



Diseño e implementación de una red de sensores inalámbricos fijos y móviles para la monitorización de la calidad de aire y condiciones ambientales en espacios interiores

López Meza, David Mateo y Mena Rueda, Edison Fernando

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica,
Automatización y Control

Ing. Arcentales Viteri, Andrés Ricardo PhD.

17 de marzo de 2021



Document Information

Analyzed document	Trabajo_Titulacion_Mena_Lopez.pdf (D98663886)
Submitted	3/17/2021 4:41:00 PM
Submitted by	Guaman Novillo Ana Veronica
Submitter email	avero.guaman@gmail.com
Similarity	1%
Analysis address	avguaman.espe@analysis.arkund.com

Sources included in the report

SA	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Tesis_Velasco_Zuniga.pdf	2
	Document Tesis_Velasco_Zuniga.pdf (D78197446)	
	Submitted by: ararcentales@espe.edu.ec Receiver: ararcentales.espe@analysis.arkund.com	
SA	1600284126_737__2020_MET_Aguilar_Olivier.pdf	1
	Document 1600284126_737__2020_MET_Aguilar_Olivier.pdf (D80809724)	





DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “Diseño e implementación de una red de sensores inalámbricos fijos y móviles para la monitorización de la calidad de aire y condiciones ambientales en espacios interiores” fue realizado por los señores López Meza, David Mateo y Mena Rueda, Edison Fernando el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 17 de marzo de 2021

Firma:



Arcentales Viteri, Andrés Ricardo

C. C. 1712480746



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Nosotros, López Meza, David Mateo y Mena Rueda, Edison Fernando, con cédulas de ciudadanía n°1718892936 y n°1717398513, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Diseño e implementación de una red de sensores inalámbricos fijos y móviles para la monitorización de la calidad de aire y condiciones ambientales en espacios interiores** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 17 de marzo de 2021

Firma

López Meza, David Mateo

C.C.: 1718892936

Firma

Mena Rueda, Edison Fernando

C.C.: 1717398513



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Nosotros **López Meza, David Mateo** y **Mena Rueda, Edison Fernando**, con cédulas de ciudadanía n°1718892936 y n°1717398513, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Diseño e implementación de una red de sensores inalámbricos fijos y móviles para la monitorización de la calidad de aire y condiciones ambientales en espacios interiores en el Repositorio Institucional**, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangoquí, 17 de marzo de 2021

Firma

López Meza, David Mateo

C.C.: 1718892936

Firma

Mena Rueda, Edison Fernando

C.C.: 1717398513

Dedicatorias

Dedico este trabajo a mis padre Remi, a mi madre Mary, su amor y preocupación es tan grande que asistió a la universidad personalmente para que me den un cupo, a mi hermana Grace por irme a traer de la universidad en las madrugadas luego de varias horas de laboratorios, Eli gracias por adoptarme gran parte de mi vida universitaria y Javi por demostrarme el poder de la bondad, a mi mejor amigo Arturo por apoyarme desde que nos conocimos en el primer año de escuela, a mi novia Karolina por prestarme la goma para armar la tesis y darme su amor incondicional y mi primo Daniel quien fue mi guía y mi soporte y demostrarme que sin importar lo ocupado que estés siempre hay tiempo para un buen partido de básquet, gracias por formar parte de esta loca vida universitaria. A mi compañero de tesis Edi, por compartir su conocimiento e incentivar me a ser mejor cada día y hacer las cosas dando nuestro mayor esfuerzo, sin importar lo pequeñas o difíciles que puedan ser.

David Mateo López Meza

Dedico este proyecto a mis Padres Edison y Rosario, su apoyo incondicional durante toda mi formación personal y académica ha sido el pilar fundamental en el desarrollo de mi carrera profesional. A mis hermanos Esteban y Belén por su apoyo durante mi carrera. A mi novia Diana, por todo su amor y apoyo incondicional durante esta etapa nuestra vida, por tu sabiduría y valiosas enseñanzas. A mi abuelito Norberto, sé que está orgulloso desde el cielo, para ti, de tu científico. A mis familiares, amigos y compañeros en general. A compañero de tesis Mateo, por no rendirte y demostrarme que todo es posible si te lo propones, a las pequeñas y grandes victorias en este proceso.

Edison Fernando Mena Rueda

Agradecimientos

A nuestro tutor, Dr. Andrés Arcentales por ser nuestro mentor durante todo el proceso de desarrollo de este trabajo de titulación, enseñándonos el valor de la responsabilidad y que el esfuerzo siempre tiene una recompensa, permitiéndonos ascender un escalón más y empezar esta nueva etapa de nuestras vidas.

Al Dr. Vicente Delgado por compartir su valioso conocimiento para poder cumplir con varias etapas cruciales en el desarrollo este proyecto.

A nuestros compañeros y docentes de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE por formar una parte importante durante nuestro desarrollo académico y profesional durante el transcurso de la carrera.

Índice de Contenidos

Portada.....	1
Hoja de Resultados de la Herramienta Urkund.....	2
Certificación Trabajo de Titulación.....	3
Responsabilidad de Autoría.....	4
Autorización de Publicación.....	5
Dedicatorias	6
Agradecimientos.....	8
Índice de Contenidos.....	9
Índice de Tablas	12
Índice de Figuras.....	14
Resumen.....	17
Abstract.....	18
Capítulo I Introducción.....	19
Antecedentes	19
Justificación e Importancia	22
Alcance del Proyecto.....	23
Objetivos	25
Objetivo General	25
Objetivos Específicos.....	25
Capítulo II Marco Teórico	26
Introducción.....	26
Principales Contaminantes del Aire en Espacios Interiores	26
Principales Afecciones Producidas por la Mala Calidad del Aire en Espacios Interiores	31

Sistemas de Medición de Calidad del Aire.....	33
Prototipos de Sistemas de Sensado de Calidad de Aire.....	37
Prototipos de Sistemas de Redes de Sensado de Calidad de Aire	39
Prototipos de Sistemas Robóticos para el Sensado de la Calidad del Aire	43
Capítulo III Diseño de la Plataforma Multisensado de Calidad del Aire y Condiciones Ambientales.....	46
Descripción de la Plataforma Multisensado	47
Sistema de Medición de Calidad del Aire	48
Sensor de Monóxido de Carbono.....	49
Sensor de Calidad del Aire.....	52
Sensor de Dióxido de Carbono	54
Sensores de Condiciones Ambientales	56
Sensor de Humedad y Temperatura	56
Sensor de Luminosidad.....	57
Sensor de Presión Barométrica.....	61
Sistema de Ventilación para Sensores de Óxido Metálico	62
Sistema de Ventilación con Filtro de Aire	63
Sistema de Ventilación sin Filtro de Aire.	69
Sistema de Control.....	71
Sistema de Alimentación	74
Integración de Sistemas	79
Capítulo IV Diseño e Implementación de la Plataforma Robóticas Móvil	84
Descripción de la Plataforma Robótica.....	84
Sistema Mecánico	85
Sistema de Orientación y Desplazamiento	88

Detección de Línea	89
Control del Desplazamiento	90
Sistema de Alimentación	94
Integración de la Plataforma Multisensado	94
Capítulo V Integración de la Red de Sensores y Pruebas de Funcionamiento	98
Arquitectura de la Red de Sensores	98
Diseño de la Red MQTT	100
Topología de la Red MQTT	100
Configuración de Tópicos MQTT	101
Flujo de Programa para Nodos de Medición (Plataformas Multisensado)	103
Proceso Wi-Fi	104
Proceso MQTT	106
Proceso Principal	107
Proceso KeepAlive	110
Configuración del Servidor Virtual	110
Interfaz de Recepción de Datos (Node-Red)	111
Pruebas de Funcionamiento	116
Software de Procesamiento	117
Pruebas y Resultados	119
Capítulo VI Conclusiones y Recomendaciones	127
Diseño de la Plataforma Multisensado	128
Plataformas Robóticas	130
Configuración de Red	132
Pruebas y Análisis de Resultados	134
Referencias Bibliográficas	136

Índice de Tablas

Tabla 1.	Principales Contaminantes en ambientes interiores y su origen más común.	27
Tabla 2.	Distribución porcentual de contaminantes en interiores.	30
Tabla 3.	Índice de valores de los contaminantes dentro de espacios interiores.	31
Tabla 4.	Síntomas relacionados con la calidad del aire interior.	32
Tabla 5.	Especificaciones técnicas del sensor MQ-7.	50
Tabla 6.	Especificaciones técnicas del sensor SGP30.	52
Tabla 7.	Especificaciones técnicas del Analog Infrared CO ₂ Sensor.	55
Tabla 8.	Especificaciones técnicas del sensor Si7021.	57
Tabla 9.	Especificaciones técnicas del sensor VEML7700.	57
Tabla 10.	Resoluciones y valores máximos de medición del sensor VEML7700.	59
Tabla 11.	Valores de Iluminación Típicos.	60
Tabla 12.	Especificaciones técnicas del sensor MPL115A2.	61
Tabla 13.	Especificaciones técnicas de la tarjeta ESP32 WROOM32D.	72
Tabla 14.	Detalle de los pines de conexión de la tarjeta ESP32.	73
Tabla 15.	Requerimientos energéticos de la estación multisensado.	75
Tabla 16.	Especificaciones técnicas del regulador MP1584.	76
Tabla 17.	Cargas de la plataforma multisensado.	78
Tabla 18.	Características del robot DG012-Basic 4WD.	87
Tabla 19.	Especificaciones Técnicas Arduino Pro Mini.	91
Tabla 20.	Detalle de los pines de conexión para la Tarjeta Arduino Pro Mini.	92
Tabla 21.	Especificaciones Técnicas del driver TB6612FNG.	93
Tabla 22.	Descripción de Tópicos de la Red MQTT.	102
Tabla 23.	Características Servidor Virtual.	111
Tabla 24.	Resumen de las concentraciones máximas obtenidas durante la prueba del departamento.	123

Tabla 25. Resumen de las concentraciones máximas obtenidas durante la prueba en el dormitorio principal.	126
--	-----

Índice de Figuras

Figura 1. Distribución y Origen de Contaminantes en Espacios Interiores.	27
Figura 2. Asistente Médico RoNA	35
Figura 3. Plataforma Robótica iRobot	36
Figura 4. Estación Metereológica Newentor.....	37
Figura 5. Sistema no intrusivo para detección de presencia de personas en espacios interiores.....	38
Figura 6. Sistema de sensado Waspnote	39
Figura 7. (a) Prototipo de un nodo sensores para el monitoreo de la calidad de aire tanto en ambientes interiores como exteriores, (b) Configuración de la red.....	40
Figura 8. Prototipo para monitorio de CO ₂	42
Figura 9. Sistema AirScope (a) Sistema Robótico, (b) Conectividad Wireless.	43
Figura 10. Plataforma de sensado de calidad de aire montada en un dron.....	44
Figura 11. Diagrama de bloques general de la estación multisensado.....	48
Figura 12. Diagrama de un sensor de óxido metálico.	49
Figura 13. Esquemático para Instrumentación de Sensor MQ-7.....	51
Figura 14. Ajuste de curva para sensor MQ-7.....	51
Figura 15. Secuencia de Inicio y Medición Contínua SGP30.	53
Figura 16. Principio de funcionamiento del sensor óptico de gases.	54
Figura 17. Gravity Analog Infrared CO ₂ Sensor	55
Figura 18. Respuesta espectral del canal ALS del sensor VEML7700.....	58
Figura 19. Respuesta espectral del canal WHITE del sensor VEML7700.	58
Figura 20. Diagrama de flujo para medición VEML7700.	61
Figura 21. Fases de Medición para Sensores de Óxido Metálico.....	63
Figura 22. Componentes del Sistema de Ventilación con Filtro (Acero Inoxidable).	64
Figura 23. Acople con compuerta para sistema de ventilación con filtro de Aire	65

Figura 24. Respuesta del sensor de CO Filtro y Contenedor de Acero Inoxidable	67
Figura 25. Componentes del Sistema de Ventilación con Filtro de Aire (Acrílico)	68
Figura 26. Respuesta del sensor de CO Filtro de Aire y Contenedor de Acrílico	68
Figura 27. Comparación en Lectura Sensor con Filtro en Diferentes Contenedores	69
Figura 28. Respuesta del sensor de CO sin Filtro de Aire.....	70
Figura 29. Comparación Sistema de Medición en Acrílico con Filtro vs Sin Filtro	71
Figura 30. Diagrama Esquemático de la plataforma multisensado.....	79
Figura 31. Diseño PCB de la placa de control de la Plataforma Multisensado.	80
Figura 32. PCB para sensores de Condiciones Ambientales.	82
Figura 33. Implementación de la Plataforma Multisensado,.....	82
Figura 34. Vista Lateral - PCB Principal, Vista Superior.....	83
Figura 35. Diagrama de bloques de la plataforma robótica.	85
Figura 36. Robot Móvil DG012-Basic 4WD.....	86
Figura 37. Robot Móvil DG012-Basic Modificado con tracción trasera.....	86
Figura 38. Diseño de la Estructura de la Plataforma Robótica Móvil.....	88
Figura 39. Detección de Línea con Módulo Adafruit QTR-8RC.....	89
Figura 40. Detección de Punto de medición.....	90
Figura 41. Diagrama Esquemático Circuito de Control Plataforma Robótica.....	94
Figura 42. Diseño PCB del Circuito de Control de la Plataforma Robótica.....	95
Figura 43. Plataforma Robótica Móvil y sus Componentes.	96
Figura 44. Plataforma Robótica Móvil Implementada.	97
Figura 45. Arquitectura de la Red de Sensores Inalámbricos	99
Figura 46. Topología Red MQTT.	101
Figura 47. Diagrama de Tópicos para la Red MQTT (Nodo 1).....	102
Figura 48. Diagrama de Flujo del Programa Principal.....	103
Figura 49. Diagrama de Flujo del Proceso Wi-Fi.....	105

Figura 50. Diagrama de Flujo Proceso MQTT.....	107
Figura 51. Diagrama de Flujo Proceso Principal.	108
Figura 52. Diagrama de Flujo de Sincronización.....	109
Figura 53. Diagrama de Flujo Lectura de Sensores.	110
Figura 54. Flujo de recepción de Información de Estado de Nodo.	112
Figura 55. Flujo de Sincronización en Node-Red.....	113
Figura 56. Recepción de Datos de Medición y Almacenamiento en Base de Datos....	114
Figura 57. Interfaz de Usuario Node-Red.	115
Figura 58. Interfaz de Visualización de Datos para CO ₂	115
Figura 59. Distribución de las plataformas multisensado el entorno de prueba 1.....	116
Figura 60. Descripción de la interfaz gráfica en Matlab.....	117
Figura 61. Interfaz de visualización de datos.	118
Figura 62. Mapa de calor VS Distribución física del entorno.	119
Figura 63. Concentración de CO, Prueba en Departamento.....	120
Figura 64. Concentración de CO ₂ , Prueba en Departamento.....	121
Figura 65. Concentración TVOC, Prueba en Departamento.	122
Figura 66. Concentración de LUZ, Prueba en Departamento.	123
Figura 67. Distribución de las plataformas multisensado en entorno de prueba 2.....	124
Figura 68. Concentración de CO ₂ Prueba en Dormitorio Principal.	125

Resumen

En los últimos años el análisis de calidad de aire y condiciones ambientales en entornos interiores ha sido un tema muy relevante, debido a que las personas pasan alrededor del 80% de su día a día dentro de edificios, casas, aulas, oficinas, etc. En vista de la importancia del estudio de esta temática se desarrolló una red de sensores inalámbricos que permitan medir las variables de condiciones ambientales y químicas que afectan a la calidad del aire. Las variables de estudio fueron seleccionadas en función a su influencia en la percepción de la calidad de aire, seleccionando al Monóxido de Carbono, Dióxido de Carbono, Total de Compuestos Orgánicos Volátiles, Luminosidad, Presión, Temperatura y Humedad Relativa. En función a estas variables se construyeron cuatro plataformas multisensado de las cuales dos fueron adaptadas en plataformas robóticas móviles para optimizar recursos y maximizar el área de sensado. Este sistema permite la monitorización en varios puntos dentro de un entorno ubicando las estaciones en puntos estratégicos y rutas que permitan una mayor cobertura, utilizando protocolos del Internet de las Cosas. Para verificar el correcto funcionamiento del sistema se realizaron pruebas en un entorno cerrado de tipo residencial, cuyos resultados obtenidos luego de la recolección, análisis y procesamiento de los datos demostraron que la ventilación tiene un gran impacto en la distribución de las concentraciones de las variables que indican el estado de la calidad del aire.

PALABRAS CLAVE:

- **CALIDAD DEL AIRE**
- **MONITORIZACIÓN**
- **PLATAFORMA ROBÓTICA**
- **MQTT**
- **RED DE SENSORES INALÁMBRICOS**

Abstract

In recent years, the analysis of air quality and environmental conditions in indoor environments has been a relevant topic, since people spend about 80% of their daily lives inside buildings, houses, classrooms, offices, etc. In view of the importance of studying this topic, a network of wireless sensors was developed to measure the variables of environmental and chemical conditions that affect air quality. The variables to be studied were selected according to their influence on the perception of air quality, selecting Carbon Monoxide, Carbon Dioxide, Total Volatile Organic Compounds, Luminosity, Pressure, Temperature and Relative Humidity. Based on these variables, four multi-sensing platforms were built, two of which were adapted into mobile robotic platforms to optimize resources and maximize the sensing area. This system allows monitoring at various points within an environment by locating the stations at strategic points and routes that allow greater coverage, using Internet of Things protocols. To verify the correct operation of the system, tests were carried out in a closed residential environment. The results obtained after the collection, analysis and processing of the data showed that ventilation has a great impact on the distribution of the concentrations of the variables that indicate the state of air quality.

KEYWORDS:

- **AIR QUALITY**
- **MONITORING**
- **ROBOTIC PLATFORM**
- **MQTT**
- **WIRELESS SENSOR NETWORK**

Capítulo I

Introducción

Antecedentes

Los estudios realizados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en 2018 sobre la calidad de aire a nivel mundial indican que los países más contaminados por metro cuadrado son China e India. Estos países cuentan con concentraciones superiores a 70 micrómetros por metro cúbico de contaminantes compuestos por partículas de diámetro menores a diez micrómetros, distribuidos en el ambiente y filtrados dentro de viviendas y edificios (World Health Organization, 2018). La media mundial es de 34.6 micrómetros por metro cúbico y, las repercusiones de tan altos niveles de contaminación han sido estudiadas ampliamente con el fin de reducir las afecciones causadas a la población que habita en estas regiones (World Health Organization, 1993).

Una medida crucial adoptada en el 2015 para la reducción de contaminantes al aire es el Acuerdo de París. Este acuerdo, planteado por la Organización de las Naciones Unidas ha sido firmado y adoptado por 195 países, incluyendo a China, India y Ecuador. El acuerdo de París tiene como objetivo principal “Reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, en el contexto del desarrollo sostenible y de los esfuerzos por erradicar la pobreza” (United Nations, 2015, pág. 3) y una de las acciones realizadas para cumplir este objetivo es la reducción de los niveles de contaminación del aire tanto ambiental como en interiores. Reducción de energías fósiles, adopción de fuentes de energía renovables y limpias como la solar y eólica han llevado actualmente a China a ser el líder mundial en producción limpia según los datos del Foro Económico Mundial (World Economic Forum, 2018).

En el caso más local de América Latina, la calidad de aire se ha convertido en un problema muy grave en algunos países debido al desarrollo urbano y una creciente

industrialización (Romieu, Weitzenfeld, & Finkelman, 1991). En Ecuador, a partir del 2006 se implementó la primera Red de Monitoreo de la Calidad del Aire que permite, actualmente medir las concentraciones de contaminantes en las urbes. En 2017 el estudio realizado por la Secretaría del Ambiente Ecuatoriana determinó que el índice de contaminación en Ecuador es de 50 micrómetros por metro cúbico en promedio (Secretaría del Ambiente Ecuatoriana, 2017). Este valor de contaminación se encuentra dentro del rango moderado (medio - alto) establecido por la OMS en 2005 (World Health Organization, 2005). En 2015 se realizó un estudio breve sobre la calidad de aire en interiores dentro de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, sin embargo, se realizaron escasas pruebas y no se profundizó en el tema (Meneses Buitrón, 2015).

A partir del año 2010 en Ecuador, el Ministerio del Ambiente mantiene un Plan Nacional de la Calidad del Aire, en el cual se busca establecer un lineamiento base para la regulación de la calidad del aire, todo esto a nivel de exteriores (Secretaría de Ambiente, 2010). Juan Carlos Ortega y Rafael García, estudiantes de la Universidad Católica de Cuenca, desarrollaron un proyecto que permite medir diferentes variables contaminantes de un ambiente exterior, por lo que se utilizaron sensores y equipos industriales, como por ejemplo, sensores Swisessor para mediciones de CO₂ y CO, sensor KOBOLD para mediciones de humedad y temperatura, sensor de indicación digital PAS para mediciones de presión atmosférica y un PLC Siemens S7-1200, todo esto integrado en un sistema de medición industrial (Ortega & García, 2014).

La monitorización de la calidad del aire dentro de ambientes cerrados es una parte esencial en la construcción de sistemas de control ambiental para asegurar que las condiciones del lugar sean óptimas para un desempeño saludable de las personas (Preethichandra, 2013). La calidad de aire hace referencia al contenido del aire, ya sea

bueno o malo para la salud, el cual puede afectar a la salud del habitante incluyendo su concentración, confort, etc.

Se define como una buena calidad de aire a aquel cuyas concentraciones de contaminantes no superan cierto nivel ya sea de tipo químico (gases), biológico (bacterias, hongos) o físico (polvo o partículas ultrafinas). El nivel de contaminantes permitidos en el aire está determinado por algunas organizaciones internacionales como la ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers) (Saad, Yusof, Zakira, & Shakaff, 2013).

El problema con el análisis de la calidad de aire en ambientes cerrados radica en el bajo flujo de aire limpio o un mal sistema de ventilación, promoviendo la generación de concentraciones de contaminantes que afectan negativamente a las personas. Estas concentraciones no siempre están distribuidas equitativamente dentro del área cerrada, donde factores como una mayor concentración de personas o la disposición física del lugar. Pueden influenciar la ubicación de más o menos contaminantes en sectores específicos (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 1987). Debido a esta distribución, la implementación de una red de sensores distribuida en el área cerrada de tal manera que permita un análisis global del área toma importancia en el análisis de esta problemática.

La implementación de redes inalámbricas de sensores permite un análisis mucho más completo de la realidad ambiental dentro de zonas cerradas, lo que ha posibilitado diseñar sistemas inteligentes de control de ventilación, temperatura y aire acondicionado HVAC (Heating, ventilation and air conditioning) que, aprovechando la información proporcionada por los sensores, pueden climatizar adecuadamente entornos cerrados (Li & He, 2017).

Actualmente existe una amplia variedad de dispositivos comerciales dedicados a la monitorización de la calidad de aire, principalmente para su implementación en áreas urbanas. Empresas como “Libelium” que presentan soluciones dirigidas al Internet de las Cosas (IoT), cuentan con sistemas para la detección de contaminantes específicos, y con rangos muy amplios de comunicación entre dispositivos, por lo que son utilizados dentro de ciudades grandes para medir sus niveles de contaminación (Libelium, 2018). El constante crecimiento de las tecnologías inalámbricas ha permitido a empresas como “Spec Sensors” a desarrollar soluciones embebidas con sistemas de comunicación a costos relativamente bajos, que permiten desarrollar con libertad sistemas dedicados a diferentes necesidades ambientales tanto en interiores como en exteriores (SPEC Sensors, 2018).

Justificación e Importancia

En nuestra actividad cotidiana invertimos la mayor parte del tiempo en un aula, salón, laboratorio, dormitorio o cualquier tipo de ambiente cerrado, si este ambiente no posee un sistema de ventilación adecuado se pueden acumular contaminantes como gases, bacterias, hongos. Estos contaminantes, además del uso de materiales de construcción poco recomendables, a base de productos químicos como: amiantos, colas para moquetas o fibras de vidrio causantes de cánceres, problemas respiratorios y alergias que, respectivamente constituyen fuentes concretas de contaminación interior (Guardino Solá, 2017).

Estudios han demostrado que la exposición a este tipo de contaminantes produce síntomas como sequedad, picazón, enrojecimiento de los ojos, congestión nasal, rinitis, sensación de ahogo, bronquitis, dolor de cabeza, somnolencia, dificultad para concentrarse, irritabilidad, ansiedad, náuseas y mareo (Guardino Solá, 2017). Específicamente la exposición durante 20 minutos a un nivel de contaminación de 7.5%

de CO₂ produce una disminución del rendimiento mental (Centro Canadiense de Seguridad y Salud Ocupacional, 2006), de igual manera la OMS informa que la presencia de mohos y humedad en un ambiente cerrado es la causa de incremento hasta en un 50% en las afecciones mencionadas (European Respiratory Society, 2019). En 1962 se reportaron casos en los que se relacionan la exposición a un ambiente contaminado tanto interior como exteriormente con causas de enfermedades mentales (Randolph, 1970).

Es por esta razón que es necesario controlar los niveles de concentración no solo de los gases, sino también de la calidad del aire en general. Sin embargo, no se puede aplicar una estrategia de control sin antes saber las condiciones iniciales del ambiente, por ello se resalta la importancia de establecer una línea base de las condiciones ambientales y concentración de gases, con los lineamientos necesarios para aplicar estrategias de control en trabajos futuros.

Alcance del Proyecto

El proyecto se centrará en el diseño e implementación de un sistema de sensado compuesto por 4 plataformas, dos móviles y dos fijas, cada una con la capacidad de medir CO₂, CO, Calidad de Aire, además de variables ambientales como presión, humedad, luminosidad y temperatura. La red constará de una plataforma principal en la cual se recopilará y procesará los datos obtenidos y tres secundarias las cuales recopilan y envían los datos obtenidos. Con ello se levantará una línea base de la calidad del aire y condiciones ambientales de diferentes ambientes de prueba, los resultados se mostrarán en una HMI, que permite la visualización de la información de manera independiente y fuera de línea del sistema de sensado.

