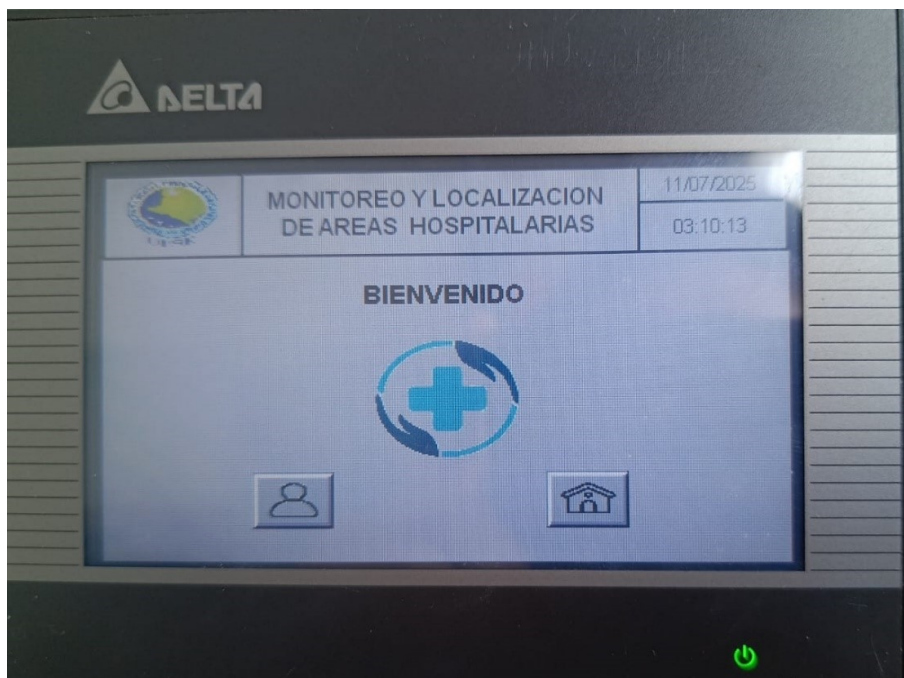


Figura 29: INICIO EN EL HMI

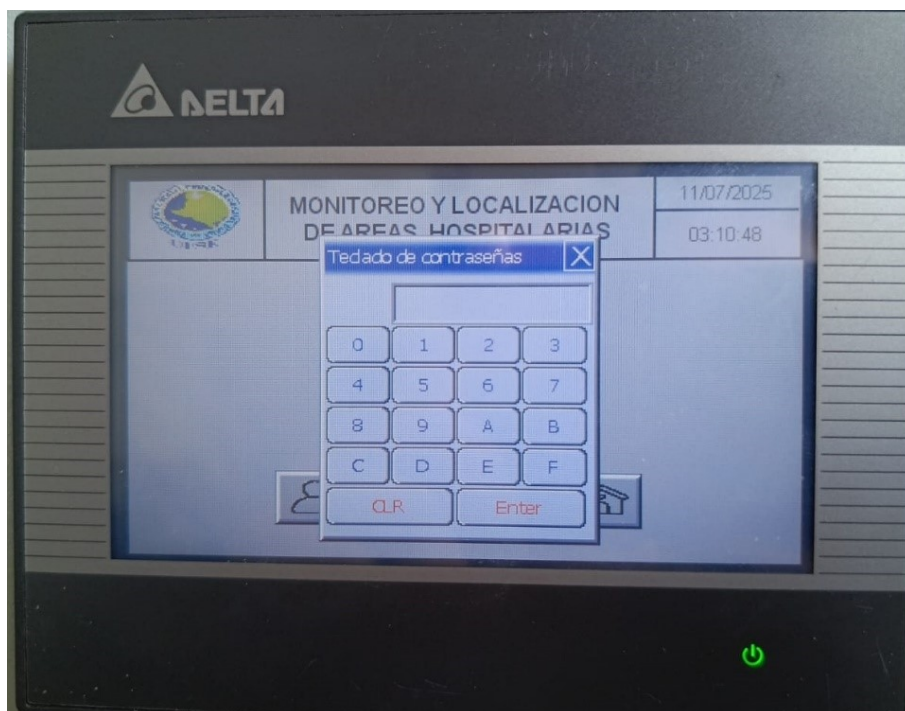


Figura 30: Ingreso de clave al usuario

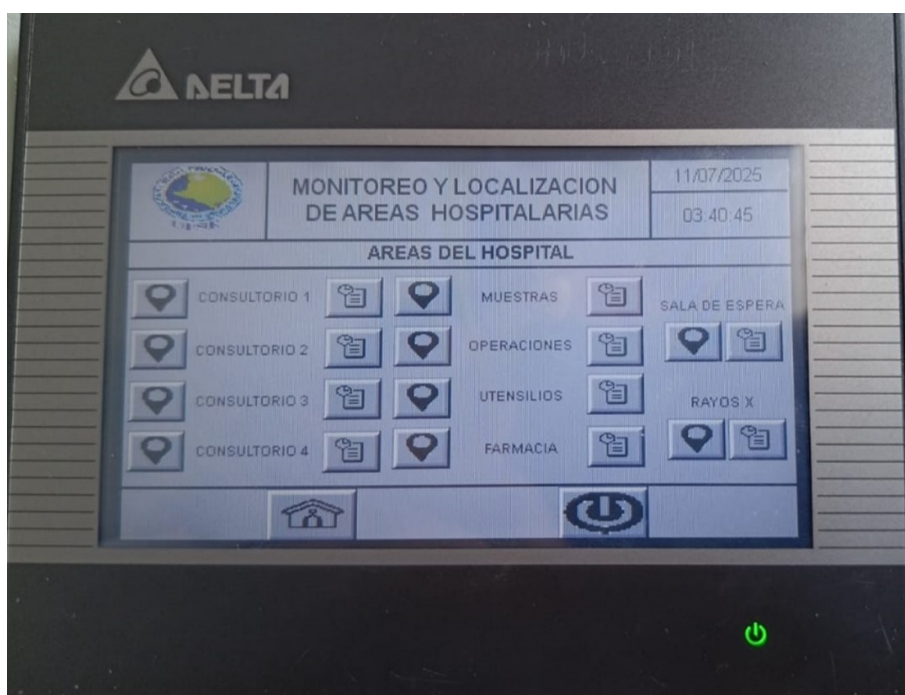


Figura 31: Esquema general de Departamentos del Hospital en HMI



Figura 32: Gráfica de Localización de las Áreas



Figura 33: Variables a medir de cada Área



Figura 34: Variables a medir de cada Área

La Libertad, 23 de enero del 2026

Sr. Ing. José Sánchez

Director de la carrera de Electrónica y Telecomunicaciones

En su despacho. -

Estimados/as miembros de la Facultad de Sistemas y Telecomunicaciones:

Por medio de la presente, en mi calidad de tutor del trabajo de titulación titulado **“Implementación de una red de sensores inalámbricos utilizando tecnología Beacon e IIoT para la localización de consultorios, salas de espera y servicios médicos en hospitales”**, presentado por el egresado **Omar Bazán González**, me permito informar que el documento se encuentra en un estado de avance suficiente para continuar con los pasos internos establecidos por la Facultad.



Adicionalmente, adjunto el certificado de originalidad de Compilatio, en el cual se evidencia un porcentaje de similitud aproximado del **3 %**, lo que respalda el carácter original del documento dentro de los parámetros aceptados por la institución.

Sin otro particular, agradezco se sirvan dar continuidad al proceso académico respectivo.

Atentamente,



Firmado electrónicamente por:
**CARLOS ALBERTO
SALDANA ENDERICA**

Ing. Carlos Alberto Saldaña Enderica, MSc.

Docente tutor