Las estaciones móviles seguirán una trayectoria predefinida para su ubicación en lugares estratégicos donde realizarán mediciones en diferentes periodos temporales durante todo el proceso. Las trayectorias serán diseñadas de tal forma que permitan una

cobertura máxima del área de sensado que incluirá a las estaciones fijas igualmente ubicadas en puntos tácticos para una medición repetitiva en los puntos fijos.

La comunicación entre las estaciones y plataformas se realizará de forma inalámbrica mediante Wi-fi. Utilizando este medio como base para la implementación de protocolos de comunicación utilizados en el Internet de las Cosas (IoT). El uso de este tipo de transmisión permitirá una comunicación confiable y segura y con estándares específicos para redes de sensores. Esto permitirá la transferencia de información entre las estaciones para su posterior almacenamiento, procesamiento y visualización en una interfaz HMI. La interfaz HMI será capaz de mostrar la información adquirida y procesada para una fácil comprensión del usuario. Gráficas estadísticas y representación de las variables temporales procesadas posterior a su recolección en los periodos de prueba.

Las pruebas de funcionamiento del sistema de sensado para el monitoreo de la calidad de aire y condiciones ambientales se realizarán en diversos ambientes controlados durante periodos de prueba específicos, siguiendo un adecuado protocolo de muestreo se implementará el sistema de sensado de tal forma que intervenga lo menos posible con el desarrollo habitual del entorno.

Objetivos

Objetivo General

Diseñar e implementar una red de sensores inalámbricos fijos y móviles que permitan la monitorización, el sensado, transmisión, almacenamiento y procesamiento de los datos obtenidos sobre la calidad del aire y condiciones ambientales en espacios interiores.

Objetivos Específicos

- Diseñar cuatro estaciones multisensado que permitan obtener datos sobre las condiciones ambientales, concentración de gases y calidad del aire.
- Automatizar dos plataformas robóticas que permitan un desplazamiento autónomo en ambientes cerrados para el sensado en diferentes ubicaciones.
- Implementar las cuatro estaciones multisensado en dos puntos estratégicos fijos del espacio interior y dos sobre las plataformas robóticas móviles, para una mayor cobertura del área de sensado.
- Establecer la red inalámbrica para la comunicación, almacenamiento y manejo de los datos adquiridos por las estaciones fijas y móviles.
- Diseñar una Interfaz Humano Máquina (HMI) para la visualización y procesamiento de los datos obtenidos del sistema de sensado.
- Monitorizar la calidad de aire y condiciones ambientales en espacios interiores aplicando el sistema de sensado, verificando su funcionamiento.

Capítulo II

Marco Teórico

Introducción

Aproximadamente el 80% de las actividades cotidianas se realizan en espacios interiores (colegios, oficinas, viviendas, fábricas, etc.), es por esta razón que la calidad de aire que se respira, además de diferentes condiciones ambientales del interior tales como temperatura, iluminación y humedad dentro de estos lugares pueden afectar de forma directa a la salud y el confort de quienes los habitan.

Para poder determinar las condiciones ambientales de interior en estos lugares es importante conocer las fuentes de origen de los componentes que afectan a la calidad de aire, además de la repercusión a corto y largo plazo que tienen sobre el bienestar de sus habitantes en función al tiempo expuestos a estas. En la actualidad se han diseñado una amplia variedad de sensores de bajo costo que permiten medir estas condiciones, mismos que son incorporados en diferentes sistemas fijos y móviles, e incluso dentro de nuevas tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT). Estos sistemas dependiendo de las aplicaciones se implementan en conjunto con sistemas robóticos para su uso en la medicina, la industria y el hogar.

En este capítulo se realizará una revisión de los principales contaminantes en espacios interiores, sus afecciones y los sistemas de sensado para su monitorización, que servirán como punto de partida para el desarrollo de los capítulos posteriores.

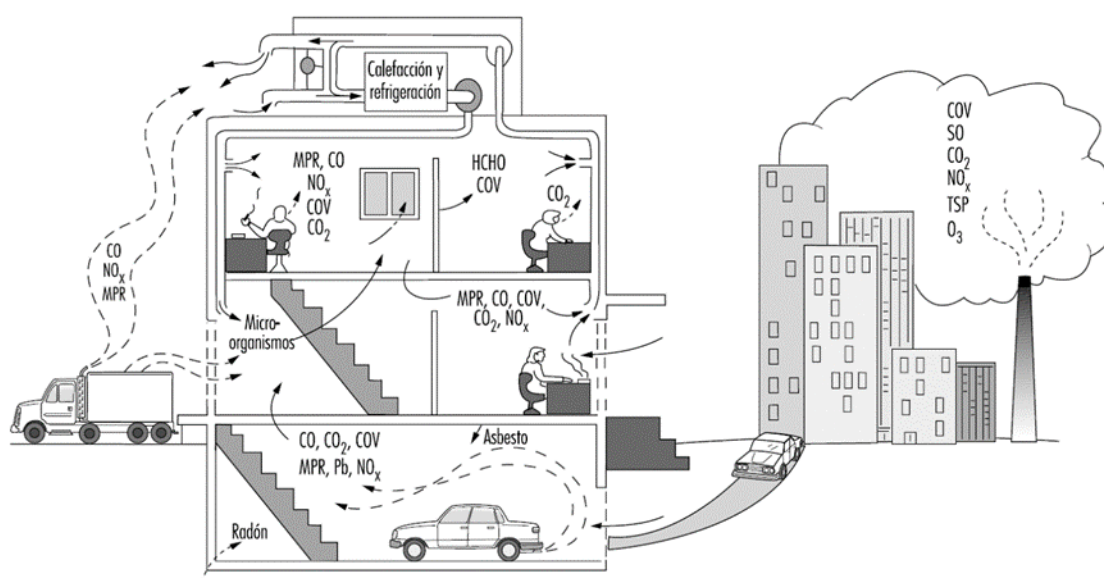
Principales Contaminantes del Aire en Espacios Interiores

Los principales contaminantes presentes en espacios interiores como edificios o viviendas tienen diferentes orígenes, tanto provenientes del exterior de la construcción como originados en el interior de esta, entre ellos: agentes y procesos biológicos; derivados de procesos de combustión; gases y compuestos orgánicos volátiles (COV)

(Carazo Fernández et al., 2013). En la Figura 1 se presenta un esquema de las principales fuentes de contaminación en una vivienda tanto externas como internas para entender mejor su distribución y los factores que afectan a sus habitantes, mientras que en la Tabla 1 se presenta un resumen de los principales contaminantes de exterior e interior y sus fuentes de origen.

Figura 1.

Distribución y Origen de Contaminantes en Espacios Interiores.



Nota. Adaptado de (Stellman & Solá, 1998).

Tabla 1.

Principales Contaminantes en ambientes interiores y su origen más común.

Situación	Fuentes de emisión	Contaminante
Exterior	Producción industrial	SO ₂ , NO ₂ , NO, Ozono, Partículas, CO y
	Vehículos de motor	COV
	Suelo	CO, NO ₂ , NO, Plomo, Radón
Interior	Materiales de construcción	Radón
	Piedra, hormigón	Formaldehído, COV
	Compuestos de madera	Formaldehído, Fibra de vidrio

Situación	Fuentes de emisión	Contaminante
	Aislamiento	Asbesto
	Ignífugos	COV, Plomo
	Pintura	
	Instalaciones y mobiliario	CO, CO ₂ , NO ₂ , NO, COV
	Calefacción, cocinas	Partículas
	Fotocopiadoras	Ozono
	Sistemas de ventilación	Microorganismos
	Ocupantes	
	Actividad Metabólica	CO ₂ , Vapor de agua
	Actividad biológica	Microorganismos
	Actividad humana	
	Tabaquismo	CO, Partículas ...
	Ambientadores	Fluoro carburos, Olores
	Limpieza	COV, Olores
	Ocio, actividades artísticas	COV, Olores

Nota. Adaptado de Contaminantes y sus fuentes más comunes por (Carazo Fernández et al., 2013).

Los contaminantes de origen exterior consisten principalmente en compuestos químicos procedentes fundamentalmente de procesos de combustión de vehículos de motor, tales como CO, hidrocarburos y óxidos de nitrógeno. Adicionalmente se tienen óxidos de azufre (SO₂) y compuestos orgánicos volátiles (COV) generados principalmente en centrales eléctricas y otros procesos industriales. Otros contaminantes de origen exterior se filtran a través de cimientos en construcciones y consisten en vapores de gasolinas, emanaciones de cloacas y radón de origen natural (Bartual et al., 1987; Stellman & Solá, 1998).

Por otra parte, las actividades realizadas en el interior de edificaciones, materiales de construcción y mobiliario, uso de productos artificiales, etc. Son fuentes de emisión de químicos que alteran la calidad del aire desde el interior. Una de las principales fuentes

contaminación en un espacio interior provienen de procesos de combustión con ventilación deficiente o falta de mantenimiento en: cocinas, estufas, sistemas de calefacción, refrigeradores y hornos a gas, que pueden liberar contaminantes como CO, NO, NO₂, SO, y partículas de material (PM). Destacando el monóxido de carbono (CO) debido a que a bajas concentraciones puede producir síntomas respiratorios en individuos sanos y empeorar las condiciones en personas con enfermedades cardiopulmonares (US EPA, 2000).

En países menos desarrollados, el principal origen de la baja calidad del aire de interior es el empleo de elementos orgánicos como combustible (madera, carbón, hierba, residuos de cosechas, etc.) y pese a que se han empezado a sustituir por fuentes más limpias, el 50% de todos los hogares del mundo y el 90% de los hogares rurales siguen utilizando estos combustibles orgánicos como principal fuente de energía (Bruce et al., 2000; Carazo Fernández et al., 2013).

Las fuentes de contaminación interior procedentes de materiales de construcción son las que tienen mayor impacto sobre la salud. A estos contaminantes se los clasifica en dos grupos en función de su diámetro que es medido en micrómetros (PM₁₀ y PM_{2.5}). Las fibras de vidrio que son utilizadas como aislante térmico en sistemas de ventilación, el asbesto utilizado en la construcción y en materiales de aislamiento pueden producir partículas peligrosas para la salud. Aunque son los contaminantes de más riesgo en espacios interiores, estos se dan con menor frecuencia ya que se producen en mayor cantidad durante construcciones y desmantelamientos. Las fuentes de contaminación procedentes de productos de limpieza, acumulación de polvo en muebles y materiales de oficina como ordenadores, impresoras, fotocopiadoras, etc., son fuentes importantes de COV. En especial en oficinas donde a mayor cantidad de ordenadores se empeora la

sensación subjetiva de la calidad del aire (Bakó-Biró et al., 2004; Blanxart, n.d.; Isidro Montes et al., 2005; Salvi & Barnes DM, 2010).

Finalmente, las fuentes de contaminación producto de la actividad humana incluyen productos de limpieza y de aseo personal que pueden contener partículas irritantes, aunque en concentraciones bajas. La acción metabólica del ser humano, que al respirar emite CO₂ además de las personas que fuman. La acumulación de material orgánico (papel, madera, pintura, alfombras, etc.) que sirve como nutriente para bacterias y hongos favorece el crecimiento microbiano. La recirculación de agua en sistemas de humidificación se puede contaminar y actuar como reservorios de bacterias. Dicho esto, si no existe un mantenimiento y limpieza adecuados, estas fuentes de contaminación pueden promover el deterioro de la calidad de aire y aumentar el riesgo de contagio de enfermedades infecciosas (Burger, 1990; Steinemann, 2018).

Todas las fuentes de contaminación mencionadas se presentan con una distribución porcentual de su presencia dentro de edificios y viviendas como se muestra en la Tabla 2 en donde se puede apreciar que la principal causa de la contaminación interior es debido a una mala ventilación y que debido a esto es que se presentan los primeros indicadores de afecciones a la salud.

Tabla 2.

Distribución porcentual de contaminantes en interiores.

Causa – Origen	Valor Porcentual
Mala ventilación	50 – 52 %
Humo de tabaco y artículos de limpieza	17 – 19 %
Contaminación Exterior	11%
Contaminación microbiológica	5%
Materiales de construcción	3 – 4%

Nota. Adaptado de Contaminación del aire de interiores y salud (OMS, 2016).

Principales Afecciones Producidas por la Mala Calidad del Aire en Espacios Interiores

Para considerar como idóneas las condiciones de interior para los seres humanos es necesario determinar la calidad del aire mediante el análisis químico de los agentes contaminantes, de igual importancia es el análisis de las condiciones medioambientales. La combinación estos agentes puede potenciar las afecciones a los seres humanos, es así que, aun teniendo niveles bajos de concentración, al estar mezclados y matizados por factores como humedad, olores, temperatura, luminosidad, etc., puede dificultar la percepción de su calidad. Más aun, en cantidades suficientes pueden producir un aire que se percibe como irritante, viciado, turbio y hasta pesado, es decir, un aire de mala calidad. A pesar de que los casos en que la mala calidad del aire interior da lugar al desarrollo de enfermedades son pocos, una baja calidad de aire puede influir en el rendimiento de las actividades cotidianas (Carazo Fernández et al., 2013; Stellman & Solá, 1998). En la Tabla 3 se presentan las diferentes condiciones ambientales y sus concentraciones separadas por rangos para determinar el estado de contaminación del espacio interior.

Tabla 3.

Índice de valores de los contaminantes dentro de espacios interiores.

PM ₁₀ (mg/m ³)	VOC (ppm)	O ₂ (%)	Temp (°C)	Hum (%)	CO ₂ (ppm)	CO (ppm)	O ₃ (ppm)	IAQI	IAQI* Estado	TCI** Estado
0.000- 0.020	0.000- 0.089	23.5- 20.9	20.0- 26.0	40.0- 70.0	340- 600	0.0- 20.0	0.000- 0.025	100-76	Bueno	Más cómodo
0.021- 0.150	0.090- 0.261	20.8- 19.5	26.1- 29.0	70.1- 810.0	601- 1000	21.0- 50.0	0.025- 0.05	75-51	Moderado	Cómodo
0.151- 0.180	0.262- 0.43	19.4- 12.0	29.1- 39.0	80.1- 90.0	1001- 1500	51.0- 70.0	0.051- 0.075	50-26	Insalubre	Incómodo
0.181- 0.600	0.44- 3.00	11.9- 10.0	39.1- 45.0	90.1- 100.0	1501- 5000	70.1- 150.0	0.076- 0.1	25-0	Peligroso	Más incómodo

* *Indicador de Calidad de Aire*, ** *Indicador de Confort Total*

Nota: Adaptado de Estado de la calidad del aire en entornos cerrados, por (Saad et al., 2017).

Generalmente cuando el 20% o más de los habitantes de un edificio presentan quejas de la calidad del aire, o cuando se presentan síntomas claros, a este fenómeno se lo define como *síndrome del edificio enfermo*. Según la Organización Mundial de la Salud, alrededor de 3,8 millones de personas mueren de forma prematura debido a enfermedades atribuibles a la contaminación del aire interior. Las principales causas son: 27% por neumonía, 18% por accidente cerebrovascular, 27% por cardiopatía isquémica, 20% por neumopatía obstructiva crónica, y 8% debido a cáncer de pulmón. En la Tabla 4 se presenta un listado de los principales síntomas que se presentan en las personas debido a una mala calidad de aire interior (OMS, 2016).

Tabla 4.

Síntomas relacionados con la calidad del aire interior.

Área afectada	Síntomas
Ojos	Sequedad, picor, lagrimeo, enrojecimiento.
Vías Respiratorias	Sequedad (nariz, garganta), escozor, congestión nasal, goteo nasal, estornudos, dolor de garganta.
Pulmones	Opresión torácica, sensación de ahogo, tos seca, bronquitis.
Piel	Enrojecimiento, picor generalizado y localizado, sequedad.

Nota. Adaptado de Síntomas y enfermedades relacionados con la calidad del aire interior (Stellman & Solá, 1998).

Es por esta razón que, con el objetivo de reducir el impacto sobre la salud de los habitantes, quienes pasan el mayor tiempo de su vida en espacios interiores que cada vez más se implementan sistemas de monitoreo de las condiciones ambientales y calidad del aire que permitan detectar de forma rápida y localizada a los problemas de este tipo, llegando a desarrollarse sistemas especializados para diferentes propósitos y entornos.

Sistemas de Medición de Calidad del Aire

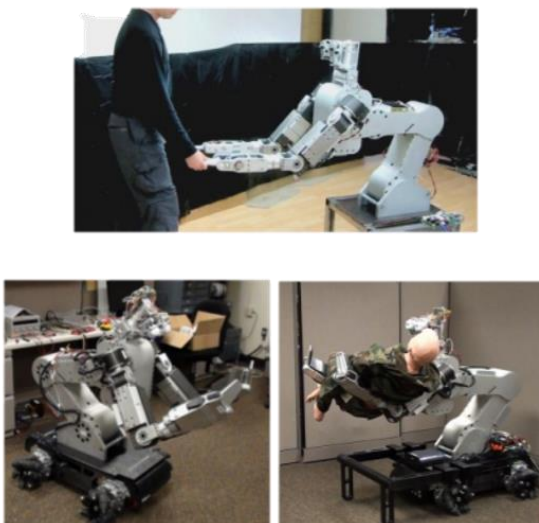
Como se mencionó en la sección anterior, para poder determinar las condiciones ambientales en espacios interiores se requiere de la medición de múltiples variables, tanto químicas como del medio ambiente. Es por esto que para que un sistema pueda determinar estas condiciones deberá integrar diferentes sensores que le permitan obtener datos específicos de cada variable involucrada dependiendo del entorno de medición y el propósito del mismo. A continuación, se presenta el estado del arte de sistemas de medición y monitoreo de la calidad de aire y condiciones ambientales en donde se describen varios estudios e implementaciones de sensores en diferentes entornos, desde el sector industrial hasta el doméstico, tomando en cuenta el sector hospitalario que es el más reciente en implementar estos sistemas gracias al desarrollo de nuevas tecnologías como el internet de las cosas.

El estudio serio sobre los efectos ambientales y de salud producidos por la calidad del aire inició principalmente en el sector urbano e industrial. El desarrollo de la manufactura comenzó a generar niveles de contaminación que ya no pasaron desapercibidos. Motivado por esto, en 1957 la organización mundial de la salud lanzó el primer reporte técnico sobre la calidad del aire y sus efectos a la salud. Es por esta razón que las primeras implementaciones de sistemas de medición de calidad del aire fueron implementadas en entornos industriales (Maynard et al., 2017). Uno de los mayores exponentes de esto es China, que constituye uno de los países más contaminados a nivel mundial por su alta densidad poblacional, y actividad industrial, por lo que desde 1978 han implementado sistemas de medición especialmente en las industrias de Cemento, cuya contaminación en CO₂ representa 15% de la contaminación total del país. Actualmente China lidera el desarrollo de tecnología para la monitorización de calidad del

aire, implementando redes de sensores que abarcan más de 300 ciudades monitorizadas en tiempo real. (Zhang et al., 2020; Zimmermann et al., 2018).

Aunque inicialmente la mayoría de estudios y reportes sobre calidad del aire eran enfocados al exterior, a los finales del siglo XX enormes esfuerzos con el objetivo de estudiar el efecto de la calidad del aire en interiores empezaron en sectores como el energético donde la producción de CO₂ es uno de los principales contaminantes afectando de forma directa a los trabajadores, un ejemplo claro de esto son las hidroeléctricas, por lo que fue necesaria la implementación de un sistema de medición de calidad de aire que permita ejecutar acciones de control dentro de este entorno industrial generalmente subterráneo. En Islandia la central hidroeléctrica *Hellisheidi* es una de las primeras centrales en implementar un sistema de medición de CO₂ que les permite inyectar este gas de vuelta a la tierra para que se convierta en minerales, logrando así, uno de los procesos más limpios para generar energía eléctrica (Hellisheiðarvirkjun, n.d.; Sundell, 2004).

La evolución de estos sistemas de medición ha permitido a sectores como el hospitalario y doméstico acceder a sistemas de monitorización de calidad del aire a bajo costo, impulsado por el desarrollo tecnológico una creciente tendencia por la lucha por el impacto ambiental. La dificultad de acceso a ciertas áreas dentro de hospitales ya sea por razones de bioseguridad o falta de personal ha fomentado el uso de plataformas robóticas para la automatización de procesos simples o peligrosos, tales como limpieza y entrega de medicamentos, entre otros. Hstar Technologies en el 2011 desarrolló un asistente médico móvil robótico denominado RoNA, que proporciona al usuario médico seguridad, flexibilidad y fuerza en caso de levantar al paciente (J. Hu et al., 2011). En la Figura 2 se tiene una vista general del funcionamiento de la plataforma robótica.

Figura 2.*Asistente Médico RoNA*

Nota. Tomado de RoNA (J. Hu et al., 2011).

Poco a poco con el avance tecnológico y el desarrollo de la electrónica orientada al IoT, el uso de sistemas específicos para la medición de calidad de aire se fue expandiendo a entornos residenciales, tales como la Domótica y Ambientes Laborales, en muchos casos con el objetivo de precautelar la seguridad de sus ocupantes, mientras que en otros casos con el objetivo de simplemente conocer la situación actual de un entorno o realizar tareas del hogar. Por esta razón un sensor inteligente o un sistema capaz de enviar información a la nube en tiempo real es un tema muy importante y cada vez más común.

Un caso particular de aplicación de esta tecnología es *Netatmo*, una estación meteorológica inteligente capaz de medir calidad de aire y nivel de ruido tanto en el interior como en el exterior del domicilio. La estación envía esta información a dispositivos móviles, y además genera alertas visuales cuando sea necesario ventilar el entorno (Netatmo, 2018).

Por otra parte, la implementación de plataformas robóticas como herramientas principalmente de limpieza en ambientes domiciliarios es más común. En la Figura 3 se observa **iRobot**, el cual es una plataforma robótica de limpieza cuyo principio de funcionamiento se basa en la implementación de sensores ópticos y acústicos para la detección de concentraciones de polvo, lo que le permite realizar una limpieza focalizada dependiendo de los niveles de contaminación (iRobot, 2018).

Figura 3.

Plataforma Robótica iRobot



En relación con la implementación de redes de sensores para la monitorización de calidad de aire y condiciones ambientales, comercialmente se tienen varias alternativas, por mencionar una de ellas se tiene la empresa Newentor que ha desarrollado una estación meteorológica para ambientes interiores como exteriores. Esta estación es capaz de medir en cuatro puntos diferentes variables como: temperatura, humedad y presión barométrica. En la Figura 4 se puede observar la estación Meteorológica Newentor (Newentor, 2020).

Figura 4.*Estación Metereológica Newentor*

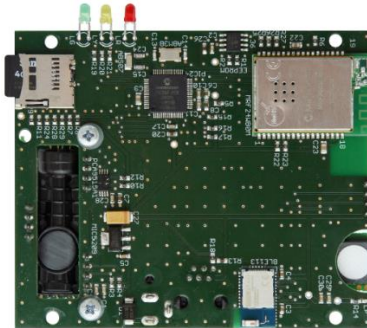
Una de las desventajas que tienen los prototipos comerciales es la relación costo beneficio, puesto que, en la mayoría de los casos estos dispositivos son extremadamente caros y su aplicación no es escalable ni flexible. Debido a esto existen varios diseños y prototipos cuyas características mejoran el desempeño en cuanto a medición de calidad de aire y condiciones ambientales se refiere, a continuación, se presentan varios prototipos funcionales.

Prototipos de Sistemas de Sensado de Calidad de Aire

La calidad de aire en entornos interiores es mayormente influenciada por la actividad cotidiana que realizan sus ocupantes, debido a esto estudiantes investigadores de IEEE de la universidad de Erlangen en Alemania aplicaron el uso de un sistema de medición de calidad de aire en ambientes cerrados para desarrollar un sistema de detección de personas no invasivo. El sistema capaz de medir CO₂, temperatura, humedad y COV mostró resultados satisfactorios al identificar no solo la presencia, sino también el número de personas en un departamento. En la Figura 5 se puede observar el sistema desarrollado (Zimmermann et al., 2018).

Figura 5.

Sistema no intrusivo para detección de presencia de personas en espacios interiores.



Nota. Tomado de Fusion of Non-Intrusive Environmental Sensors for Occupancy Detection in Smart Homes (Zimmermann et al., 2018).

Quando se estudian sistemas de sensores para el monitoreo de la calidad de aire en lugares cerrados es inevitable hablar sobre sistemas domóticos, ya que en base a la información de los sensores se puede configurar alertas, toma de decisiones, controlar la activación de sistemas de limpieza e incluso predecir la evolución de las variables para evitar afecciones a sus ocupantes, a través de este contexto en un artículo publicado por investigadores del IEEE se aplica un sistema de sensores desarrollado por Libelium, denominado Wasmote, ver Figura 6, para el control de la calidad de aire y mejora del sistema inteligente en edificios, el cual es capaz de enviar los datos a un servidor exclusivo para la implementación de módulos Wasmote para el procesamiento y predicción de la calidad de aire tomando en cuenta los siguientes contaminantes Dioxido de Carbono, Monóxido de Carbono, Oxígeno, Hidrogeno, Anmonio, Etanol, Sulfato de Hidrogeno, Tolueno, Temperatura y Humedad (Ha et al., 2020).

Figura 6.

Sistema de sensado Waspote.



Nota. Adaptado de Sistema de muestreo waspmote Libelium, por (Ha et al., 2020).

La eficiencia del uso de sensores individuales es menos eficaz cuando el área de medición es mayor, por lo que los datos obtenidos serán menos relevantes en un contexto general, es debido a ello que es necesario la implementación sistemas de medición basados en redes de sensores que permitan una cobertura óptima del área a sensar.

Prototipos de Sistemas de Redes de Sensado de Calidad de Aire

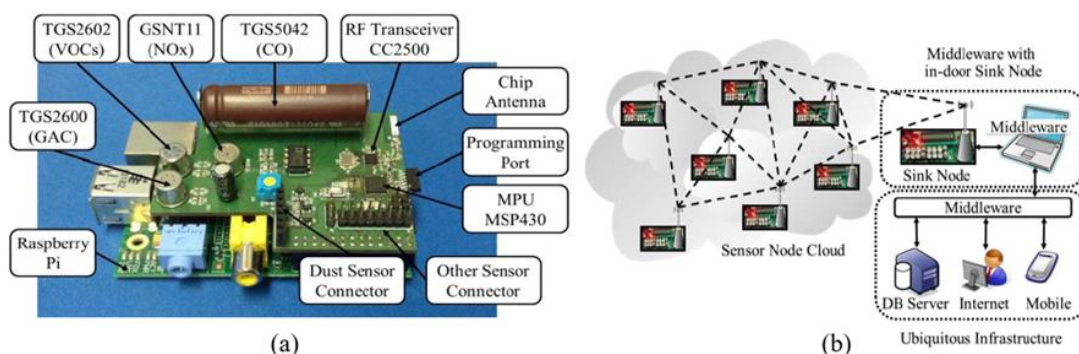
El objetivo principal de la implementación de una red de sensores es mejorar la eficiencia dentro del análisis de un entorno. Al igual que el uso de un solo sensor en relación con un sistema de varios sensores limita la adquisición de información, la implementación de un solo sistema de sensado no es suficiente cuando el área de análisis es amplia, es por esto que la implementación de un conjunto de sistemas en red o redes de sensores permite mejorar la cobertura del entorno de estudio.

Para la implementación de una red de sensores es muy importante analizar los requerimientos del sistema ya que si se necesitan datos con alta precisión y confiabilidad se debe analizar la evolución de varias variables que afectan la calidad de aire, esto implica aumentar el número de sensores y nodos de una red, que a su vez aumenta tanto el tráfico en la red como el consumo de energía, como resultado la implementación de la

red es ineficiente. Tomando en cuenta estos análisis, estudiantes del IEEE diseñaron un sistema óptimo de una red de sensores que les permitiera monitorear la calidad de aire en lugares cerrados o abiertos, basados en el uso de una Raspberry Pi 3, ver Figura 7. Su sistema fue aplicado tres entornos diferentes: un salón de clases, una habitación y una iglesia, cuyos resultados muestran el impacto de las variaciones de humedad y temperatura en la respuesta de los sensores por lo que fue necesario la implementación de un algoritmo de auto calibración en base a sensores de humedad y temperatura (Kim et al., 2014).

Figura 7.

(a) Prototipo de un nodo sensores para el monitoreo de la calidad de aire tanto en ambientes interiores como exteriores, (b) Configuración de la red.



Nota. Adaptado de Nodo para el monitoreo de la calidad de aire, por (Kim et al., 2014).

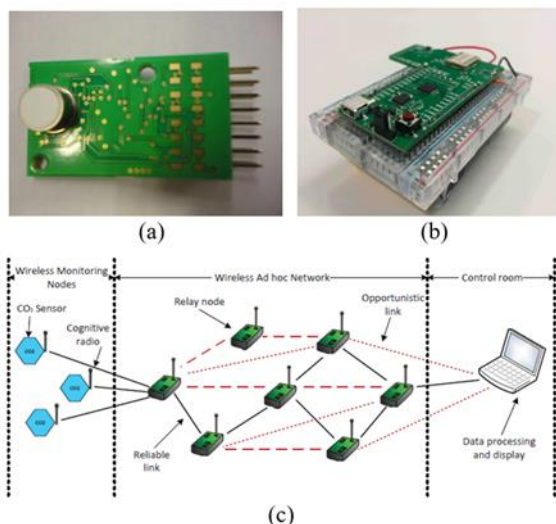
Otro de los objetivos que envuelve el uso de una red dentro del IoT es la interoperabilidad, la cual es necesaria para gestionar los datos obtenidos por los sensores hacia una aplicación o interfaz y cuyo uso es útil tanto para ambientes personales, laborales, médicos, industriales, en la agricultura y muchos otros campos. Investigadores del IEEE publicaron un artículo en el *IEEE Internet Of Things Journal* centrado su estudio en el desarrollo de un sistema enfocado en proyectar los niveles de contaminación y de la calidad de aire de una ruta en específico, análogo a Google maps, para ello

implementaron sensores de Monóxido de Carbono, Metano y Calidad de Aire en varios vehículos, esta información es enviada a un servidor en la nube que procesa la información para construir mapas de calor de un área específica con la interpolación de los datos obtenidos por los vehículos (Dhingra et al., 2019).

El potencial de una red de sensores y su fácil implementación de bajo costo son ventajas que se deben aprovechar en el diseño de redes de sensado para la calidad de aire, además se debe tomar en cuenta que en ambientes laborales pueden existir varios dispositivos Wireless, por lo que la red implementada no debe interferir con su funcionamiento, para ello en la Universidad de Toronto se implementó un sistema que permite monitorear los niveles de Dióxido de Carbono dentro de oficinas a través de una red con dispositivos de radio frecuencia cuyo protocolo de enrutamiento inteligente minimiza la interferencia con otros dispositivos existentes. En el sistema se implementan seis prototipos que incluyen un sensor iAQ-2000 y un módulo de radio frecuencia OPM15 (ver Figura 8), cada prototipo constituye un nodo que puede conectarse o desconectarse a la red según el requerimiento de monitoreo, como resultado del protocolo de enrutamiento implementado se muestra una mayor efectividad en comparación a un protocolo convencional (Spachos & Hatzinakos, 2016).

Figura 8.

Prototipo para monitorio de CO2 (a) Sensor de CO2 iAQ-2000 (b) Modulo de radio frecuencia (c) Topologia de red.



Nota. Adaptado de Framework del sistema para monitoreo de CO2, por (Spachos & Hatzinakos, 2016).

El principal problema de las redes de sensores inalámbricos es que existen puntos e incluso áreas en los cuales la señal Wi-Fi es muy débil, por lo que el implementar un sensor en dicho punto no es viable, lo que significa una pérdida de información. Una solución a este problema es la implementación de varios sensores en distintos puntos y a su vez aumentar los puntos de acceso a internet, lo cual no es muy eficiente ya que los costos aumentan considerablemente. Pero existen otras alternativas más eficientes como el uso de Robots autónomos o la implementación de una topología de red en malla en donde cada módulo es capaz de conectarse al módulo más cercano, en caso de que la señal de conectividad WiFi sea débil, es decir, cada módulo implementado actúa como punto de acceso. (Z. Hu et al., 2020)

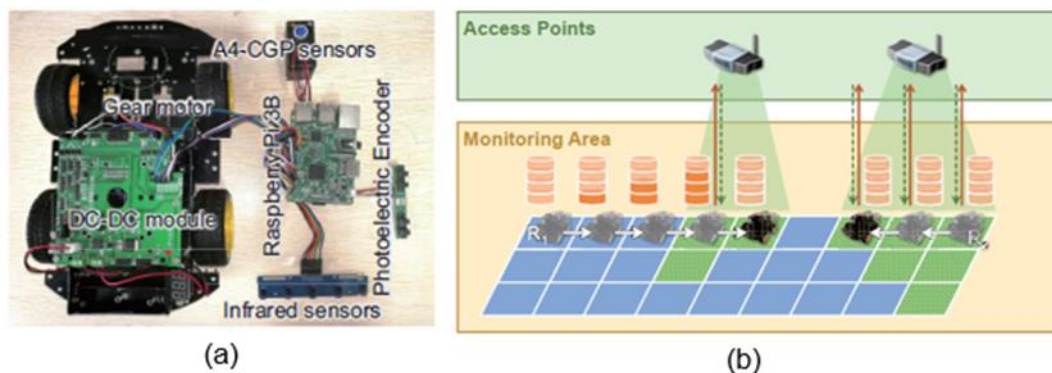
Prototipos de Sistemas Robóticos para el Sensado de la Calidad del Aire

El uso de Robots y plataformas robóticas autónomas es una alternativa mucho más viable cuando el entorno de sensado es grande, debido a que, aplicando técnicas de control de robótica cooperativa se puede cubrir áreas de sensado mayores empleando menos recursos.

En un artículo publicado por un grupo de estudiantes investigadores del IEEE se puede resaltar la implementación de un sistema denominado AirScope, el cual consta de una red de sensores montados en robots autónomos con el objetivo de sensar PM2.5 como se observa en la Figura 9. Cada robot dispone de una Raspberry Pi3 que permite a los robots almacenar, cargar y descargar datos desde un servidor y en base a estos datos cada robot puede verificar que áreas aún no han sido sensadas para corregir su trayectoria. Finalmente, el usuario tiene acceso a una interfaz web que muestra la distribución de las variables sensadas en tiempo real (Z. Hu et al., 2020).

Figura 9.

Sistema AirScope (a) Sistema Robótico, (b) Conectividad Wireless.



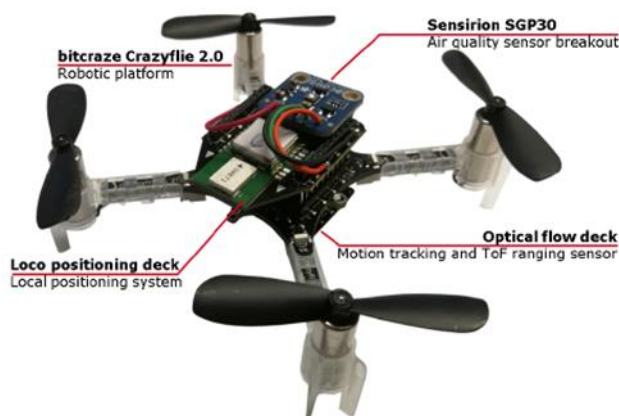
Nota. Adaptado de Implementación del sistema AirScope, por (Z. Hu et al., 2020).

Si bien es cierto que los robots representan una solución, su implementación en un entorno mucho más amplio disminuye su desempeño, además cabe la posibilidad que

el entorno no sea accesible más amplios, no son accesibles desde la superficie, dicho esto estudiantes investigadores de una Universidad Alemana publicaron un artículo acerca del uso de drones para implementar un sistema de sensado de calidad de aire en entornos industriales, la gran ventaja de este sistema es el nivel de accesibilidad que otorga un dron. Su estudio se enfoca en la detección de fuentes de contaminación que puedan ser perjudiciales para los trabajadores en ambientes industriales, tales como fugas de gas. Además, se presenta una comparación entre la afección del flujo de aire generado por las hélices a la toma de datos para ajustar la técnica de sensado y asegurar la fiabilidad de los datos obtenidos (Neumann et al., 2019). En la Figura 10 se observa el sistema de sensado implementado.

Figura 10.

Plataforma de sensado de calidad de aire montada en un dron.



Nota. Adaptado de Plataforma con sensores AQI montados, por (Neumann et al., 2019).

En resumen, el estudio de la calidad del aire en entornos interiores permite detectar los niveles de contaminación, determinar los principales orígenes de estos contaminantes y cuáles son sus repercusiones en la salud de los habitantes siendo principalmente al sistema respiratorio, debido a una mala ventilación permitiendo la

acumulación de gases y bacterias peligrosos para la salud. Es por esta razón que desde hace 20 años aproximadamente se han empezado a desarrollar reglamentos, estándares y sistemas de medición que permitan regular las condiciones ambientales. Llegando así a desarrollar sistemas complejos basados en redes de sensores, incluso combinando la robótica para tener, cada vez más control y conocimiento sobre esta problemática.

Capítulo III

Diseño de la Plataforma Multisensado de Calidad del Aire y Condiciones

Ambientales

Una vez identificadas las diferentes técnicas de sensado aplicadas en entornos interiores, se observa que la mayoría se implementan plataformas fijas cuyo alcance es limitado, sensando solamente lo que está más próximo al sensor. Por otra parte, la implementación de plataformas robóticas móviles para la medición permite cubrir una mayor área a un menor costo y con el uso de menos sensores. Por esta razón se decidió realizar la implementación conjunta de ambas técnicas de sensado construyendo una red de cuatro estaciones, dos fijas y dos montadas en plataformas robóticas móviles, con el objetivo de encontrar un balance entre costo y beneficio, cuya utilidad sea óptima al momento de realizar la monitorización de calidad de aire y condiciones ambientales.

La plataforma multisensado consiste en una estación que permite la recolección de información de las variables químicas y medioambientales en un área específica. En base a la bibliografía revisada, de todos los contaminantes químicos que afectan la calidad del aire en espacios interiores los principales y por tanto los que serán monitoreados son el CO, CO₂, y compuestos orgánicos volátiles (COV). En cuanto a condiciones ambientales, se seleccionaron las variables de temperatura, humedad, luminosidad y presión barométrica, por ser estas las que tienen mayor impacto en el confort y bienestar de los habitantes. En este capítulo se detalla el proceso de diseño, pruebas e implementación de las plataformas multisensado que son fijas. Estas plataformas serán adecuadas posteriormente para ser incorporadas en las plataformas robóticas móviles.

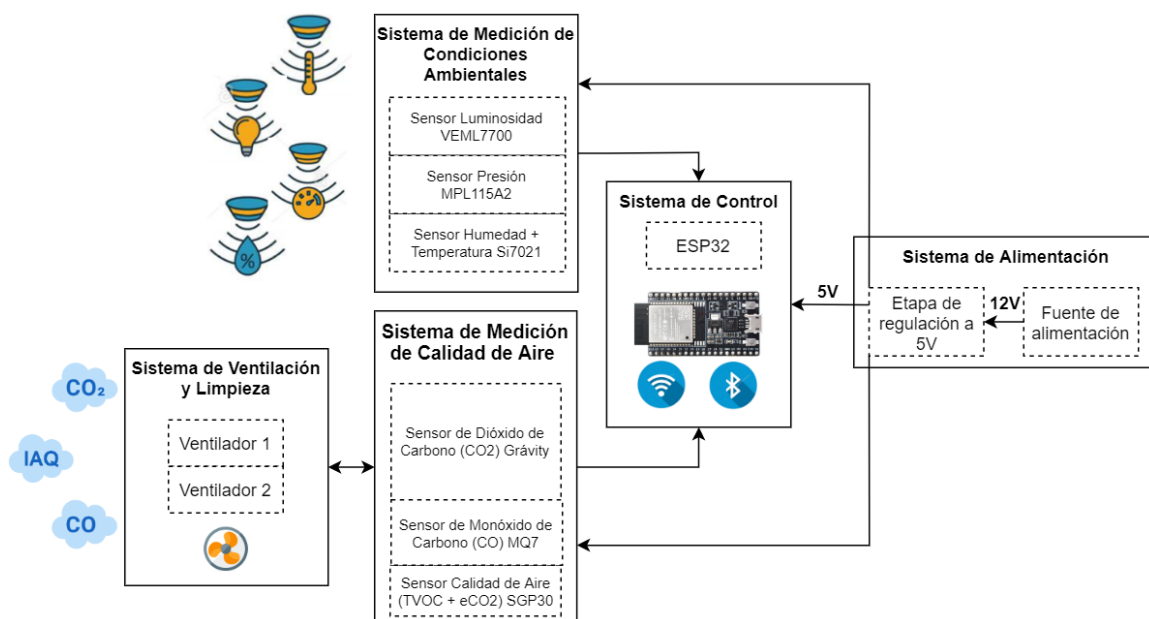
Descripción de la Plataforma Multisensado

El objetivo de la plataforma multisensado es incorporar sensores, acondicionamiento, e instrumentación que permitan tanto la recolección como el envío de la información de las variables de estudio. La plataforma está compuesta principalmente por un sistema de medición junto al sistema de ventilación y limpieza, sistema de alimentación, y el sistema de control como se muestra en el diagrama de bloques de la Figura 11.

El sistema de control principal será el encargado de controlar todos los sensores y actuadores de la estación, además de establecer la comunicación inalámbrica para la transmisión y recepción de información dentro de la red inalámbrica. El sistema de alimentación se encargará de administrar la energía en los diferentes niveles requeridos por los sub-sistemas de la estación. El sistema de medición se encargará de la adquisición de señales de los sensores de calidad de aire y condiciones ambientales, este sistema trabajará en conjunto con el sistema de ventilación y limpieza para los sensores químicos.

Figura 11.

Diagrama de bloques general de la estación multisensado.



Sistema de Medición de Calidad del Aire

La problemática ambiental que afecta a nivel global ha generado cambios en el desarrollo tecnológico, impulsado a los ingenieros a mejorar los procesos tecnológicos con el objetivo de disminuir el impacto ambiental por consecuencia de las emisiones de gases contaminantes mencionados anteriormente. Para esto, se han desarrollado sensores químicos y de medioambiente que resultan de mucha utilidad en el desarrollo de sistemas de monitoreo (Cretescu et al., 2017).

Los sensores químicos pueden ser ubicados en el lugar donde se produce la contaminación, generando lecturas precisas y permitiendo de esta manera una evaluación rápida de la problemática presente. Sin embargo, las medidas se limitan al entorno más próximo al sensor. Como ya se mencionó, para la calidad de aire se medirá CO, CO₂ y COV, para el sensado de estas variables se hizo un análisis de los diferentes tipos de sensores considerando las principales características tales como exactitud,

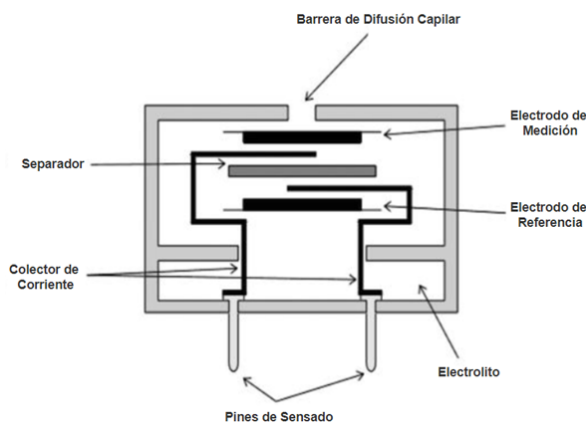
precisión, costo, tamaño. En base al análisis fueron seleccionados los sensores MQ-7 para CO con principio de funcionamiento de óxido metálico (MOX), el sensor Gravity Infrared CO₂ Sensor con principio de funcionamiento óptico, y el sensor SGP30 para COV, también de tipo óxido metálico.

Sensor de Monóxido de Carbono

Para la medición de CO se estudió la familia de sensores MQ pertenecientes a la empresa Hanwei Electronics (Hanwei Electronics, 2016). Su principio de funcionamiento se basa en variaciones de características del material de óxido metálico frente a un gas mediante una reacción química. A los sensores electroquímicos de este tipo se los conoce como sensores potenciométricos ya que obtienen información mediante una relación explícita entre el potencial de un electrodo indicador y la concentración de la especie de interés, lo que hace que su valor de resistencia eléctrica cambie en relación con la concentración del químico. En la Figura 12 se pueden observar los componentes principales de un sensor electroquímico de tipo potenciométrico también conocido como Sensor de Óxido Metálico.

Figura 12.

Diagrama de un sensor de óxido metálico.



Nota. Adaptado de Toxic Fas Sensor (Cretescu et al., 2017)

Si bien estos sensores no son específicos para un solo químico, existen circuitos electrónicos de conexión para mejorar la sensibilidad a un gas en particular. Para el caso del monóxido de carbono se seleccionó el sensor MQ-7 que es el más recomendado para su detección (Hanwei Electronics, 2016) cuyas especificaciones principales se detallan en la Tabla 5. De acuerdo con el fabricante, para realizar la medición de este sensor se debe realizar ciclos de trabajo de 150 segundo, distribuidos en 60 segundos con una tensión de alimentación de 5V para limpiar el sensor, y 90 segundos con una tensión de alimentación de 1.4V, en donde se realizará la toma de datos. Para su correcto funcionamiento es necesario un tiempo de precalentamiento de 48 horas previo a su primer uso.

Tabla 5.

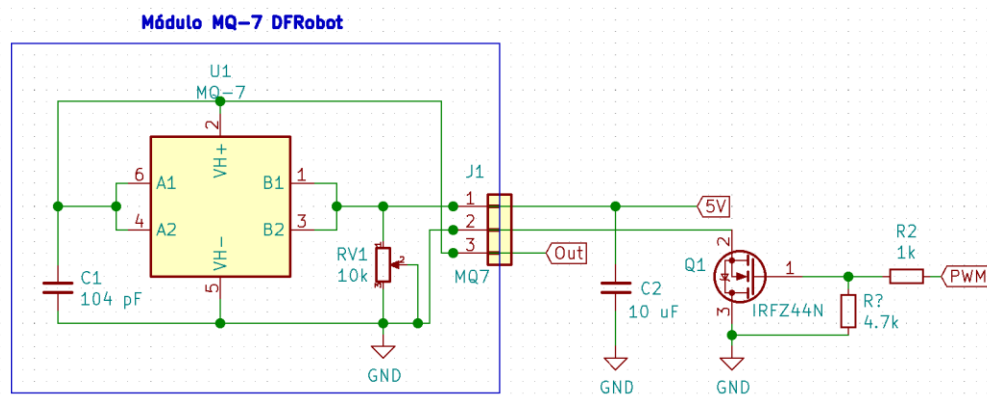
Especificaciones técnicas del sensor MQ-7.

Parámetro	Especificación
Nombre	MQ-7
Rango de medición	20 - 2000 ppm
Sensibilidad	±3 ppm
Resistencia de Carga	1-10 kΩ
Consumo eléctrico	~70 mA
Tipo de salida	Analógica
Alimentación	5 V

Debido a que este sensor posee una configuración de resistencia variable y que lo hacen más específico a un gas determinado, es necesaria la implementación de una etapa de instrumentación. Esta también nos asegura poder suministrar los niveles de voltaje de calentamiento y medición adecuados al sensor. En la Figura 13 se muestra la instrumentación implementada para la lectura del sensor MQ-7.

Figura 13.

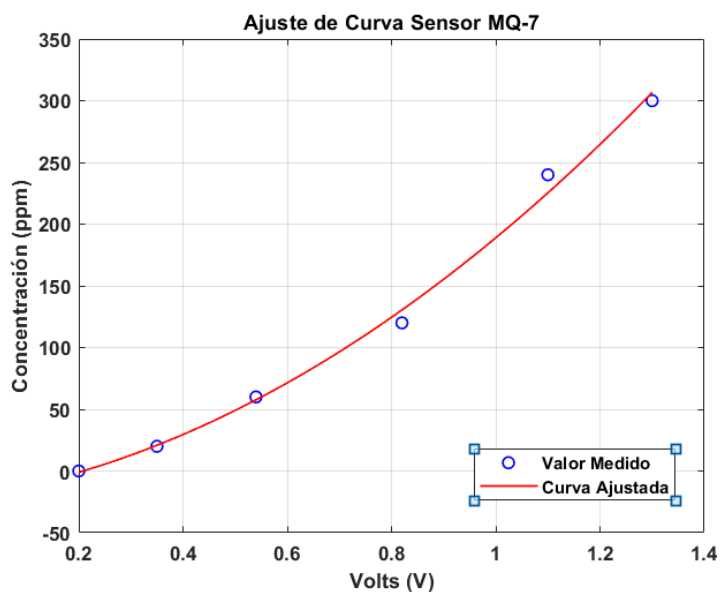
Esquemático para Instrumentación de Sensor MQ-7.



Para la calibración y ajuste de curva del sensor se realizaron pruebas con diferentes concentraciones de CO, utilizando tanques de gas certificados con diferentes concentraciones de 20 ppm, 60 ppm, 120 ppm, 240 ppm y 300 pm (Airgas, n.d.). En función a los datos recolectados se realizó el ajuste de curva correspondiente, para este caso se utilizó un polinomio de segundo grado generado por computadora, obteniendo el ajuste de la Figura 14, y el polinomio de ajuste de la ecuación (1).

Figura 14.

Ajuste de curva para sensor MQ-7.



$$f(x) = 140.9x^2 + 68.37x - 20.34 \quad (1)$$

Sensor de Calidad del Aire

Para la medición y estudio de la calidad de aire se seleccionó el sensor especializado SGP30 de la empresa Sensirion implementado en la placa de evaluación de la empresa Adafruit Industries. Este sensor, también de tipo potenciométrico presenta una respuesta en relación con las concentraciones del total de compuestos orgánicos volátiles (TCOV), además de entregar una aproximación o valor equivalente de CO (eCO₂) (Adafruit Industries, n.d.). Este módulo de Adafruit incluye un microcontrolador que le permite transmitir los datos mediante el protocolo de comunicación I²C, además incluye un regulador interno que le permite la alimentación con 5V. Su frecuencia de muestreo está especificada a una medida por segundo, lo que lo hace uno de los sensores químicos de respuesta más rápida. En la Tabla 6 se detallan las especificaciones más importantes de este sensor. Para su correcto funcionamiento es necesario un tiempo de precalentamiento mayor a 48h previo a su primer uso.

Tabla 6.

Especificaciones técnicas del sensor SGP30.

Parámetro	Especificación
Nombre	SGP30
Rango de detección eCO₂	400 – 60000 ppm
Sensibilidad eCO₂	1-31 ppm
Rango de detección TVOC	0 – 60000 ppb
Sensibilidad TVOC	1 -32 ppb
Consumo eléctrico	~48.2 mA
Tipo de salida	Digital (I ² C)
Alimentación	3.3 - 5 V
Frecuencia de muestreo	1 Hz
Resistencia pull-up (I²C)	10 kΩ
Dirección I²C	0x58

El módulo del sensor SGP30 trabaja con I²C en modo rápido, a 400 kHz y tiene un conjunto de 10 comandos de ejecución que le permiten realizar configuración y lectura de datos del sensor. Una de las ventajas de este sensor es su precalibración de fábrica, pero además permite marcar una línea base de forma manual para mejorar la exactitud de las mediciones. Este procedimiento se lo realiza teniendo al sensor encendido por un tiempo de alrededor de 40 minutos en un ambiente libre de contaminantes.

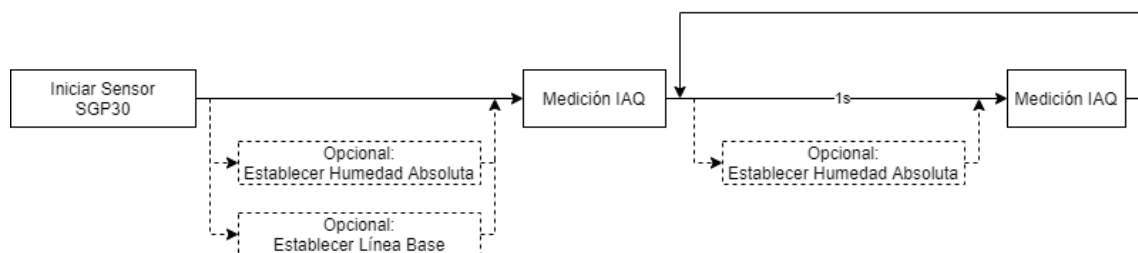
Adicional, este sensor cuenta con la capacidad de realizar una compensación de las medidas en función a la humedad relativa y temperatura, que se calcula mediante la ecuación (2) presentada por el fabricante (Sensirion, 2020). La definición de una línea base y la constante de compensación por humedad y temperatura, aunque no son necesarias, pueden mejorar la calidad de la medición. En la Figura 15 se muestra la secuencia de comandos de medición para inicializar el sensor y realizar mediciones consecutivas.

$$d_v(T, RH) = 216.7 \cdot \left[\frac{RH}{100\%} \cdot 6.112 \cdot \exp\left(\frac{17.61 \cdot T}{243.12 + T}\right) \right] \quad (2)$$

Con Humedad Absoluta d_v , temperatura T y humedad relativa RH .

Figura 15.

Secuencia de Inicio y Medición Continua SGP30.

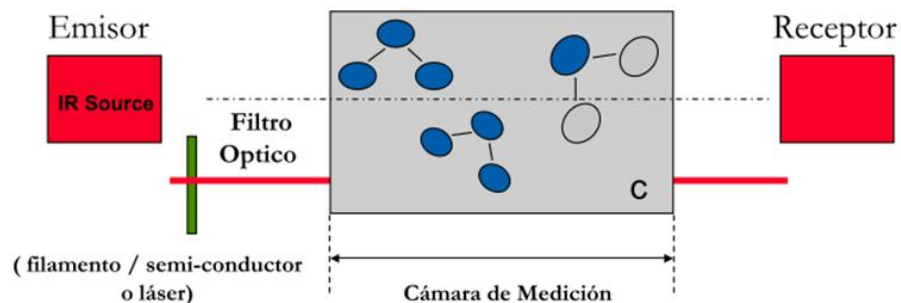


Sensor de Dióxido de Carbono

Para la medición de CO₂ fueron principalmente revisados los sensores de tipo ópticos debido a su mayor precisión y disponibilidad, además de la facilidad de limpieza y operación. Este tipo de sensor se basa en la detección de un haz de luz u otras ondas electromagnéticas que son producto de la interacción con el elemento químico que se desea determinar. En particular, este sensor trabaja con luz infrarroja no dispersiva (NDIR, del inglés *Non Dispersive Infrared*), que hace referencia a la absorción de energía de los compuestos químicos a una determinada longitud de onda. Si un gas contiene más de un tipo de átomo, entonces este gas absorbe la radiación infrarroja. Gases como el monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y dióxido de azufre (SO₂) son detectables mediante luz infrarroja. En la Figura 16 se puede observar el principio de funcionamiento de los sensores ópticos, donde la concentración de gas es directamente proporcional a la cantidad de energía absorbida y esta absorción está determinada por la ley de Lambert-Beer (Ruiz, 2013).

Figura 16.

Principio de funcionamiento del sensor óptico de gases.



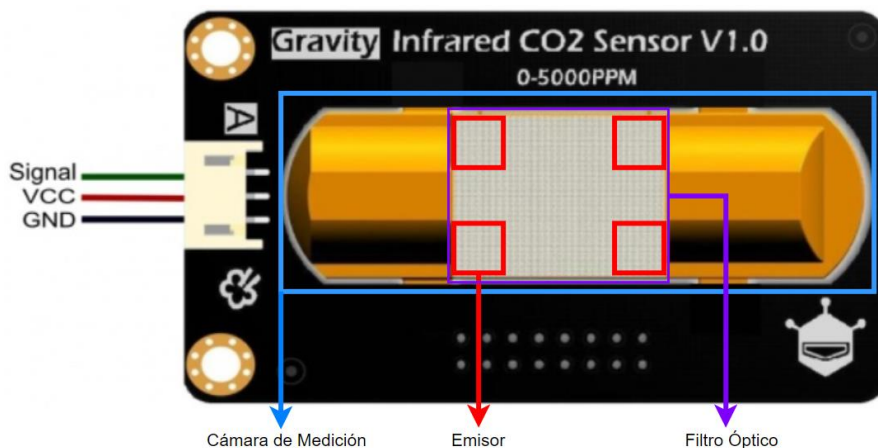
Nota. Adaptado de Absorción Infrarroja (Ruiz, 2013).

El sensor seleccionado es de la familia Gravity pertenecientes a la empresa DFRobot, específicamente el modelo de medición óptica, Analog Infrared Gravity CO₂

Sensor (DFRobot, 2018). Como se mencionó anterior mente este tipo de sensores cuentan con un emisor, un receptor, un filtro óptico y una cámara de medición (ver Figura 17).

Figura 17.

Gravity Analog Infrared CO₂ Sensor



La ventaja de este sensor es que internamente realiza una compensación de temperatura para mejorar la precisión de la medida, además cuenta con características como alta resolución, estabilidad, bajo consumo y baja interferencia por vapor de agua, como se detalla en la Tabla 7. El sensor viene calibrado de fábrica y puede adaptarse a diferentes ambientes mediante una recalibración y establecimiento de línea base.

Tabla 7.

Especificaciones técnicas del Analog Infrared CO₂ Sensor.

Parámetro	Especificación
Nombre	Analog Infrared CO ₂ Sensor
Principio de medición	NDIR – Infrarrojo
Rango	0 – 5000 ppm
Sensibilidad	50 ppm
Tipo de Salida	Analógica 0.4-2 V, UART
Alimentación	4.5 – 5.5 V

Parámetro	Especificación
Consumo Eléctrico	< 60 mA
Tiempo de respuesta	120s

Sensores de Condiciones Ambientales

Para el diseño del sistema de sensado de variables ambientales fueron consideradas las variables de temperatura, humedad, luminosidad y presión barométrica, siendo estas las que tienen mayor impacto en el confort y bienestar de los habitantes de un espacio interior. Se seleccionaron diferentes tarjetas de evaluación de la empresa Adafruit Industries para la medición de cada variable ambiental. Para la humedad y temperatura se seleccionó el sensor Si7021, para luminosidad el sensor VEML7700 basado en el sensor desarrollado por la empresa Vishay (V. Semiconductors, 2005), que permite la detección de luz blanca e infrarroja y para la medición de la presión barométrica se eligió al sensor MPL115A2. La ventaja de estas tarjetas de evaluación es que su comunicación es mediante el protocolo I²C, permitiéndoles utilizar el mismo bus de datos para la comunicación con el controlador principal (Adafruit Industries, 2020).

Sensor de Humedad y Temperatura

Este sensor está presente en una tarjeta de evaluación de Adafruit cuyo rango de medición de humedad y presión van desde 0 a 100% y -40°C a 125°C respectivamente, en la Tabla 8 se detallan sus características más importantes. La calibración de este sensor se la realiza de fábrica y los datos de calibración se guardan en una memoria no volátil del sensor por lo que se puede manipular el sensor sin necesidad de recalibrar (Adafruit Industries, 2016).

Tabla 8.*Especificaciones técnicas del sensor Si7021.*

Parámetro	Especificación
Nombre	Si7021
Rango Humedad	0 – 100% RH
Rango Temperatura	-40 – 125 °C
Sensibilidad Humedad	± 3%
Sensibilidad Temperatura	± 0.4°C
Salida	Digital (I ² C)
Alimentación	3.3V - 5V
Consumo Eléctrico	~150 µA
Resistencia pull-up (I ² C)	10 kΩ

Sensor de Luminosidad

Este sensor está presente en una tarjeta de evaluación de Adafruit, permite la medición de luz ambiental y luz infrarroja. Con rangos ajustables dependiendo de la sensibilidad requerida que permite un rango de medición de 0 a 120000 Lux, además de un bajo consumo energético (0.5 µA) y por las características detalladas en la Tabla 9 hacen a este sensor ideal para aplicaciones portátiles (Adafruit Industries, 2018; V. Semiconductors, 2005) .

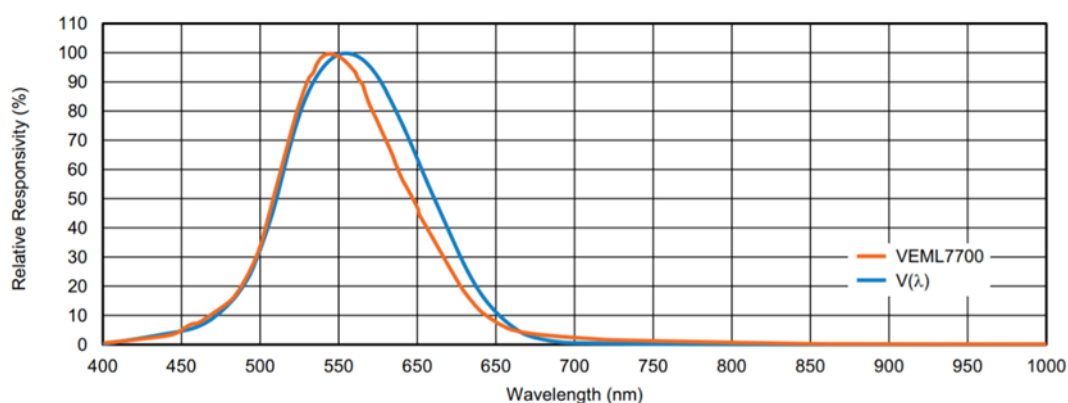
Tabla 9.*Especificaciones técnicas del sensor VEML7700.*

Parámetro	Especificación
Nombre	VEML 7700
Rango	0 – 120000 Lux
Salida	Digital (I ² C)
Alimentación	3.3 o 5 V
Precisión	0.0036 lx/ct – 1.8432lx/ct
Consumo	~ 0.5 µA
Resistencia pull up (I ² C)	10kΩ

El sensor VEM7700 cuenta con dos canales de lectura, el canal ALS que abarca un rango espectral acorde al ojo humano, evitando ciertas fuentes de emisión infrarrojo como se observa en la Figura 18, mientras que el canal WHITE abarca un rango espectral mucho más amplio lo que permite al usuario detectar aquellas emisiones de luz con alto componente infrarrojo como se observa en la Figura 19.

Figura 18.

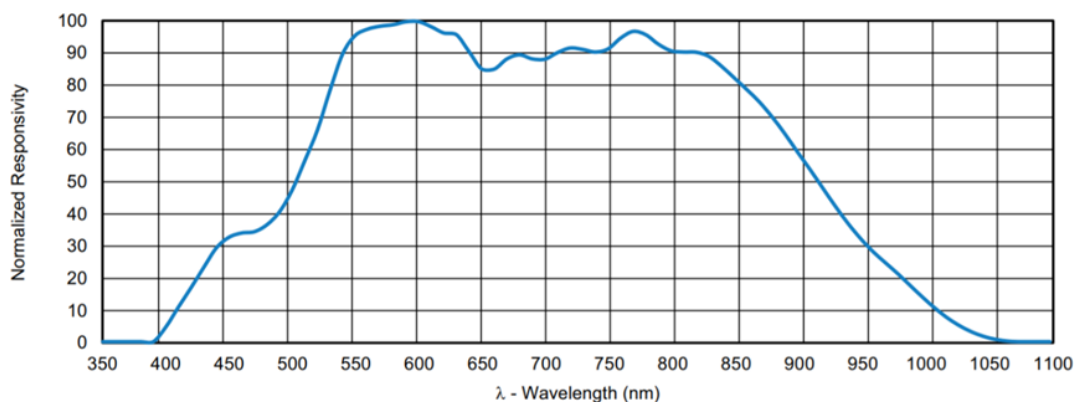
Respuesta espectral del canal ALS del sensor VEML7700.



Nota. Tomado de Designing VEML7700 Into an Application (Schaar, 2018).

Figura 19.

Respuesta espectral del canal WHITE del sensor VEML7700.



Nota. Tomado de Designing VEML7700 Into an Application (Schaar, 2018).

Debido al amplio rango de medición de este sensor, se deben configurar los valores de ganancia (G) interna del sensor y del tiempo de integración (IT) de la medida para así obtener rangos específicos con mayor exactitud, como se indica en la Tabla 10.

Tabla 10.

Resoluciones y valores máximos de medición del sensor VEML7700.

Resolución y máximo rango de detección del sensor VEML7700									
	G2	G1	G1/4	G1/8		G2	G1	G1/4	G1/8
IT (ms)	Resolución Típica					Iluminación Máxima Posible			
800	0.0036	0.0072	0.0288	0.0576		236	472	1887	3775
400	0.0072	0.0144	0.0576	0.1152		472	944	3775	7550
200	0.0144	0.0288	0.1152	0.2304		944	1887	7550	15099
100	0.0288	0.0576	0.2304	0.4608		1887	3775	15099	3099
50	0.0576	0.1152	0.4608	0.9216		3775	7550	30199	60398
25	0.1152	0.2304	0.9216	1.8432		7550	15099	60398	120796

De esta forma, multiplicando del valor del registro ALS por el valor de resolución en función a la configuración como se muestra en la ecuación (3). De esta forma se puede configurar al sensor para medir amplios rangos de luminosidad (120796 Lux), pero con una resolución menor (1.8432 lx/ct), o rangos más pequeños (236 Lux), pero con una resolución mucho más alta (0.0036 lx/ct). Para la aplicación del sensor se deben tomar en cuenta los valores típicos de iluminación en diferentes ambientes como se muestra en la Tabla 11.

$$LUX = ALS \cdot RT \quad (3)$$

Donde RT es el valor de resolución dada por la configuración de Ganancia y Tiempo de integración.

Tabla 11.*Valores de Iluminación Típicos.*

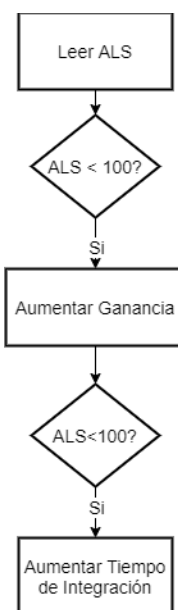
Valores de iluminación típicos	
1 lx	Luna llena con cielo despejado
3.4 lx	Luz límite al anochecer
50 lx	Sala común de un hogar
80 lx	Corredor – Baño
100 lx	Día nublado oscuro
320 lx a 500 lx	Luz de oficina
400 lx	Amanecer o Atardecer en un día despejado
1000 lx	Día nublado, Luz de estudio de grabación
10000 lx a 25000 lx	Luz solar (no directa)
32000 lx a 130000 lx	Luz solar directa

Nota. Adaptado de Typical Luminance Values (Schaar, 2018).

Además, se debe seguir el diagrama de flujo para la selección más óptima de ganancia y tiempo de integración para la medición como se muestra en la Figura 20. Para una operación con rangos más amplios de medición se debe seguir el diagrama de flujo con fórmula de corrección presentado por el fabricante presente en (Schaar, 2018, p. 21) que permite adaptar de forma dinámica rangos grandes de medición sin tener que reiniciar el controlador.

Figura 20.

Diagrama de flujo para medición VEML7700.



Sensor de Presión Barométrica

Esta tarjeta de evaluación posee un rango de medición va desde 50kPa hasta 115kPa y otras características importantes mostradas en la Tabla 12. Gracias a su comunicación I²C permite que sea altamente usado para aplicaciones de dispositivos portátiles (Adafruit Industries, 2020; N. Semiconductors, 2017).

Tabla 12.

Especificaciones técnicas del sensor MPL115A2.

Parámetro	Especificación
Nombre	MPL115A2
Rango	50kPa – 115kPa
Salida	Digital (I ² C)
Alimentación	2.375V - 5.5V
Exactitud	1 kPa
Frecuencia	400kHz

Parámetro	Especificación
Consumo	~5 μ A
Resistencia pull-up ((I ² C)	10k Ω

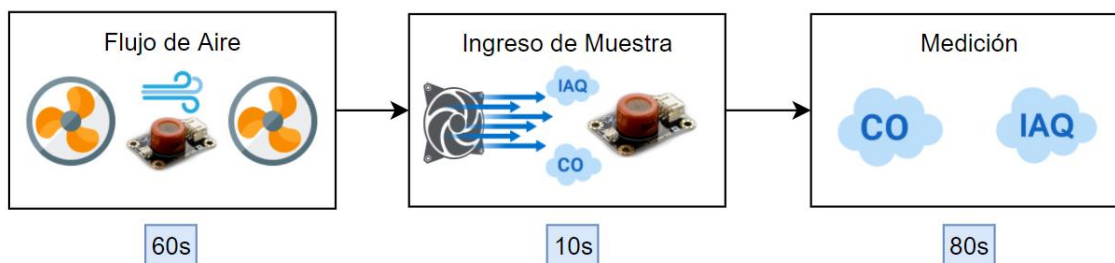
Sistema de Ventilación para Sensores de Óxido Metálico

Los sensores de óxido metálico deben ser expuestos directamente al químico para reaccionar, pero por esta misma razón es posible que restos del químico queden adheridos en la membrana de óxido metálico del sensor, dejándolo dopado. Por eso es fundamental realizar un correcto proceso de estimulación del sensor con el gas y una limpieza posterior. Siendo los sensores MQ-7 y SGP30 de tipo MOX, fue necesaria la implementación de un sistema de ventilación para realizar este propósito.

Para lograr una correcta excitación es necesario que los sensores sean ubicados dentro de un contenedor, en el cual se puede controlar la salida y entrada del aire. Para asegurar la exactitud y precisión de la medida, y el correcto desempeño de los sensores. Para ello se realizó el diseño de diferentes sistemas mecánicos para la excitación y limpieza de los sensores. Para determinar el sistema de ventilación primero se debe entender el proceso de medición de los sensores de tipo óxido metálico. Este proceso cuenta con tres etapas (Figura 21), la etapa de flujo de aire sirve para retirar las partículas adheridas en la superficie del sensor. La etapa de ingreso de muestra, que permite llenar el contenedor con el aire a ser medido, en el cual está el químico de interés; y finalmente, la etapa de medición que es donde se realizará la lectura de los sensores.

Figura 21.

Fases de Medición para Sensores de Óxido Metálico.



Los sistemas desarrollados se dividieron en dos grupos diferenciados por el uso o ausencia de un filtro de aire, cuyo propósito es que el flujo de aire para la limpieza de los sensores sea filtrado previamente. Adicional, se realizaron pruebas con dos materiales para el contenedor, acrílico y acero inoxidable.

Sistema de Ventilación con Filtro de Aire

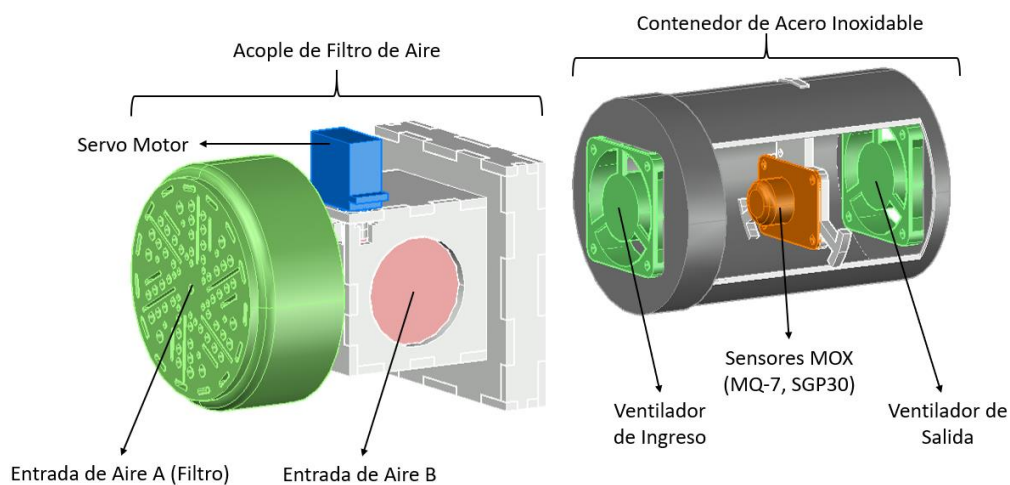
Una vez realizada la medición, los sensores pueden quedar dopados, variando su medida, por esta razón se genera un flujo de aire directo a los sensores para su limpieza. En este diseño se introduce aire que ha pasado por un filtro para eliminar los posibles contaminantes del medioambiente que excitaren nuevamente al sensor. El filtro seleccionado es el modelo 757-N ABEK1 Climax de grado químico industrial, diseñado contra gases y compuestos químicos. Sus características de protección incluyen dióxido de azufre, amoníaco y sus derivados orgánicos, gases y vapores inorgánicos (CLIMAX, 2016). Para este sistema de ventilación se construyeron dos variantes en cuanto al material del contenedor de los sensores, uno en acero inoxidable y otro en acrílico.

La configuración del sistema de ventilación, con sus componentes, en este caso con el contenedor hecho en acero inoxidable se muestran en la Figura 22. El sistema consiste en dos partes, primero el contenedor que es donde se ubican los sensores de tipo MOX, MQ-7 y SGP30, este contenedor cuenta con dos ventiladores, uno en cada

extremo, el ventilador de ingreso que permite el ingreso de aire hacia el compartimiento, y el ventilador de salida que permite la salida del aire de este. La segunda parte del sistema se ubica en la entrada del contenedor y consiste en un acople que contiene dos entradas de aire (A y B) controladas por una compuerta servoasistida. En la entrada A se ubica el filtro de aire y en la entrada B se permite el ingreso de aire medioambiental. De esta forma, cuando la compuerta se ubique en la entrada B bloqueará el ingreso de aire medioambiental, permitiendo que el aire ingrese a través del filtro para el proceso de limpieza, mientras que cuando la compuerta bloquea la entrada A permite el ingreso de aire ambiental para la excitación de los sensores y el registro de las medidas.

Figura 22.

Componentes del Sistema de Ventilación con Filtro de Aire (Acero Inoxidable).



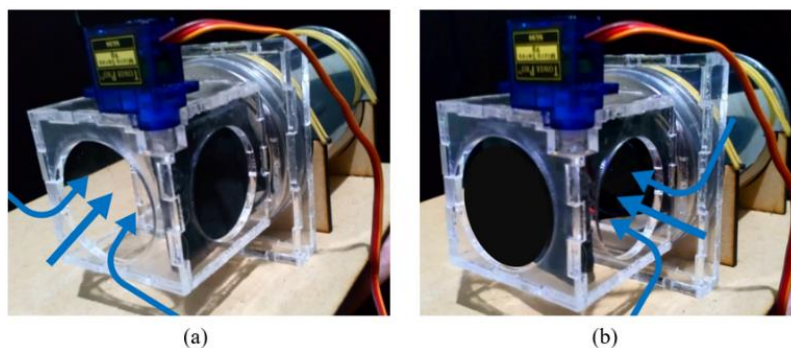
El funcionamiento del sistema de ventilación debe cumplir las tres fases para la medición del sensor. En la fase de flujo de aire la compuerta se ubica en la entrada B, permitiendo el ingreso de aire filtrado, adicional a esto se activan los dos ventiladores, tanto el de entrada como el de salida para permitir que el aire filtrado fluya a través del contenedor limpiando a los sensores. En la fase de ingreso de muestra la compuerta se ubica en la entrada A, permitiendo que ingrese aire medioambiental, adicional a esto, se

activa únicamente el ventilador a la entrada del contenedor durante 10 segundos para el ingreso del aire de muestra, el ventilador de salida permanece apagado para reducir el escape del aire. Finalmente, en la etapa de medición se procede a leer los datos obtenidos por los sensores. Este proceso se repite cada vez que se van a realizar mediciones con estos sensores, y su duración depende de la velocidad de respuesta de los sensores. Como el sensor SGP30 puede tomar datos cada segundo, este proceso está determinado por el sensor de respuesta más lenta que es el MQ-7 cuyo ciclo de trabajo es de 60 segundos de limpieza, y de 90 segundos para la toma de datos.

El primer sistema está compuesto por un contenedor de acero inoxidable debido a que la composición química de este material evita que las partículas del químico se adhieran al encapsulado (Rodríguez & Zurita, 2017). Cabe destacar que estas partículas pueden contaminar la medición de los sensores. En la Figura 23(a) se muestra el sistema de ventilación implementado, en específico la parte del acople en donde se ubica el filtro de aire con la compuerta bloqueando el paso de aire medioambiental, mientras que en Figura 23(b) se muestra el bloqueo del filtro de aire, permitiendo el ingreso de aire para la toma de datos.

Figura 23.

Acople con compuerta para sistema de ventilación con filtro de Aire. (a) Compuerta abierta, (b) Compuerta cerrada.



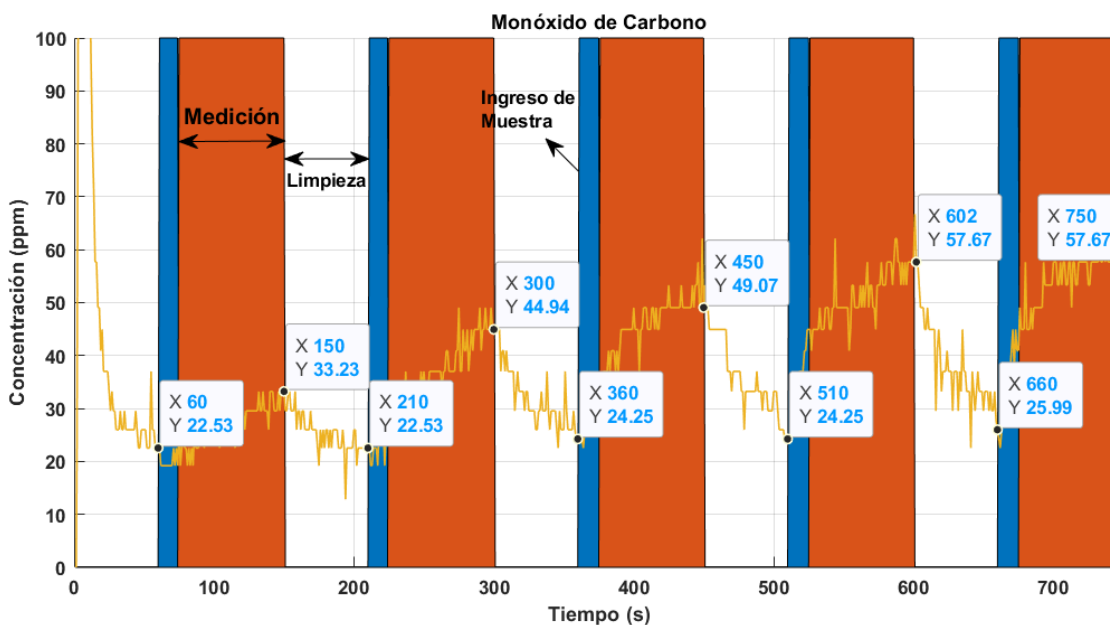
Nota. EL filtro de aire del sistema fue removido de la figura (a).

Las pruebas realizadas fueron con el sensor de Monóxido de Carbono MQ-7, utilizando como químico de prueba a un tanque de gas certificado, su contenido compuesto por 20ppm de Sulfuro de Hidrógeno, 60ppm de Monóxido de Carbono y 1.45% Metano (Airgas, n.d.). Además, la prueba se realizó a 25°C de temperatura ambiente.

Se realizaron pruebas con este sistema de ventilación para determinar la respuesta de los sensores. En el caso del sensor de monóxido de carbono, aplicando los tiempos de calentamiento y medición de 60 y 90 segundos respectivamente. En la Figura 24 se muestra una gráfica de los valores medidos por el sensor de monóxido de carbono aplicando el sistema de ventilación con filtro. Donde las partes que están en blanco indican que los ventiladores están encendidos durante 60 segundos y que el aire que ingresa viene del filtro de aire para remover las impurezas que se puedan añadir al sensor. En color azul se indica el ingreso de la muestra de aire ambiental para la medición, que equivalen a los 15 primeros segundos del periodo de medición de 90 segundos. En naranja se presenta el proceso de medición, los datos obtenidos por el sensor en este punto reflejan de forma adecuada los valores de concentración e indica una buena repetibilidad de las medidas al tener valores de 22-26ppm de forma repetitiva al realizar la limpieza de los sensores. Con la muestra de 60ppm luego de 2 ciclos de medición, el sensor ya presenta mediciones cercanas al valor real con valores de 57.67ppm, esto se debe al precalentamiento inicial del sensor.

Figura 24.

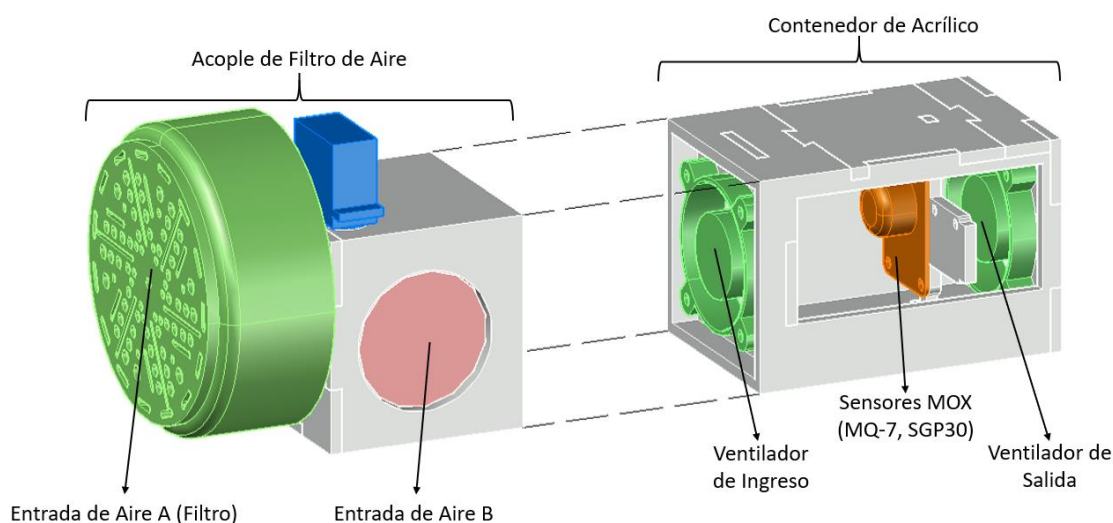
Respuesta del sensor de CO Filtro de Aire y Contenedor de Acero Inoxidable.



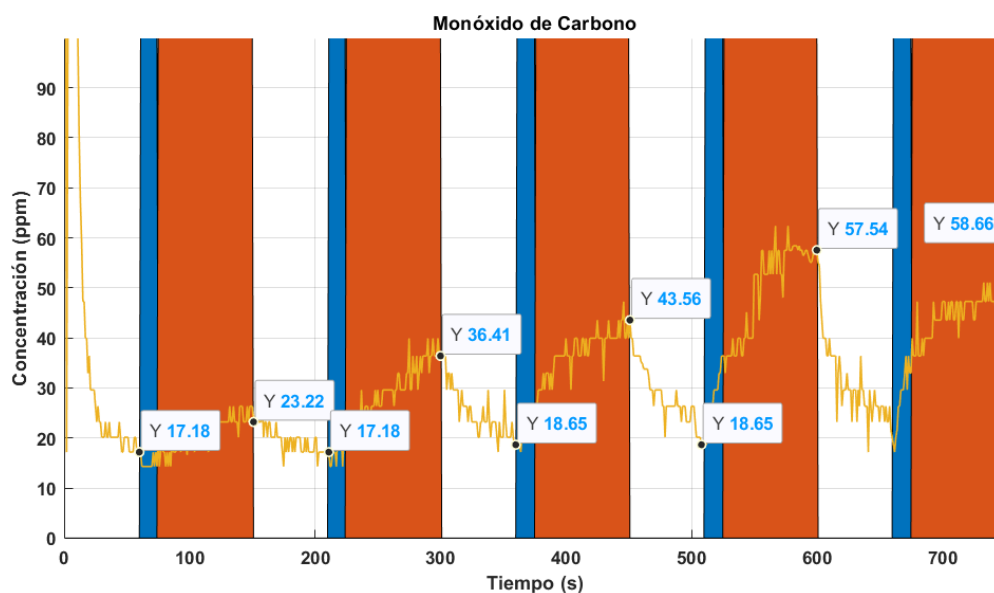
Para el segundo sistema con filtro se realizó el cambio del contenedor de los sensores reemplazando el acero por acrílico (Figura 25). Se realizaron las pruebas en este sistema con las mismas condiciones para el sistema en acero inoxidable, es decir, temperatura ambiental de 25°C y un tanque de gas certificado, su contenido compuesto por 20ppm de Sulfuro de Hidrógeno, 60ppm de Monóxido de Carbono y 1.45% Metano. Los resultados de estas pruebas se muestran en la Figura 26. Se observa una pequeña diferencia inicial del sensor, que tiene un valor inicial con un pequeño offset, el mismo que se puede presentar por varias razones, incluidos temperatura, humedad, etc. Sin embargo, los valores de concentración medidos reflejan valores adecuados con la concentración del químico presente.

Figura 25.

Componentes del Sistema de Ventilación con Filtro de Aire (Acrílico).

**Figura 26.**

Respuesta del sensor de CO Filtro de Aire y Contenedor de Acrílico.

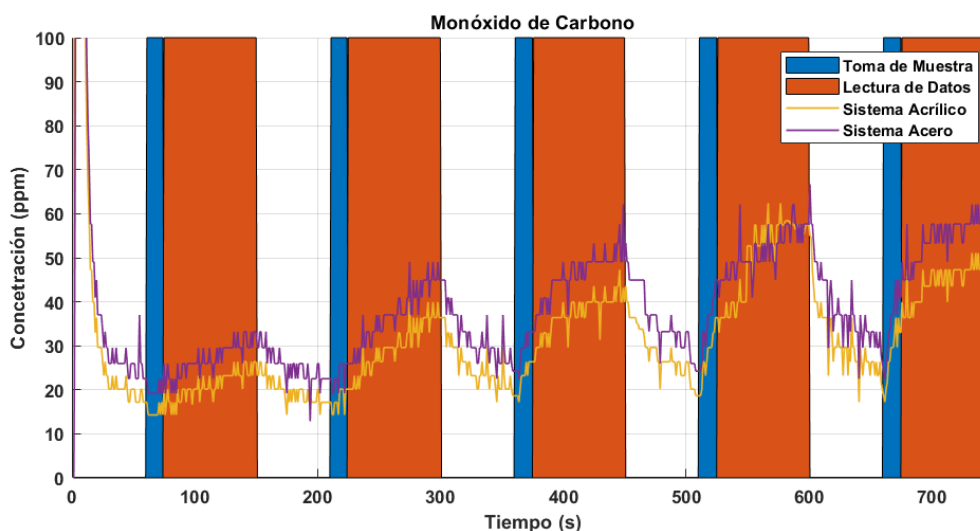


En la Figura 27 se muestra una comparación entre las señales en el sistema de acrílico y el sistema de acero inoxidable mostrando diferencias en la etapa de limpieza de 5ppm, lo que es muy pequeño para ser significativo. Sin embargo, los valores en la etapa de medición entregan valores muy parecidos en los dos sistemas. Tomando en cuenta

que la construcción e implementación del contenedor de acero inoxidable es mucho más complicada y costosa; y que los resultados obtenidos no presentan mayores diferencias, se determinó que el sistema de ventilación realizado en acrílico es la mejor opción para su implementación.

Figura 27.

Comparación en Lectura Sensor de CO con Filtro de Aire en Diferentes Contenedores.



Sistema de Ventilación sin Filtro de Aire.

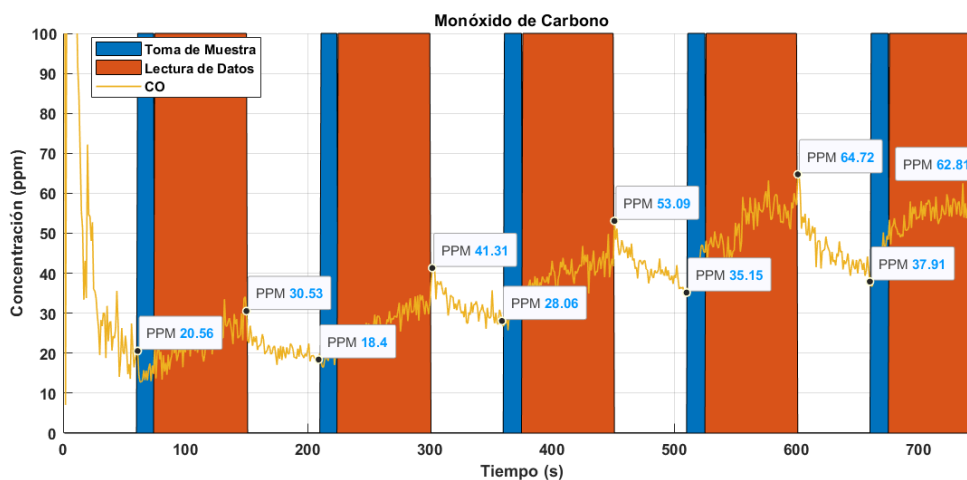
De acuerdo con las pruebas realizadas en los sistemas con filtro de aire se determinó que el sistema con contenedor de acrílico no presenta mayores diferencias con el sistema en acero inoxidable, es por esta razón que en esta sección solo se realizará el análisis del sistema de ventilación con contenedor de acrílico y sin un filtro de aire.

La configuración de este sistema carece del acople para el filtro de aire, haciendo al encapsulado más pequeño y liviano. Es por esta razón que el proceso para la medición en este sistema se simplifica, eliminando el uso de la compuerta servoasistida ya que el flujo de aire tanto para la limpieza como para la medición será tomado del medioambiente.

Las condiciones de prueba son similares a las del sistema con filtro, es decir, 25°C y un tanque de gas certificado, su contenido compuesto por 20ppm de Sulfuro de Hidrógeno, 60ppm de Monóxido de Carbono y 1.45% Metano. Los resultados de las pruebas se muestran en la Figura 28, donde se aprecia que, tras el calentamiento inicial, los valores de concentración se acercan al valor real de 60ppm, como la etapa de limpieza no es con aire limpio, la remoción de las partículas adheridas al sensor no es igual de eficiente que con el filtro, llegando a tener un valor de dopado de 40ppm, sin embargo, sigue siendo por debajo del valor real de la concentración. Luego de varias pruebas se observó que con el uso del ventilador, aunque no se utilice el filtro, el sensor se puede dopar, pero no llega a marcar valores por encima de la concentración actual en el entorno, su comportamiento se acerca al de un sensor lineal, que varía directamente con la concentración del químico a medir.

Figura 28.

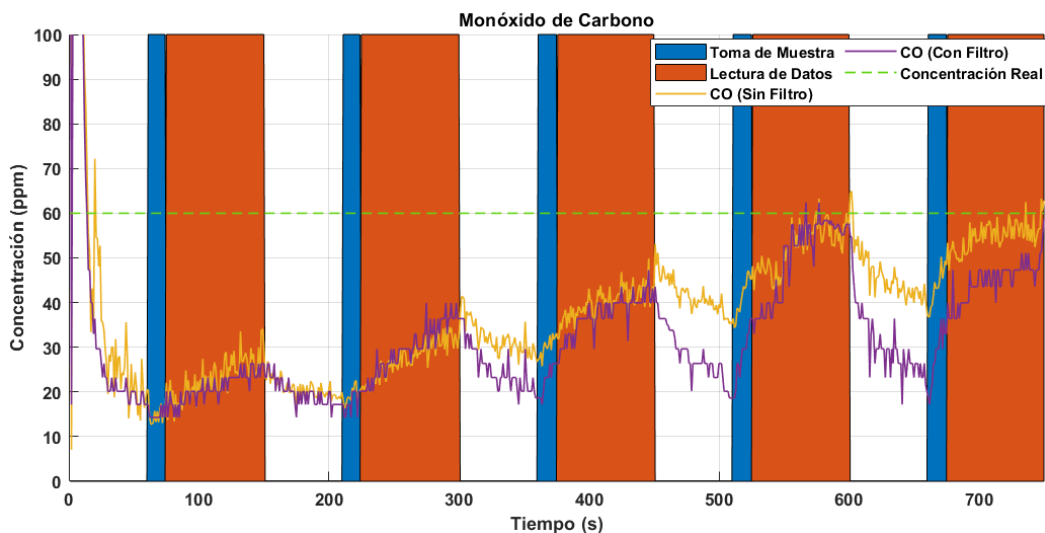
Respuesta del sensor de CO sin Filtro de Aire



En la Figura 29 se realizó una comparación entre los valores obtenidos en el sistema de acrílico con filtro y el sistema en acrílico sin filtro en donde se puede observar que el proceso de limpieza es mucho más evidente en el sistema con filtro, sin embargo, el valor final de la medición en ambos sistemas se aproxima bastante al valor real.

Figura 29.

Comparación Sistema de Medición en Acrílico con Filtro vs Sin Filtro.



Una vez realizados todos los análisis para los diferentes sistemas de ventilación se determinó que el sistema más adecuado para la implementación de las plataformas multisensado consiste en el sistema con contenedor de acrílico y sin filtro de aire ya que se determinó que las diferencias en la medición y respuesta del sensor no presentan cambios significativos, ahorrando espacio y recursos para su implementación.

Sistema de Control

Para la implementación de este proyecto se utiliza una tarjeta de control cuyo uso en proyectos de tecnología e IoT ha tomado un gran impulso en los últimos años, esto debido a su gran versatilidad y escalabilidad de manejo de información a través de Wi-Fi y Bluetooth, que le permite al usuario establecer protocolos de comunicación, envío y recepción de datos. La tarjeta seleccionada es la ESP32 fabricada por la empresa Espressif (espressif.com, 2020).

La ESP32 consta de un procesador de dos núcleos, lo que permite realizar procesos de forma paralela e individual, y de un co-procesador destinado para el control

en modos de ahorro de energía, el cual permite definir periodos de descanso en los cuales la tarjeta entra en modo sleep para reducir el consumo energético. En la Tabla 13 se detallan las especificaciones técnicas de la ESP32.

Tabla 13.

Especificaciones técnicas de la tarjeta ESP32 WROOM32D

Parámetro	Valor
Nombre	ESP32-WROOM32D
Procesador	2 CPU - Xtensa® 32-bit LX6 MCU
Alimentación	3.0 V ~ 3.6 V
Pines	34 pines programables
Pines PWM	8
Conversores ADC	18 canales de 12 bits
Conversores DAC	2 de 8 bits
Frecuencia de operación	240MHz, 160MHz, 80MHz
Interfaces de conexión	2 - i ² C, 2 - i ² S, 3 - UART
Consumo de corriente	~250mA
Memoria flash	4MB, 8MB y 16MB
Timers	4 de 64 bits y 16bits de prescalador
Sensores Touch capacitivos	10
Sensor Hall	1

Cada plataforma multisensado cuenta con una tarjeta ESP32-WROOM32D la cual es encargada de realizar lectura de todos los sensores (MQ7, Analog Infrared CO₂ Sensor y sensores I²C) además del control de ventiladores. La lectura de los datos se realiza durante periodos de tiempo que permitan a la estación realizar la toma de 30 muestras en cada punto de sensado dentro del entorno y calcular la media de dichas muestras para proporcionar una mejor aproximación.

Además, la ESP32 es la encargada del envío de datos que indican tanto la información recolectada por los sensores, como también de la información del estado de

la estación; estado Activa o Inactiva, la intensidad de señal Wi-Fi y la dirección IP asociada a la estación dentro de la red. El envío lo realiza de forma inalámbrica hacia una interfaz montada en un servidor virtual que recopilará toda la información proveniente de cada estación para su posterior análisis y presentación.

Las conexiones de los sensores se establecen de manera que la lectura del sensor de CO₂ se la realice en los pines de comunicación UART GPIO3 y GPIO1 debido a que la lectura serial es más estable que la lectura analógica del sensor. El control PWM para realizar la lectura del sensor de CO se realiza a través del pin GPIO33. Los pines GPIO21 y GPIO22 se configuran para el bus de comunicación SDA y SCL respectivamente. Además, el envío de señales de control on-off a los circuitos de potencia encargados controlar los ventiladores se lo realiza mediante los pines GPIO18 y GPIO19. En la Tabla 14, se muestran todos los pines de conexión utilizados de la tarjeta ESP32 con mayor detalle.

Tabla 14.

Detalle de los pines de conexión de la tarjeta ESP32 dentro de la estación multisensado.

Pines	Conexión
3V3	Alimentación de 3.3V para los sensores I ² C: SGP30, Si7021, VEML9900, MPL115A2
GPIO16	Pin de Control para encendido y apagado de los sensores I ² C
GPIO17	Pin de Control para encendido y apagado de los sensores químicos
GPIO18	Pin de Control ON/OFF para el ventilador "Fan1"
GPIO19	Pin de Control ON/OFF para el ventilador "Fan2"
GPIO21	Pin de comunicación SDA para sensores I ² C (SGP30, Si7021, MPL115A2, VEML7700)
GPIO3	Pin RX UART del sensor Gravity Analog Infrared CO ₂
GPIO1	Pin TX UART del sensor Gravity Analog Infrared CO ₂
GPIO22	Pin de comunicación SCL para sensores I ² C (SGP30, Si7021, MPL115A2, VEML7700)
VIN	Pin de alimentación de la tarjeta, entrada a 5v
GPIO14	Pin de conexión a un botón para ejecutar acciones de sincronización
GPIO27	

Pines	Conexión
GPIO26	Pin de comunicación al sistema de control de la plataforma robótica
GPIO25	Pin de comunicación al sistema de control de la plataforma robótica
GPIO33	Pin de comunicación al sistema de control de la plataforma robótica
GPIO35	Pin de lectura analógica del sensor de CO (MQ-7)
GPIO34	Pin analógico de reserva
	Pin analógico de reserva

Sistema de Alimentación

El sistema de alimentación constituye otra parte medular de la estación multisensado, puesto se encarga de proporcionar la energía necesaria al sistema para para su funcionamiento. En vista de que la naturaleza de las variables seleccionadas para monitorear la calidad de aire y condiciones ambientales en un espacio interior es de evolución lenta, se debe establecer largos períodos de sensado con el objetivo de obtener información relevante. Es por ello que se considera establecer un tiempo de 6 horas de funcionamiento del sistema, lo cual junto con el análisis de consumo de los sistemas y sus componentes permiten determinar la capacidad necesaria de la fuente de alimentación principal.

Es de importancia realizar el diseño del sistema de alimentación tomando en cuenta los requerimientos de energía de cada componente dentro de la estación como sensores, actuadores y del controlador principal. Como se muestran en la Tabla 15, la potencia consumida por todos los componentes sería de 4700 mW, esto si todos los componentes trabajan simultáneamente. En base a los requerimientos de los componentes tanto en tensión como en corriente se procedió a diseñar el sistema de alimentación que permita la distribución de energía a cada componente o subsistema de forma adecuada.

Tabla 15.

Requerimientos energéticos de los componentes de la estación multisensado.

Sistema	Componente	Tensión	Corriente	Potencia
Sistema de Medición	Sensor MQ-7 (CO)	5 V	70 mA	350 mW
	Sensor Gravity Infrared (CO ₂)	5 V	60 mA	300 mW
	Sensor SGP30 (Calidad del Aire)	3.3 V	48 mA	158 mW
	Sensor Si7021 (Humedad + Temperatura)	3.3 V	4 mA	13 mW
	Sensor VEML770 (Luminosidad)	3.3 V	15 mA	50 mW
	Sensor MPL115A2 (Presión Barométrica)	3.3 V	5 μA	0.16 mW
Sistema de Ventilación y Limpieza	Ventiladores DC	12 V	110 mA	1320 mW
	Ventiladores DC	12 V	110 mA	1320 mW
Sistema de Control principal	Controlador Principal (ESP32)	5 V	80 – 240 mA	400 – 1200 mW
				4711.16 mW

La fuente principal de alimentación del sistema se seleccionó a 12V mediante una batería de tipo LiPo para su distribución al sistema de ventilación de forma eficiente y su regulación a 5 V y 3.3V para el resto de los sistemas. En cuanto a la selección del regulador adecuado para la regulación a 5V se determinó en base al consumo de corriente de todos los componentes que funcionan con este nivel de tensión. Se debe tomar en cuenta que el regulador de 3.3V interno de la tarjeta es de tipo lineal, por lo que la corriente consumida por los sensores a este nivel de tensión será la misma que a la entrada del regulador. Sumando todos estos componentes se obtiene un consumo de alrededor de 437mA como se muestra en la ecuación (4).

$$I_{5V} = I_{ESP32} + I_{MQ-7} + I_{CO_2} + I_{SGP30} + I_{Si7021} + I_{VEML7700} + I_{MPL115A2}$$

$$I_{5V} = 240mA + 70mA + 60mA + 48mA + 4mA + 15mA + 5\mu A$$

$$I_{5V} = 437.005mA \quad (4)$$

Como consideración de diseño se decide trabajar con un valor de 500mA para asegurar el funcionamiento de los componentes. La corriente que necesita suministrar el regulador es 500 mA para lo cual se seleccionó el regulador MP1584 perteneciente a la familia de los convertidores DC-DC Buck, este regulador es variable y permite un amplio rango de voltajes de entrada, es capaz de proporcionar una corriente de salida continua de hasta 2A y posee una eficiencia energética del 96% ya que es un regulador conmutado lo que le permite reducir el consumo de potencia considerablemente en la Tabla 16 se detallan sus características (Autosolar Energy Solutions SLU, 2015).

Tabla 16.

Especificaciones técnicas del regulador MP1584

Parámetro	Valor
Nombre	MP1584
Tensión de entrada	4.5 – 28 V
Tensión de salida	0.8 – 20 V
Corriente de salida	2 A
Eficiencia energética	96%
Frecuencia de trabajo	1 MHz
Temperatura	-40°C a +85°C

Para calcular la corriente de entrada al sistema completo se debe realizar el cálculo correspondiente de potencia en función a los reguladores de voltaje junto al consumo de los componentes que trabajan a 12V. En la ecuación (5) se presenta el cálculo de corriente de entrada necesaria para el consumo de los componentes a 5V por el regulador, tomando en cuenta la eficiencia del 96% de este.

$$P_{in} = P_{out} \cdot 96\% \quad (5)$$

$$V_{in} \cdot I_{in} = V_{out} \cdot I_{out} \cdot 0.96$$

$$12V \cdot I_{in} = (5V \cdot 500mA) \cdot 0.96$$

$$I_{in} = \frac{2.5W}{12V} \cdot 0.96$$

$$I_{in} = 0.2A = I_{Reg}$$

Una vez obtenida la corriente de entrada del regulador se calcula la corriente necesaria para el sistema de ventilación tomando en cuenta el consumo de los ventiladores como se muestra en la ecuación (6).

$$I_{SV} = I_{Vent1} + I_{Vent2} \quad (6)$$

$$I_{SV} = 110mA + 110mA$$

$$I_{SV} = 220mA$$

Con los valores de corriente del sistema de ventilación y sistema de medición se calcula la corriente total de la plataforma multisensado con una alimentación de 12V.

$$I_{total} = I_{Reg} + I_{SV} \quad (7)$$

$$I_{total} = 200mA + 220mA$$

$$I_{total} = 420mA$$

En función a la corriente obtenida en la ecuación (7) se procede a la selección de la batería. De tal forma que el sistema pueda estar activo durante periodos largos de tiempo.

Para determinar la capacidad de la batería es muy importante tomar en cuenta el tiempo que las cargas están activas, para ello se clasifican las cargas de la siguiente manera mostradas en la Tabla 17, en donde la corriente necesaria para el sistema de medición corresponde a la ecuación (9), mientras que la corriente necesaria para el sistema de ventilación a la ecuación (10).

Tabla 17.*Cargas de la plataforma multisensado*

Carga	Componentes	Consumo	Tiempo de funcionamiento
C1	Sistema de Medición	200mA	6 horas
C2	Ventiladores	220mA	25% de 6h

Para el cálculo tanto de C_1 como de C_2 se debe aplicar la ecuación (8) en donde se multiplica el consumo de la carga por el tiempo que la misma permanece activa.

$$C = \text{Consumo} \cdot \text{Tiempo} \quad (8)$$

$$C_1 = 200mA \cdot 6h = 1200mAh \quad (9)$$

$$C_2 = 220mA \cdot 6h \cdot 0.25 = 330mAh \quad (10)$$

El consumo total de la carga se obtiene aplicando la ecuación (11) en la cual se suman los valores de las cargas anteriormente calculados teniendo como resultado una carga total requerida de 1530mAh a una tensión de 12V.

$$C_T = C_1 + C_2 \quad (11)$$

$$C_T = 1200mAh + 330mAh = 1530mAh$$

Finalmente es importante tomar en cuenta que el nivel de tensión de la batería no debe ser menor a 11V, puesto que el sistema de ventilación dejará de funcionar correctamente. Este valor representa el 90% de la carga total de la batería, para incluir esta consideración en el dimensionamiento de la capacidad de la batería, se necesita aplicar la ecuación (12), donde d es el valor mínimo de tensión de la batería (Autosolar Energy Solutions SLU, 2015).

$$C^* = \frac{C_T}{d} \quad (12)$$

$$C^* = \frac{1530mAh}{0.90} = 1700mAh$$

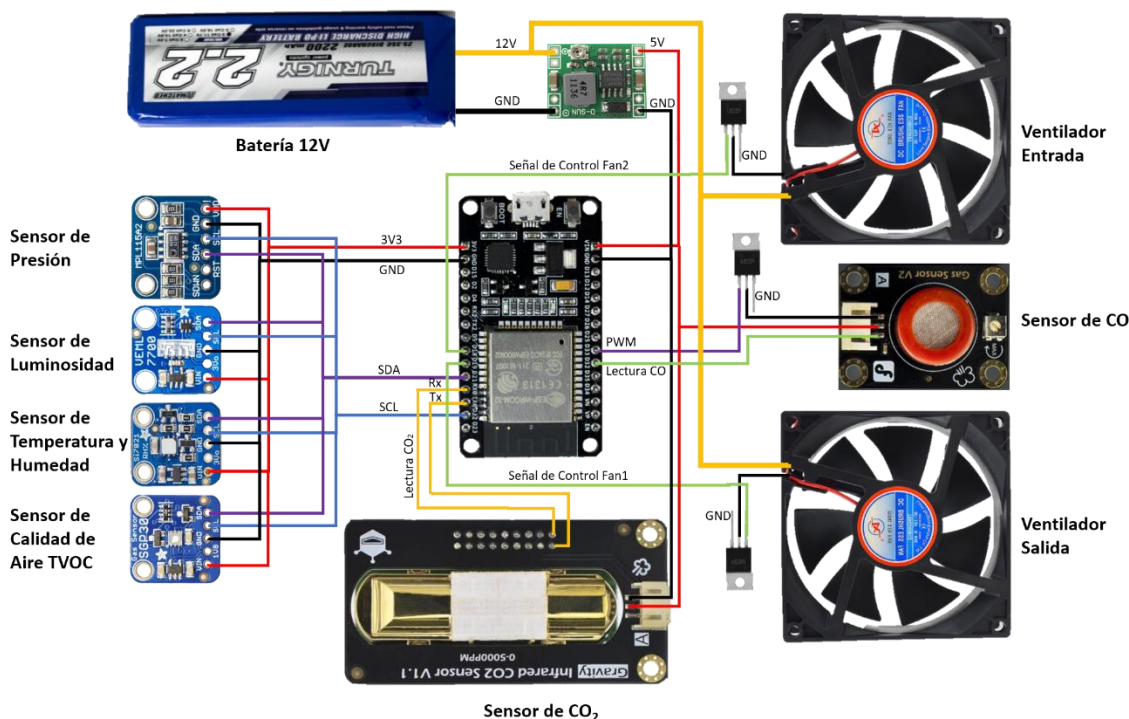
En base al resultado de la ecuación (12) se decide implementar una batería tipo LiPo cuyo valor de carga comercial más cercano al requerido es de 2200mAh.

Integración de Sistemas

En la Figura 30 se presenta un esquemático de las conexiones de los diferentes sistemas, en la cual se detalla el controlador, los sensores de gas (CO, CO₂ y TVOC), los sensores de calidad de aire (SGP30, VELM7700, Si7021, MPL115A2), la batería de alimentación junto al regulador y los ventiladores.

Figura 30.

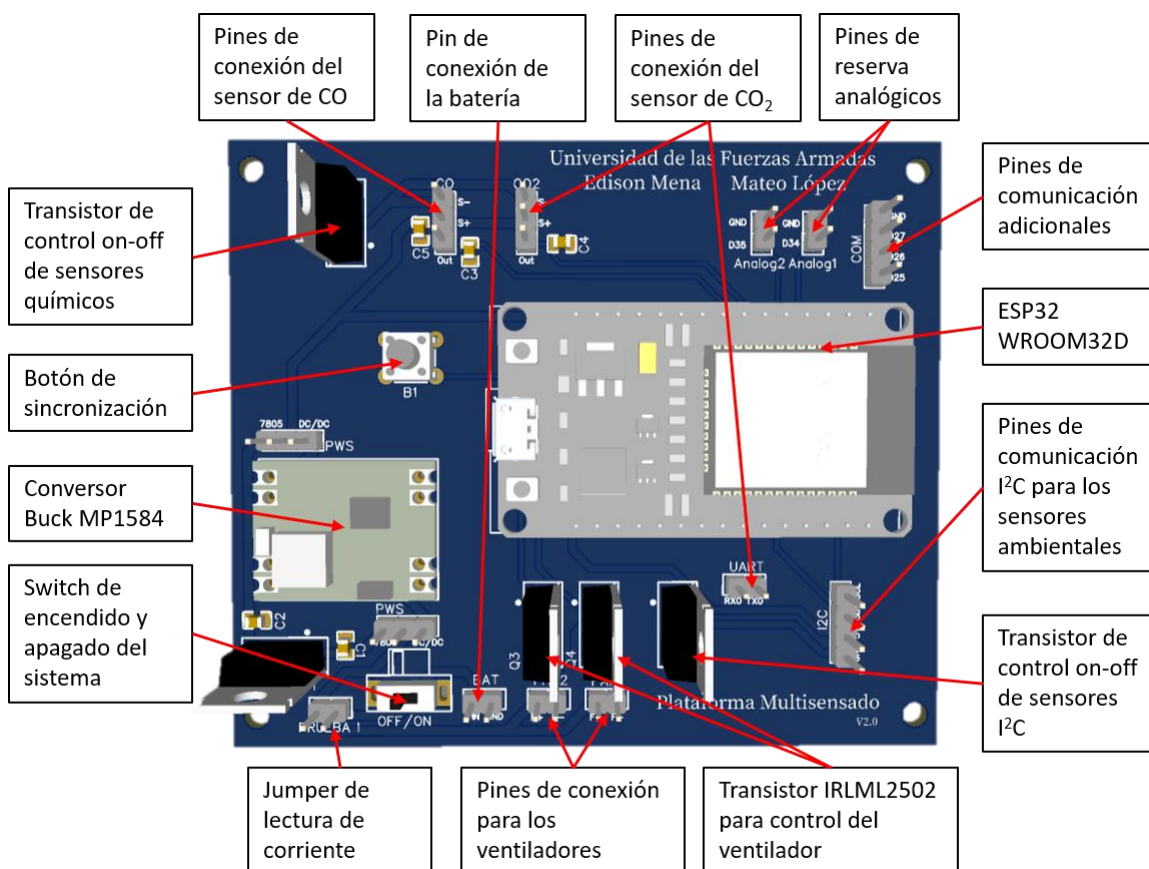
Diagrama Esquemático de la plataforma multisensado



En base al diagrama esquemático se diseñan e implementan dos placas electrónicas para cada plataforma multisensado. La primera integra el sistema de control, el sistema de alimentación y pines de conexión para los componentes del sistema de ventilación, y sensado. En la Figura 31 se muestra la placa de circuito impreso de 80x90mm.

Figura 31.

Vista 3D del diseño PCB de la placa de control de la Plataforma Multisensado.



La segunda placa integra los sensores de calidad condiciones ambientales (VELM7700, MPL115A2, Si7021). En vista de que estos sensores trabajan con bus de comunicación I²C, se debe tomar en cuenta que uno de los limitantes del protocolo de comunicación I²C es la corriente que ingresa al sensor, ya que si es mayor a 3mA se pueden producir fallas en la comunicación debido al sobrecalentamiento del semiconductor. Para asegurar que este valor de corriente sea menor a 3mA se requiere que el valor de tensión de la señal correspondiente a cero lógico en el pin SCL o SDA sea menor a 0.4V (van Raan, 2004).

Con estas condiciones de diseño se puede calcular un valor de resistencia mínimo de pull-up para su funcionamiento óptimo:

$$R = \frac{VCC - 0.4V}{3mA} \quad (13)$$

Si la alimentación de los sensores I²C es 3.3V, se calcula el valor de resistencia, reemplazando este valor en la ecuación (13).

$$R = \frac{3.3V - 0.4V}{3mA}$$

$$R = 967\Omega$$

Esto significa que el valor de resistencia pull-up del bus I²C debe ser al menos de 967Ω. Por lo que en caso de conectar varios dispositivos I²C en paralelo se debe cumplir la siguiente condición:

$$R \geq 967\Omega \quad (14)$$

Cada estación cuenta con cuatro sensores I²C, cuya resistencia pull up es 10kΩ, si se conectan los sensores en paralelo se obtiene una resistencia equivalente de 2.5kΩ, por lo que se cumple la condición del valor de la resistencia para el bus I²C, establecida en la ecuación (14).

Por consiguiente, se implementó una placa de circuito impreso de dimensiones 60x30 mm como se observa en la Figura 32 en cada estación multisensado, en la cual se incluyen pines de conexión extras para conectar el sensor de Calidad de Aire SGP30, el cual va situado en el encapsulado acrílico.

Figura 32.

PCB para sensores de Condiciones Ambientales. (a) Diseño, (b) Implementación.



Finalmente se diseña una estructura de 100x106x90mm para montar las placas de circuito impreso y los sensores. La Figura 33 muestra una vista isométrica de la plataforma multisensado totalmente funcional, mientras que la Figura 34 muestra la vista superior y lateral de la plataforma multisensado.

Figura 33.

Implementación de la Plataforma Multisensado.

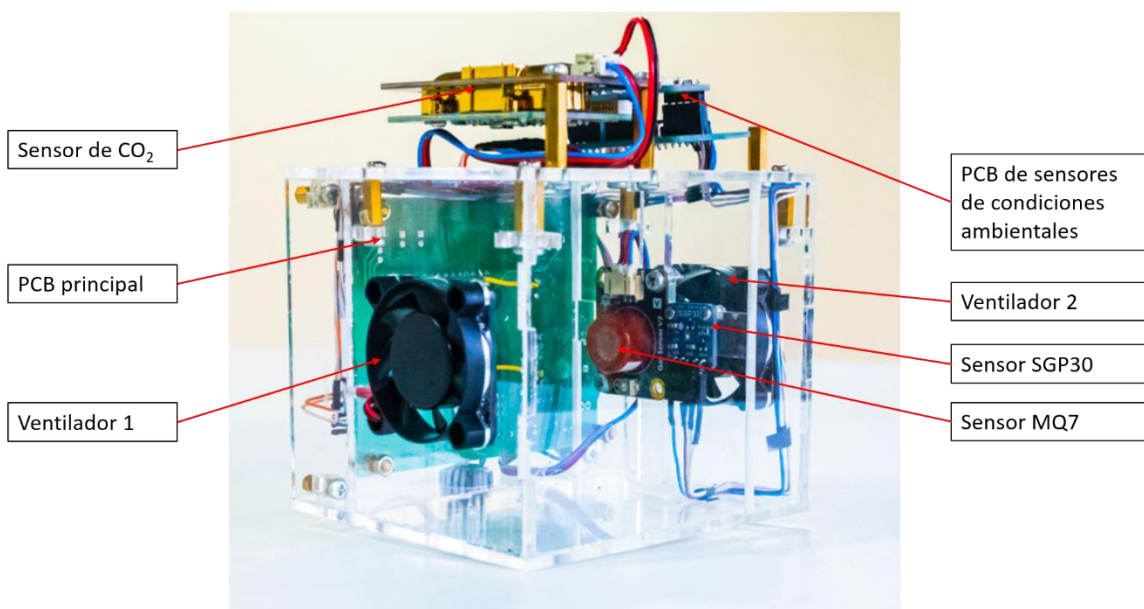
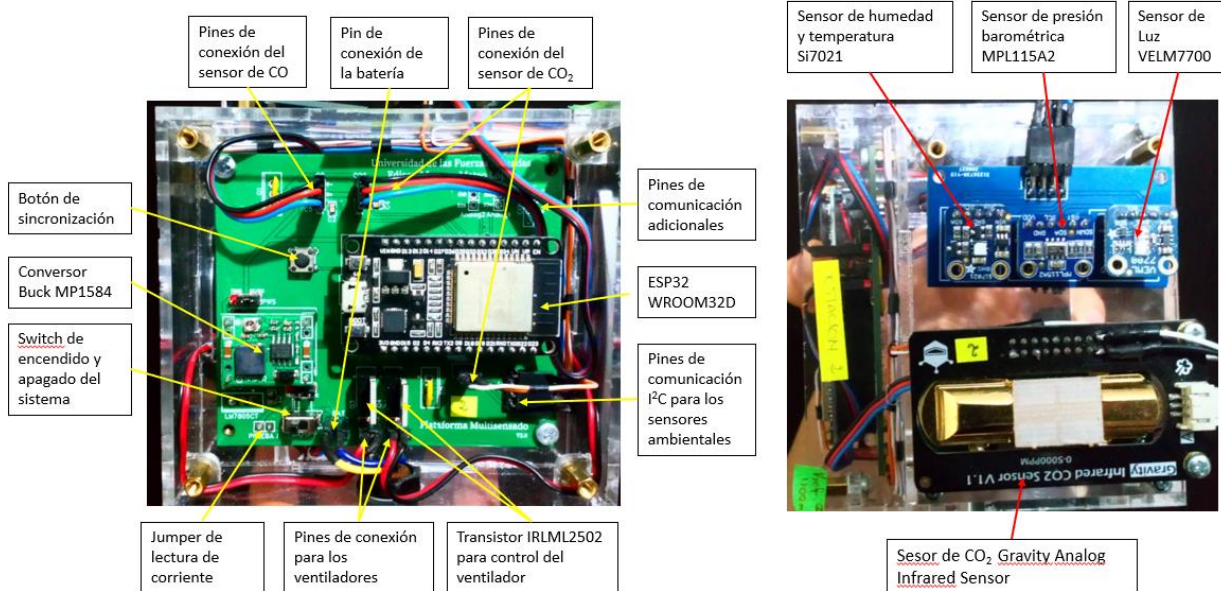


Figura 34.

Vista Lateral - PCB Principal, Vista Superior.



Capítulo IV

Diseño e Implementación de la Plataforma Robóticas Móvil

La implementación de plataformas robóticas permite mejorar la cobertura del área de sensado y la optimización de recursos, sensores y actuadores, debido a que con su desplazamiento controlado se puede utilizar una sola plataforma multisensado para la toma de datos en varios puntos, mejorando así, la visualización de la calidad de aire del entorno completo de análisis.

La plataforma robótica consiste en un vehículo capaz de desplazarse dentro de un entorno conocido de manera autónoma, con la capacidad de detenerse en puntos estratégicos definidos dentro de una trayectoria. Para lograr este desplazamiento se revisaron diferentes métodos de orientación como sistemas de navegación autónoma con sensores de proximidad, sistemas de orientación con el uso de LIDAR (del inglés *Laser Imaging Detection and Raging*) e incluso el uso de sistemas de visión por computadora. Sin embargo, como el propósito de las plataformas móviles es posicionar el sistema de sensado en diferentes ubicaciones predefinidas se decidió utilizar un método de orientación simple como el seguidor de línea. La ventaja de este método es que permite la modificación de la ruta de forma fácil y rápida, además que su implementación es rápida y sencilla. En este capítulo se detalla el proceso de diseño, pruebas e implementación de dos plataformas robóticas móviles.

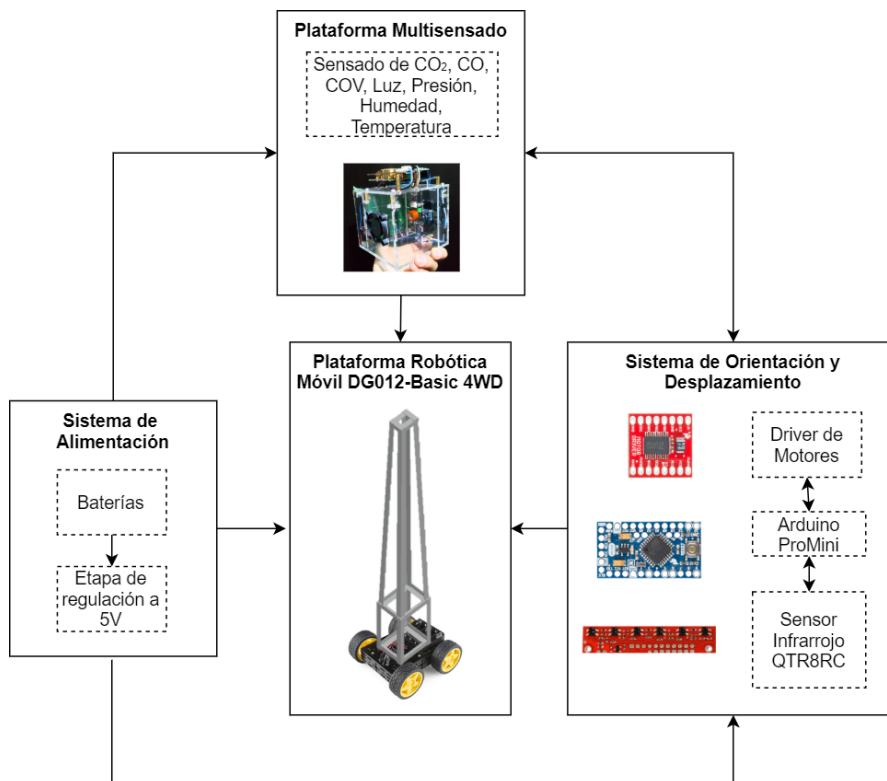
Descripción de la Plataforma Robótica

La plataforma robótica está compuesta por un robot móvil al que se le acopla una estructura metálica que le permite la fijación de los sensores y actuadores de la plataforma multisensado. La orientación y el movimiento de la plataforma se realizan aplicando el principio de un robot seguidor de línea para su desplazamiento por rutas previamente establecidas, en donde existen ubicaciones específicas en su recorrido para realizar la

toma de datos de la calidad del aire por parte de la plataforma multisensado. En la Figura 35 se muestra la arquitectura de la plataforma robótica móvil.

Figura 35.

Diagrama de bloques de la plataforma robótica.



Sistema Mecánico

La plataforma robótica móvil tiene como base estructural al robot móvil DG012-Basic 4WD (Figura 36) cuyas características se detallan en la Tabla 18. El chasis metálico de este robot permite el montaje de la estructura en la que se ubicarán los diferentes sensores de la plataforma multisensado. Se modificó la configuración original del robot DG012-Basic de doble tracción por una configuración diferencial de tracción trasera, además se reemplazaron los motores delanteros por unas ruedas de apoyo montadas en una estructura de acrílico para aumentar el área de contacto con el suelo y tener una mayor estabilidad. Las modificaciones se muestran en la Figura 37.

Figura 36.

Robot Móvil DG012-Basic 4WD.



Figura 37.

Robot Móvil DG012-Basic Modificado con tracción trasera. (a) Vista Superior, (b) Vista Inferior.

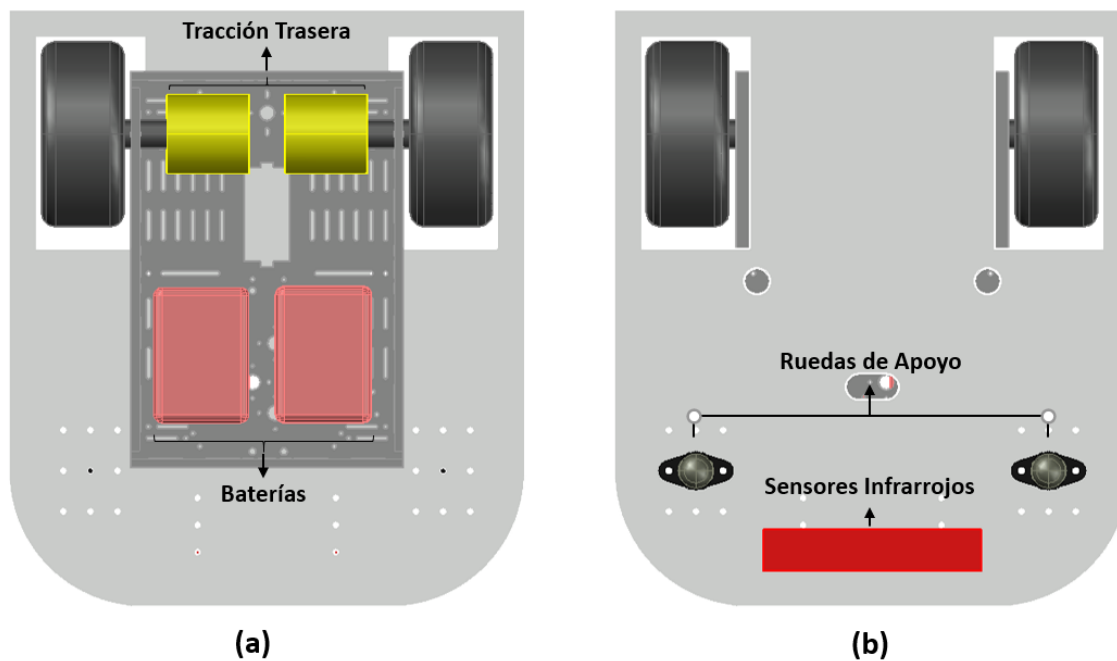


Tabla 18.*Características del robot DG012-Basic 4WD.*

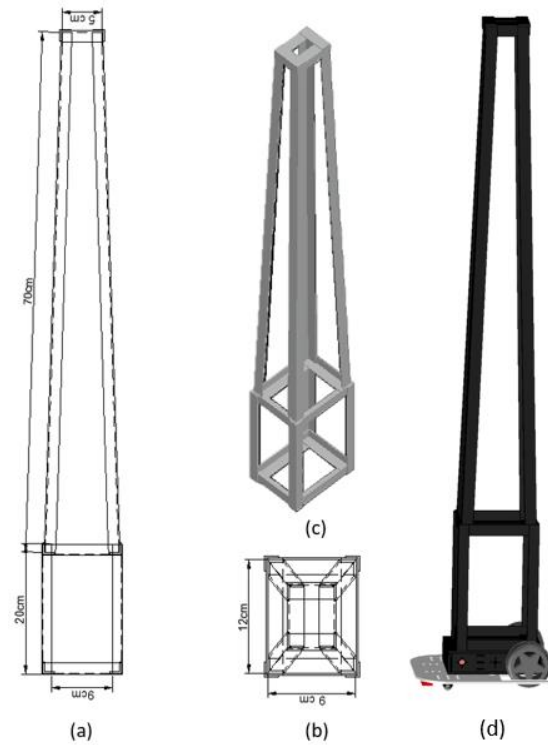
Parámetro	Especificación
Nombre	DG012-Basic 4WD
Dimensiones	165L x 157W x 65H mm
Motores	4 Dagu DG02S
Relación de engranes	48:1
Torque	0,8 kg*cm
Velocidad	320 rpm a 7.2 V
Chasis	Aluminio
Peso	580 g
Consumo de corriente	máximo 170 mA
Suministro	9 Vcc

Cuando una persona permanece sentada ya sea en un salón de clases o en el trabajo el aire que inhala se sitúa a una altura aproximada de 120cm. Por esta razón, en un estudio realizado en varias escuelas de Serbia se toma como altura referencial 110cm del suelo para la recolección de datos relevantes de la calidad de aire que inhalan los habitantes. Por otra parte, cuando una persona duerme, el aire que inhala se sitúa a una altura mínima aproximada de 80cm del suelo (Turanjanin et al., 2014; van Raan, 2004).

Tomando en cuenta ambos escenarios se implementa una estructura que permita posicionar los sensores a una altura 95cm, con el objetivo de recolectar datos específicos sobre la calidad de aire que respira una persona durante una actividad cotidiana. Para el diseño se analizaron estructuras robustas, estables y livianas, de manera que la plataforma robótica sea capaz de desplazarse con la estructura de forma estable y que además resista el montaje de la plataforma multisensado. En la Figura 38 se muestra el diseño de la estructura metálica y el acople con el robot DG012-Basic.

Figura 38.

Diseño de la Estructura para la Plataforma Robótica Móvil. (a) Vista Lateral, (b) Vista Superior, (c) Vista Isométrica, (d) Implementación con Robot DG012-Basic.



Sistema de Orientación y Desplazamiento

El movimiento de la plataforma robótica se realiza a través de una trayectoria predefinida, el movimiento continúa hasta que detecte un punto de sensado en el cual el robot se detiene para que la plataforma multisensado realice la toma de muestras, una vez recolectada la información, la plataforma robótica continúa por la ruta establecida. Este proceso se repite hasta que la plataforma haya completado el circuito. Durante el sensado, la plataforma deberá completar varios recorridos del circuito durante todo el periodo de monitoreo. Cabe destacar que entre cada recorrido se tiene 5 minutos de inactividad con el objetivo de disminuir el consumo de energía. Este procedimiento cuenta con dos partes importantes, la detección de la línea que le permite al robot orientarse, y

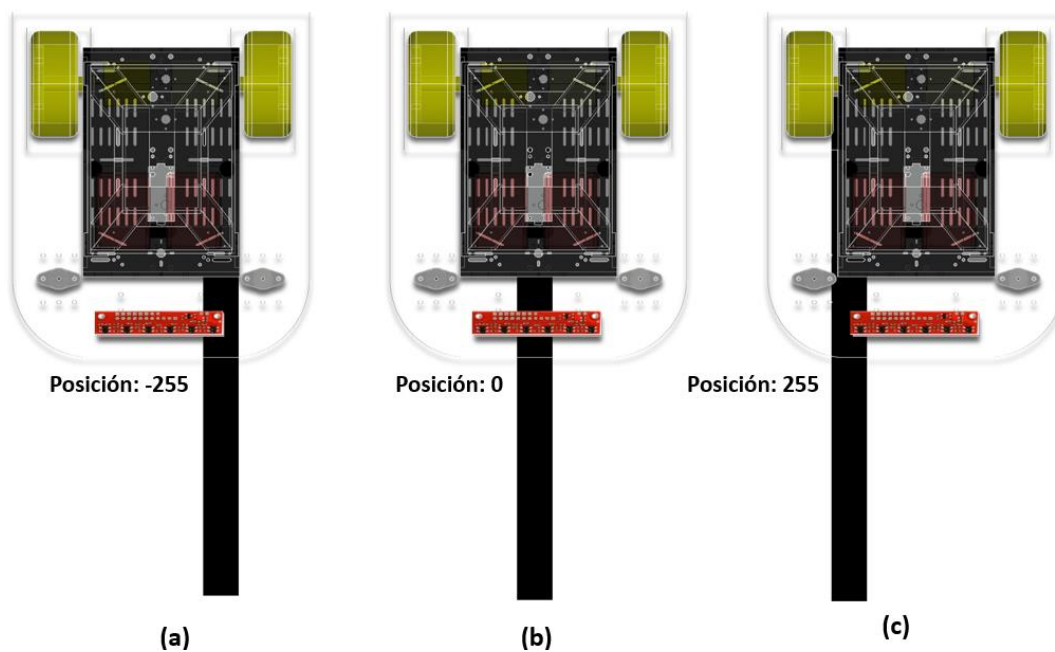
el control de desplazamiento de los motores del robot para su avance en función a la posición de los sensores respecto a la línea.

Detección de Línea

Para llevar a cabo esta tarea, se utilizó un arreglo de 6 sensores y transmisores infrarrojos de tipo digital presentes en el módulo QTR-8RC de la empresa adafruit (Pololu, 2001). Estos sensores permiten realizar la detección de la línea mediante el promedio ponderado del valor de reflectancia medido por cada sensor (Su et al., 2010). Este módulo cuenta con librerías proporcionadas por el fabricante que aplican este método para determinar la ubicación de la línea respecto a los sensores con un rango de -255 a 255, donde 0 significa que el arreglo de sensores se ubica en el medio de la línea y los valores de 255 indican que está al extremo de la línea ya sea izquierda o derecha (ver Figura 39) (Pololu, 2019).

Figura 39.

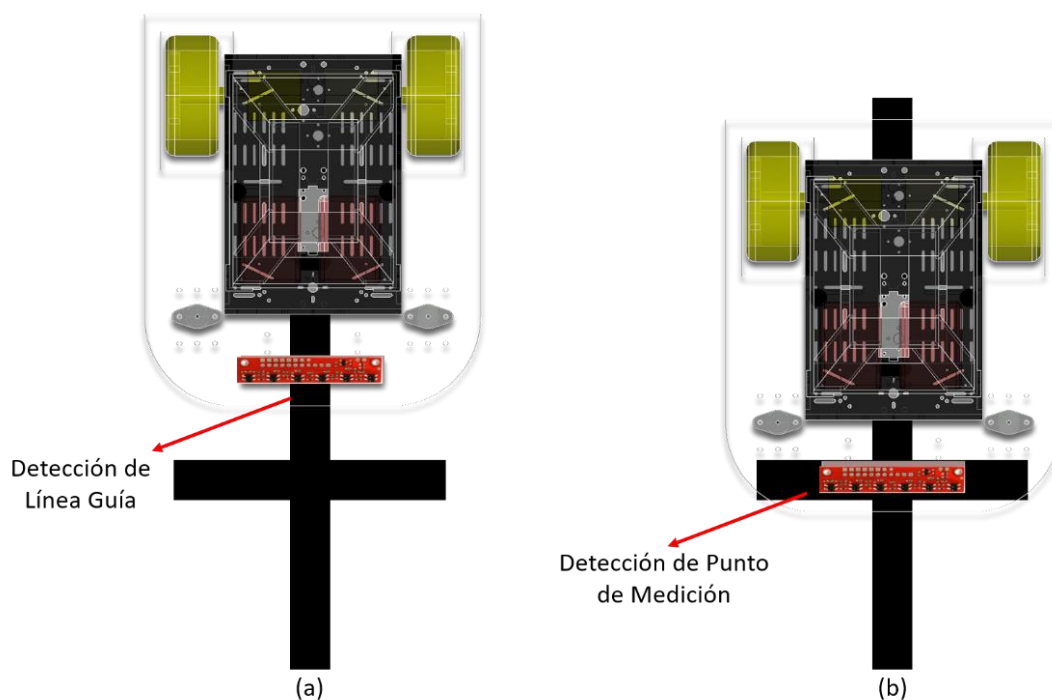
Detección de Línea con Módulo Adafruit QTR-8RC. (a) Línea a la izquierda, (b) Línea en el centro, (c) Línea a la derecha.



Para la detección de los puntos de sensado donde el robot deberá detenerse se utilizaron líneas perpendiculares a la trayectoria (Figura 40), esto permite que los sensores se activen todos a la vez, indicando la presencia de una línea horizontal. Con esta información el robot se detiene y comunica a la plataforma multisensado que se llegó a un punto de medición. Una vez terminada la medición, la plataforma multisensado comunica al robot para que continúe su recorrido hasta llegar al siguiente punto de medición.

Figura 40.

Detección de Punto de medición. (a) Robot en Movimiento, (b) Robot Detenido en Punto de Medición, (c) Robot en movimiento.



Control del Desplazamiento

El control de desplazamiento del robot está basado en un control PD cuya entrada del sistema es la posición del robot respecto a la línea, y como acción de control el giro

que debe realizar el robot. El setpoint del controlador se establece en 0, debido a que el objetivo es siempre tener el robot centrado con la línea, es decir que sus sensores marquen una posición de 0. Previo a la implementación de la estructura metálica en el robot, se realizaron pruebas del desplazamiento del robot empleando un control proporcional, sin embargo, al acoplar la estructura, el comportamiento del robot se tornó mucho más inestable, modificando drásticamente el comportamiento de la planta siendo necesario mejorar el controlador, por lo que se implementó una parte derivativa al controlador. El controlador con la planta modificada fue sintonizado con el método de prueba y error debido al cambio del modelo de la planta y su facilidad de sintonización por este método descrito en el libro *Control Systems, Robotics and Automation* (Araki, 1996, p. 69).

Para realizar el control del robot se decidió trabajar con la tarjeta de desarrollo Arduino Pro Mini, la cual está basada en el microcontrolador ATmega328. Adicional, esta tarjeta permite establecer una comunicación con la plataforma multisensado para su sincronización. En la Tabla 19 se detallan las especificaciones técnicas del Arduino Pro Mini.

Tabla 19.

Especificaciones Técnicas Arduino Pro Mini.

Parámetro	Valor
Nombre	Arduino Pro Mini
Microcontrolador	ATmega328
Frecuencia de Operación	16 MHz
Pines Digitales Entrada/Salida	14
Pines PWM	6
Pines Analógicos	6
Alimentación	5-12 V
Pines de Comunicación	UART, SPI, I ² C

Parámetro	Valor
Consumo de corriente por pin	40 mA
Memoria Flash	32KB
Memoria SRAM	2KB
Memoria EEPROM	1KB

Para implementar el control en la plataforma robótica se integraron los sensores y actuadores con el controlador Arduino Pro Mini. Utilizando los GPIO analógicos A0-A5 para la conexión de los sensores infrarrojos. El control de los motores se realiza a través de los GPIO digitales D5, D6, D7 y D8 y los GPIO D3 Y D9 para el control PWM que se conectan al driver TB6612FNG. Para la comunicación con el controlador de la plataforma multisensado se emplean los GPIO digitales D2 Y D12, tomando en cuenta que los valores de tensión en los que operan son diferentes entre el sistema de sensado y la plataforma robótica (Arduino: 5V, ESP32: 3.3V), por lo tanto, fue necesaria la implementación un divisor de tensión en la conexión D12 del Arduino para una reducción de tensión de 5V a 3.3V. En la Tabla 20 se detallan los pines de conexión del controlador Arduino Pro Mini.

Tabla 20.

Detalle de los pines de conexión para la Tarjeta Arduino Pro Mini dentro de la plataforma robótica.

Pin	Conexión
RX1	Pin de conexión para programación Serial
TX0	Pin de conexión para programación Serial
D3	Pin digital para en canal PWM A del driver TB6612FGN
D5	Pin digital para el control del motor A
D6	Pin digital para el control del motor A
D7	Pin digital para en canal PWM B del driver TB6612FGN
D8	Pin digital para el control del motor B
D9	Pin digital para el control del motor B

Pin	Conexión
D2	Pin de recepción para comunicación con el controlador ESP32
D12	Pin de transmisión para comunicación con el controlador ESP32
A0	Conexión al Pin 3 del sensor QTR-8A
A1	Conexión al Pin 4 del sensor QTR-8A
A2	Conexión al Pin 5 del sensor QTR-8A
A3	Conexión al Pin 6 del sensor QTR-8A
A4	Conexión al Pin 1 del sensor QTR-8A
A5	Conexión al Pin 2 del sensor QTR-8A
D13	Pin de conexión para Botón de Sincronización
D10	Pin Auxiliar
D11	Pin Auxiliar

Para el control y manejo de los motores DC, el sistema de potencia permite el control de los motores a través del driver TB6612FNG mediante señales digitales y PWM. Este driver de bajo consumo permite controlar dos motores de manera independiente a una frecuencia de 100kHz, en la Tabla 21 se muestran las especificaciones técnicas de este Driver (*SparkFun Motor Driver - Dual TB6612FNG (1A) - ROB-14451 - SparkFun Electronics, 2020*).

Tabla 21.

Especificaciones Técnicas del driver TB6612FNG.

Parámetro	Valor
Nombre	TB6612FNG
Alimentación VCC	2.7 – 5.5 VDC
Alimentación VM	5-15 VDC
Corriente de salida continua	1.2 A

Sistema de Alimentación

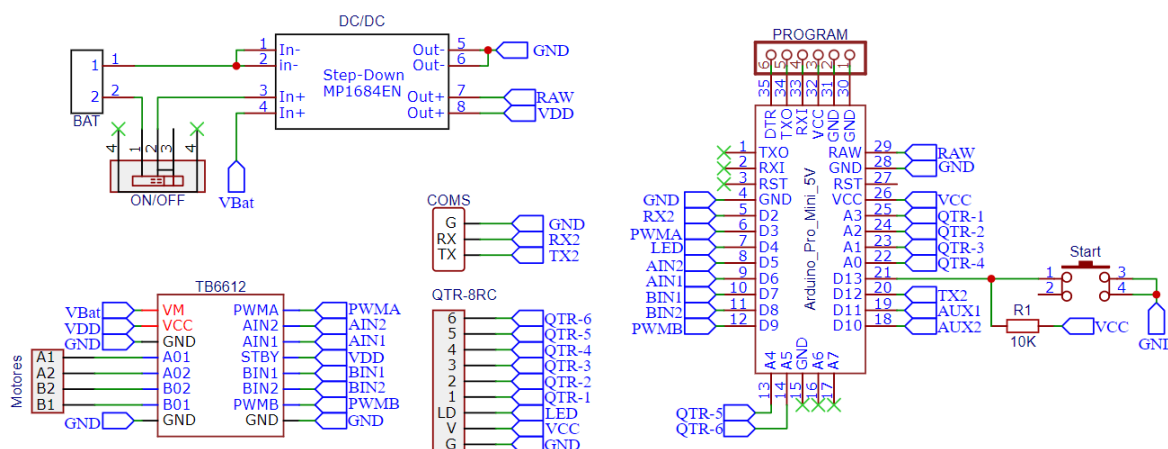
El sistema de alimentación se encarga de proporcionar la energía necesaria al robot móvil, que incluye el sistema mecánico con dos motores y el sistema de orientación y desplazamiento. Por esta razón se decide implementar dos baterías tipo Li-Ion conectadas en serie, tomando en cuenta que cada batería es de 3.7V y su capacidad de 5000mAh. Con este arreglo se cuenta con un total de carga de 5000 mAh a 7.4V. Por otra parte, para suministrar el nivel de tensión al sistema de orientación y control se implementó el regulador MP1584, el mismo modelo que fue implementado en la plataforma multisensado cuyas características se indican en la Tabla 16.

Integración de la Plataforma Multisensado

Una vez comprobado el funcionamiento del sistema de alimentación y el sistema de orientación y desplazamiento, se establecen todas las conexiones para su integración (ver Figura 41). En función a estas conexiones se diseña una placa de circuito impreso de dimensiones 40x90mm, misma que se fija en la base de la estructura del robot, mientras que el resto de los componentes se fijan en la parte media y en la parte superior de la estructura.

Figura 41.

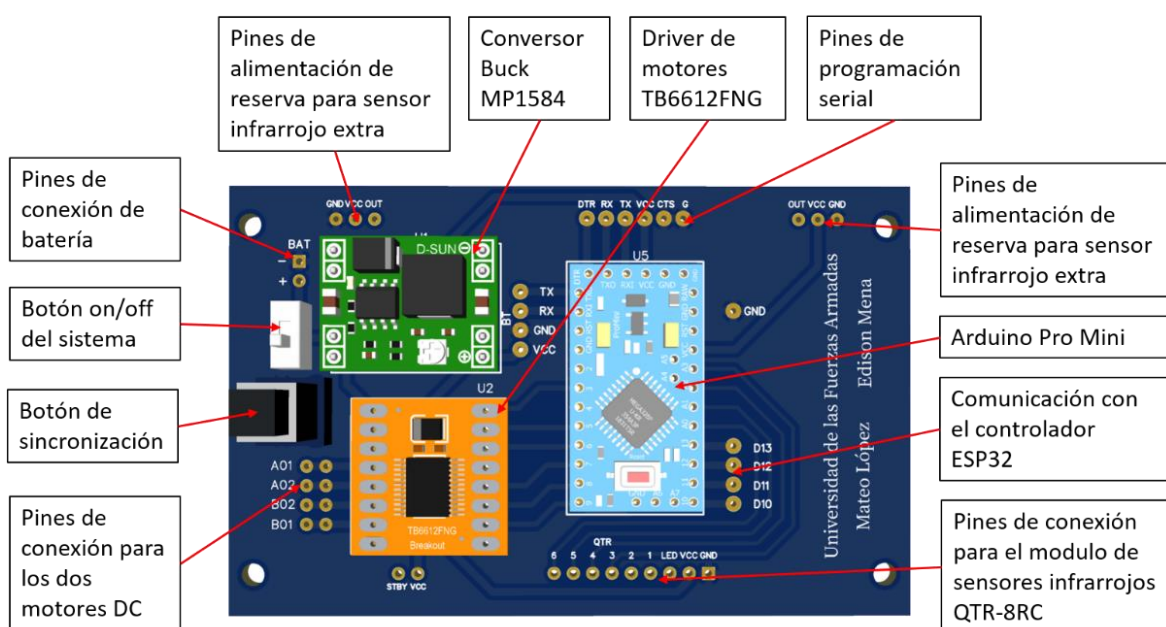
Diagrama Esquemático Circuito de Control Plataforma Robótica.



El diseño de la Figura 42 representa la placa de control con la descripción completa de los componentes que se implementa en cada uno de los robots. Entre algunos componentes se tienen los del sistema de orientación y desplazamiento, y del sistema de alimentación, así como también varios pines de comunicación para la sincronización y programación del controlador Arduino Pro Mini.

Figura 42.

Vista 3D del Diseño PCB del Circuito de Control de la Plataforma Robótica.



Finalmente, en la Figura 43 se detalla el posicionamiento de todos los componentes en la estructura metálica del robot. En la base se colocan las baterías de alimentación con el objetivo mejorar su estabilidad, así como también se posiciona la placa de control de la plataforma robótica, mientras que en la parte media del robot se posiciona la placa de control de la plataforma multisensado. Para concluir, en la parte superior de la estructura del robot se posicionan todos los sensores correspondientes a la plataforma multisensado.

Una vez diseñadas las plataformas robóticas, se realiza la implementación física de las mismas que conforman dos de las cuatro estaciones multisensado (Figura 44) para la implementación del sistema de monitorización en red.

Figura 43.

Plataforma Robótica Móvil y sus Componentes.

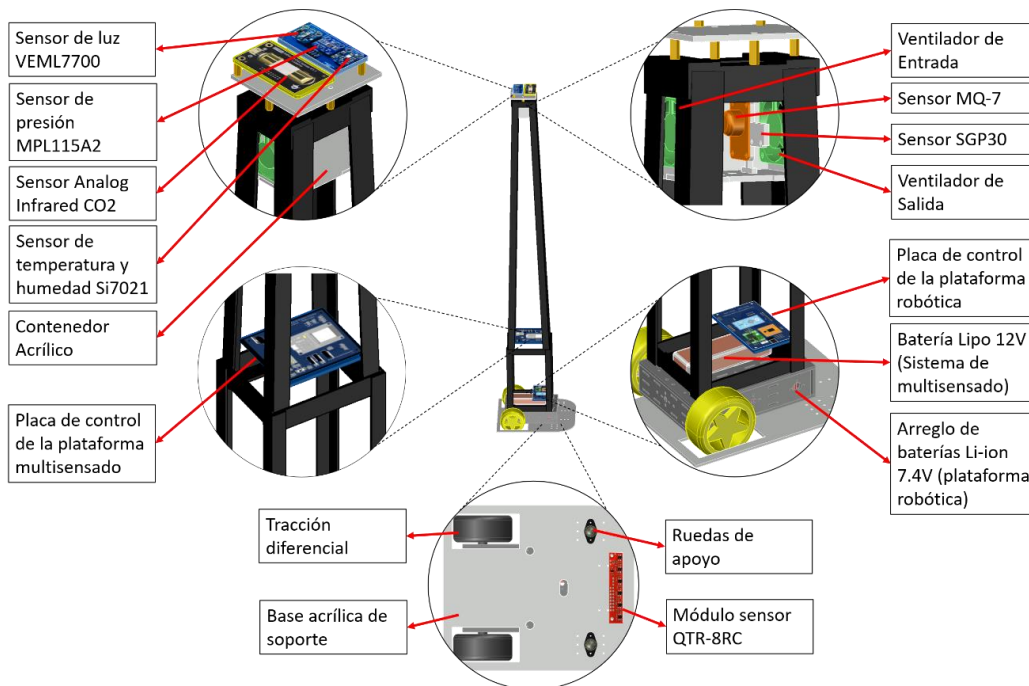


Figura 44.

Plataforma Robótica Móvil Implementada.



Capítulo V

Integración de la Red de Sensores y Pruebas de Funcionamiento

Una red de sensores inalámbricos, también conocida como WSN (del inglés *Wireless Sensor Network*) consiste en un conjunto de elementos autónomos, también conocidos como nodos, que están interconectados de forma inalámbrica y trabajan en conjunto para una tarea en común. En este proyecto se implementa una red de sensores inalámbricos formada por las cuatro estaciones multisensado diseñadas anteriormente, en un arreglo de dos estaciones fijas y dos estaciones móviles, donde cada una representa un nodo de la red.

El objetivo de esta red es realizar la monitorización de la calidad del aire y condiciones ambientales en espacios interiores, ubicando sensores en diferentes áreas del sitio de prueba. En este capítulo se detalla el diseño y configuración de la red inalámbrica, su arquitectura, modo de operación para su implementación y pruebas funcionamiento.

Arquitectura de la Red de Sensores

La red de sensores consiste en la implementación de un nodo servidor y cuatro nodos de medición constituidos por las plataformas multisensado diseñadas en los capítulos anteriores, de los cuales dos nodos serán fijos y dos nodos serán móviles. Cada nodo de medición opera mediante Wi-Fi para establecer la conexión con el nodo servidor a través de un router, mientras que para la transmisión de datos se utiliza el protocolo de comunicación MQTT (del inglés *Message Queuing Telemetry Transport*) debido a su bajo consumo de recursos de red, por su comunicación bidireccional y su capacidad de ser implementado en pequeños microcontroladores (MQTT, n.d.).

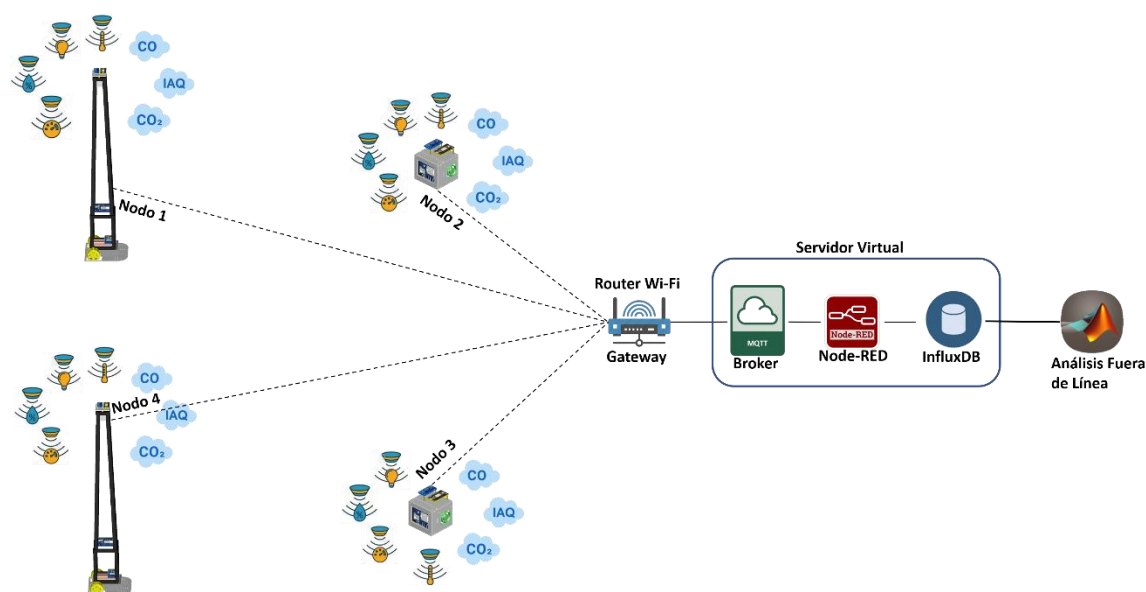
El nodo servidor integra servicios de recepción, distribución, almacenamiento y presentación de los datos enviados por los nodos de medición. En primer lugar, para la

recepción de datos se implementa un broker MQTT que permite la distribución de los mensajes de los nodos al servidor y viceversa. Para la distribución de los datos hacia su almacenamiento y para su presentación se utiliza la plataforma Node-Red, que permite la integración de diferentes servicios y también permite el control de las operaciones de cada nodo, además de una visualización de los datos de las variables de cada nodo. El almacenamiento de la información se lo realiza en InfluxDB, una base de datos basada en series temporales optimizada para el manejo de métricas de sensores.

La arquitectura de este sistema se muestra en la Figura 45, donde el router funciona como puerta de enlace para el envío de la información de cada nodo hacia el servidor. Como el objetivo de esta red es la monitorización de la calidad del aire y condiciones ambientales en espacios interiores, se debe definir físicamente el lugar de operación, la ubicación de los nodos fijos y las rutas de los nodos móviles, además del periodo de operación del sistema. Con los datos almacenados se procede a realizar un análisis más detallado fuera de línea.

Figura 45.

Arquitectura de la Red de Sensores Inalámbricos



Diseño de la Red MQTT

El intercambio de información entre los diferentes nodos y el servidor debe ser de fácil configuración y capaz de implementarse en los controladores de cada nodo. Para este objetivo se implementa el protocolo MQTT, que es un estándar abierto representado en la ISO/IEC 20922 que describe a un protocolo M2M (del inglés *Machine to Machine*) y que está basado en la pila TCP/IP para la comunicación (ISO, 2016). MQTT es un servicio de mensajería de tipo publicador – suscriptor basado en tópicos, por lo que para su funcionamiento necesita de un servidor central denominado broker. Para este proyecto se decidió trabajar con la versión de MQTT 3.1 ya que es la versión que manejan los nodos de la Red.

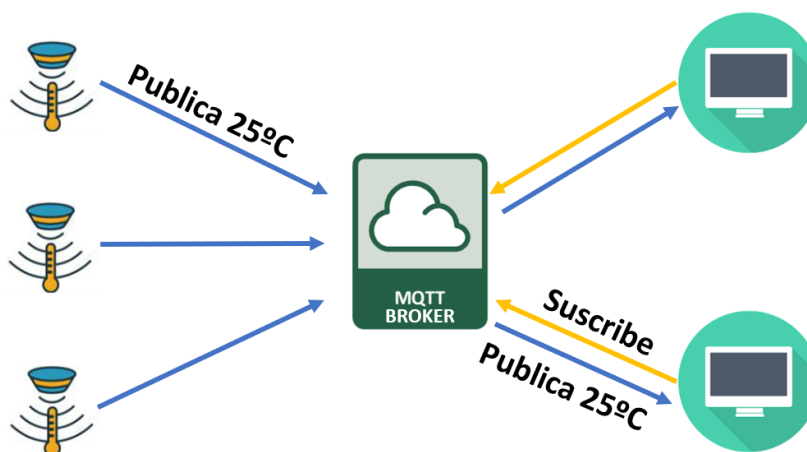
Topología de la Red MQTT

MQTT sigue una topología de estrella, con el nodo central o bróker como concentrador de los mensajes. El broker se encarga de recibir los mensajes de los nodos publicadores y reenviarlos hacia los nodos suscritos como se indica en la Figura 46. Esta comunicación puede ser cifrada para aumentar su seguridad. La ventaja de esta comunicación es que los clientes no necesitan conocerse entre ellos, solo estar conectados al bróker, por lo que pueden estar separados geográficamente sin afectar la topología.

Para este proyecto se seleccionó un bróker open source diseñado por la fundación Eclipse, llamado Eclipse Mosquitto. Este bróker permite trabajar con las versiones 5.0, 3.1.1 y 3.1 de MQTT, además de configuraciones de seguridad y calidad de servicio. Este bróker fue configurado en el nodo servidor (Mosquitto, 2018).

Figura 46.

Topología Red MQTT.

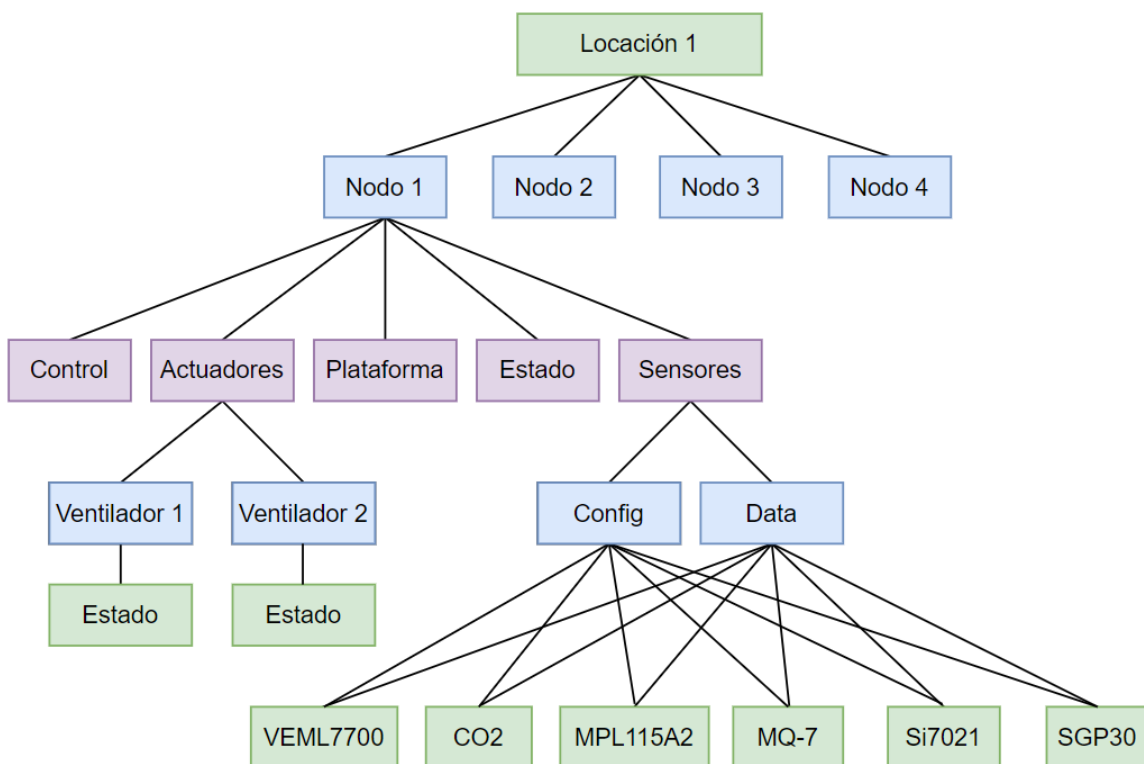


Configuración de Tópicos MQTT

MQTT usa tópicos para la comunicación de la información, donde los nodos emisores y receptores deben publicar o estar suscritos al mismo tópico para poder entablar una comunicación. La ventaja de este sistema es que permite arquitecturas de comunicación uno a uno o de muchos a muchos. Un tópico está representado por una cadena de caracteres y tiene una estructura jerárquica donde cada nivel de jerarquía está separado por un "/". En la Figura 47 se muestra un diagrama con la estructura jerárquica de los tópicos de la red, mientras que en la Tabla 22 se muestra su configuración e información presentada por cada tópico.

Figura 47.

Diagrama de Tópicos para la Red MQTT (Nodo 1).

**Tabla 22.**

Descripción de Tópicos de la Red MQTT.

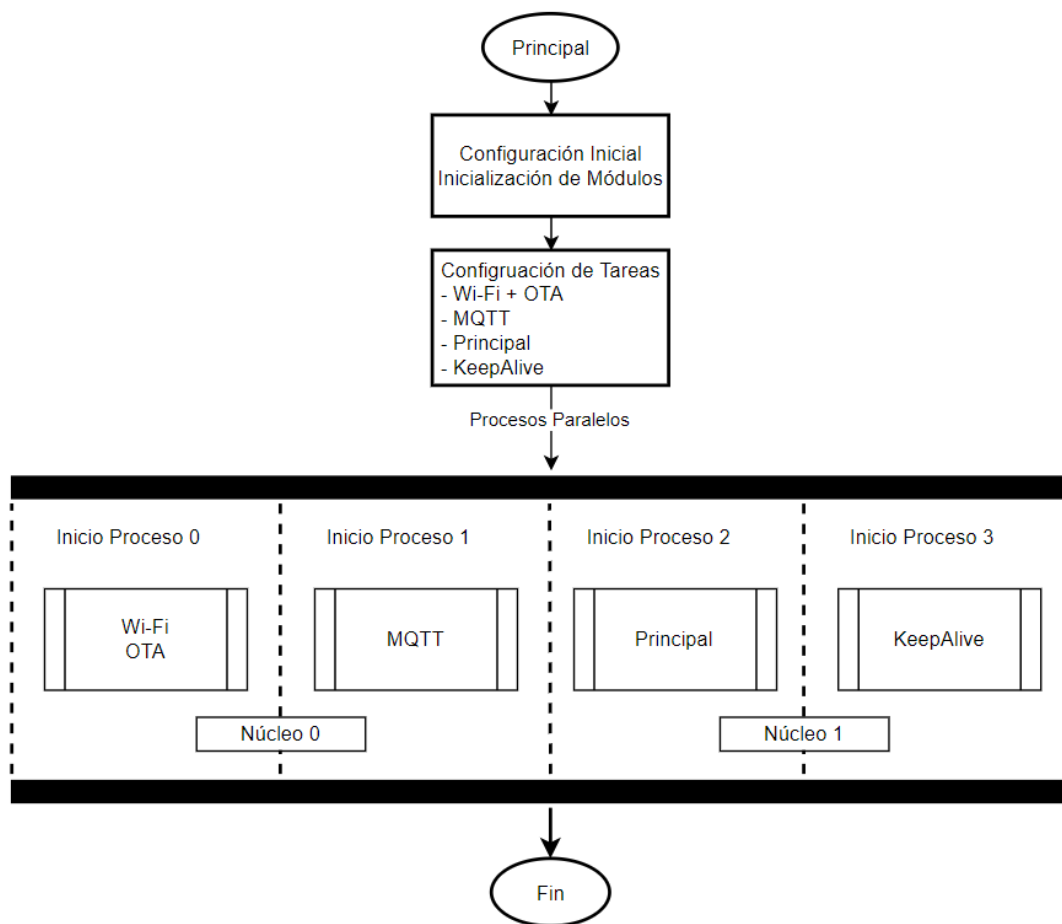
Tópico	Información del Tópico
locación1/nodo1/control	Sincronización de los Nodos.
locacion1/nodo1/actuadores/ventilador[1,2]/[estado]	Control de Encendido y Apagado Manual de Ventiladores del sistema de Limpieza. Adicional indica el estado actual de cada ventilador.
locacion1/nodo1/plataforma	Indica el estado de sincronización con las plataformas robóticas, "1" para Listo y "0" para Standby.
locacion1/nodo1/estado	Indica información general de la plataforma: "ID": Identificador de Cada Estación [1,2,3,4] "RSSI": Intensidad de señal Wi-Fi "IP": Identificador de Red IP "Alive": Ping continuo (ultima conexión).
locacion1/nodo1/sensores/data/[sensor] locacion1/nodo1/sensores/config/[sensor]	Envío de la información recolectada por los sensores. Permite configurar parámetros de los diferentes sensores de la estación.

Flujo de Programa para Nodos de Medición (Plataformas Multisensado)

Como se mencionó en el capítulo 3, las plataformas multisensado utilizan la tarjeta ESP32 como controlador, esta tarjeta representa al nodo de medición y fue programada para trabajar dentro de la red MQTT siguiendo una estructura basada en eventos. Este controlador funciona mediante Free-RTOS, un sistema operativo en sistema real (Real Time Engineering Ltd., 2004; Systems, 2018). Tomando en cuenta que esta tarjeta posee dos núcleos es posible realizar de forma paralela acciones de medición y transmisión de información, donde cada uno de los nodos de medición sigue la estructura de la Figura 48.

Figura 48.

Diagrama de Flujo del Programa Principal de la Plataforma Multisensado.



La configuración inicial indica la declaración de las librerías para el manejo de la comunicación y transmisión para usar el protocolo Wi-Fi y MQTT, mientras que para el uso de los diferentes sensores se utilizaron las librerías provistas por su fabricante. En la inicialización de los módulos se realizan las configuraciones de las diferentes variables a ser utilizadas en los procesos del programa. Para el proceso de conexión Wi-Fi se indican las credenciales de la red inalámbrica, para el proceso de MQTT se indican las credenciales del broker MQTT, para el proceso principal se establece la configuración de cada sensor y los valores iniciales de los actuadores del sistema de ventilación. Finalmente, para el proceso KeepAlive se configura la frecuencia de envío de la información de estado de la estación.

Para la configuración de los procesos que se van a ejecutar de forma paralela se debe configurar cada una con su respectivo espacio de memoria. Los procesos de comunicación se ejecutan en el núcleo 0 del controlador, mientras que los procesos de medición y envío de información de estado se ejecutan en el núcleo 1 del controlador. Cada proceso inicia inmediatamente después de ser declarada.

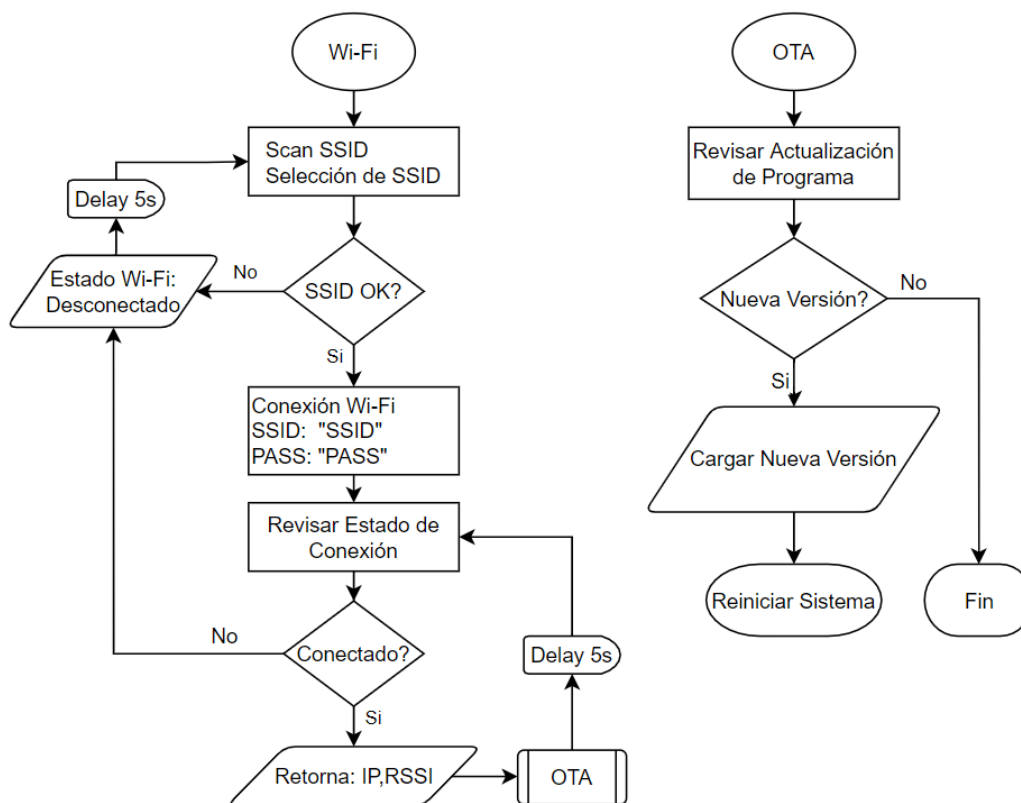
Proceso Wi-Fi

Este proceso se encarga de establecer una conexión Wi-Fi del nodo hacia una red inalámbrica. En el diagrama de la Figura 49 se muestra el proceso completo. Se inicia con un escaneo de la red en búsqueda de los SSID configurados para la conexión, de la lista de redes detectadas se selecciona la que tenga una mejor intensidad de señal (RSSI), si no se encuentra ninguna red que coincida con la configuración se hace una pausa de 5 segundos y se vuelve a buscar. Una vez seleccionada el SSID con mejor señal, se realiza la conexión utilizando las credenciales previamente configuradas. Luego de esto revisa el estado de la conexión, para determinar si se ha obtenido una dirección IP y verificar la intensidad de la conexión. Si la conexión se ha establecido correctamente

se procede a guardar los valores de la IP obtenida y la intensidad de señal. Este proceso se ejecuta de forma periódica cada 5 segundos, si se pierde la conexión se actualiza el estado de la estación a desconectado, y se realiza nuevamente el proceso de conexión.

Figura 49.

Diagrama de Flujo del Proceso Wi-Fi.



Una parte importante de este proceso es la actualización de la versión del programa mediante OTA (del inglés *Over The Air*), que es un método de actualización de la versión del programa de forma remota. Con esta característica es posible la actualización simultánea de muchas estaciones sin la necesidad de una interacción física directa con el controlador. Este proceso es relevante cuando el número de nodos aumenta significativamente, permitiendo la escalabilidad del sistema. Las versiones del programa se suben al servidor virtual, y cada estación compara su versión actual con la

versión del programa en el servidor, si las versiones coinciden entonces se continua el programa, pero si existe una nueva versión del programa se procede a descargarla y a actualizar a la estación.

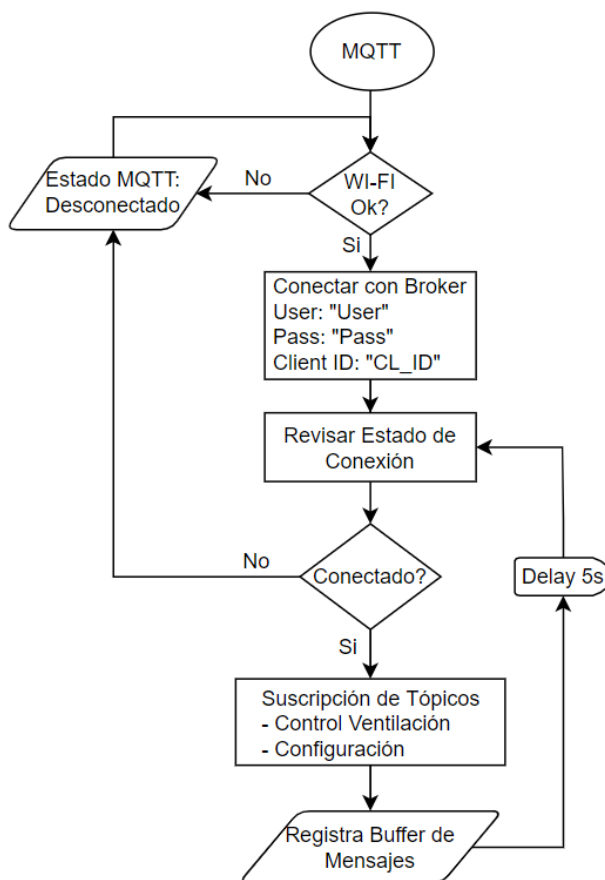
Proceso MQTT

Este proceso se encarga de establecer la conexión del nodo con el broker MQTT para realizar el envío y recepción de la información en la red. En la Figura 50 se indica el proceso completo. Inicialmente se revisa que la conexión Wi-Fi esté activa para poder enviar la solicitud de conexión con el broker utilizando las credenciales previamente configuradas.

Luego de esto se comprueba si la conexión con el broker fue satisfactoria. Una vez establecida la conexión con el broker se procede a realizar la suscripción a los tópicos para el control del sistema de ventilación y para cambios en la configuración de forma remota. Este proceso solo se lo realiza una vez y se repite cada vez que se renueva la conexión con el broker. Finalmente se procede a leer el buffer de mensajes MQTT para determinar si se ha recibido nueva información de control por parte del servidor de control. Este proceso se repite cada 5 segundos.

Figura 50.

Diagrama de Flujo Proceso MQTT.



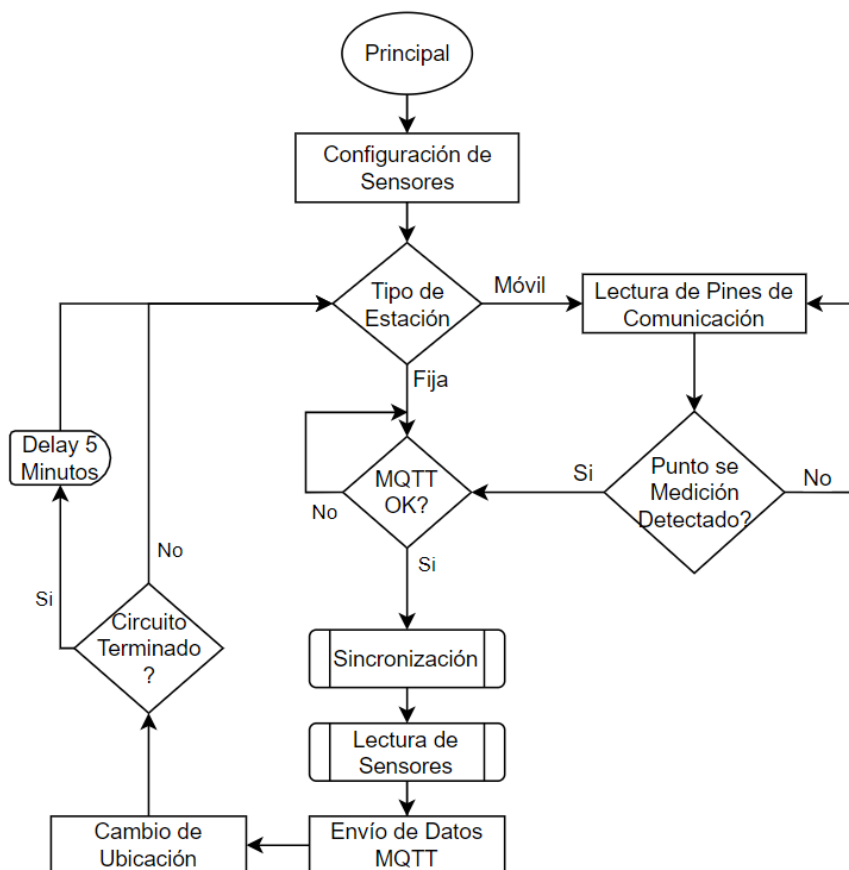
Proceso Principal

El proceso principal es donde se realiza la lectura de los sensores por parte de cada estación, siguiendo el diagrama de la Figura 51. Primero se realiza la configuración de los sensores, es decir la declaración de sus direcciones y modos de operación mediante sus respectivas librerías. Luego de esto se identifica si las estaciones están listas para realizar las mediciones, en el caso de las estaciones móviles se debe confirmar que la plataforma robótica se haya ubicado en el punto de sensado. Una vez todas las estaciones móviles están ubicadas correctamente, se procede a realizar la sincronización todos los nodos para realizar las mediciones de forma simultánea siguiendo el proceso de la Figura 53, en este proceso se realiza la toma de datos de los sensores de

condiciones ambientales y se activa el sistema de ventilación y limpieza para el registro de los sensores de óxido metálico. Finalmente se realiza el envío de la información hacia el broker MQTT para su recolección, almacenamiento y presentación.

Figura 51.

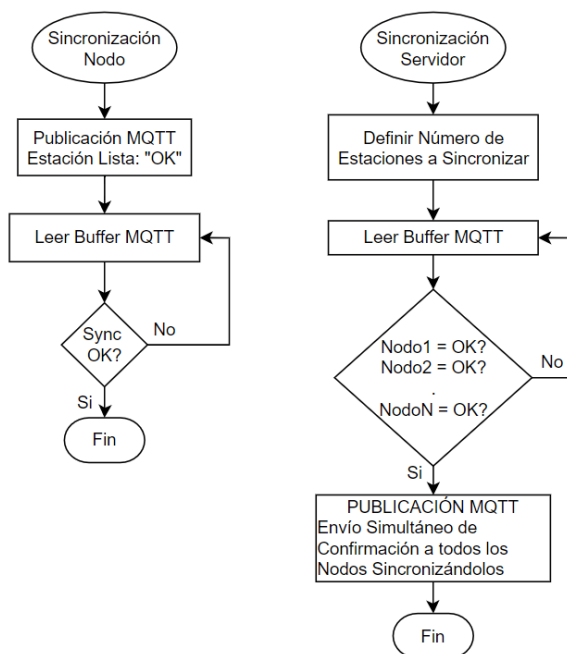
Diagrama de Flujo Proceso Principal.



La sincronización de los nodos se realiza mediante una confirmación por parte del servidor una vez que todos los nodos hayan enviado un mensaje de sincronización vía MQTT y permanezcan a la espera del servidor para iniciar la toma de datos. En la Figura 52 se indican los diagramas de flujo de este proceso tanto en la parte del nodo como en la del servidor.

Figura 52.

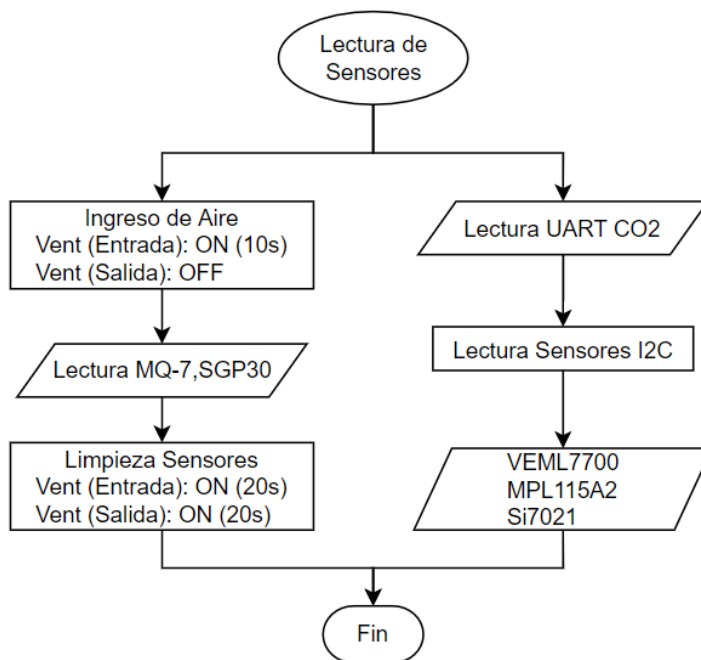
Diagrama de Flujo de Sincronización.



La subrutina de lectura de sensores sigue el diagrama de la Figura 53, donde se realiza la toma de datos de los sensores. Por un lado, se tiene el ingreso de aire durante 10 segundos para la medición de las variables químicas con los sensores de tipo MOX (MQ-7, SGP30). Luego de registrar los datos se procede a la limpieza de los sensores, por lo que se activan los ventiladores del contenedor de aire por un total de 20 segundos. Por otro lado, se realiza la lectura normal de los sensores de condiciones ambientales, y también del sensor óptico de CO₂.

Figura 53.

Diagrama de Flujo Lectura de Sensores.



Proceso KeepAlive

Este proceso se ejecuta periódicamente cada 10 segundos, Su objetivo es obtener la información del estado de la estación como la identificación del nodo, la dirección IP, la intensidad de señal inalámbrica y el estado actual del nodo (Activo o Inactivo). Con esta información recolectada se envía al servidor para identificar el estado de cada nodo y notificar al usuario en caso de irregularidades.

Configuración del Servidor Virtual

Toda la información recolectada por los nodos de medición es enviada hacia el nodo servidor para su distribución y almacenamiento. Este nodo consiste en un servidor remoto implementado de forma virtual en la nube de DigitalOcean. Con la implementación de un servidor remoto se reducen los tiempos de implementación y soporte, además que permite la agregación de servicios y una descentralización económica y segura para la

implementación de proyectos del Internet de las Cosas (IoT) como redes de sensores (Digital Ocean, 2020).

Tabla 23.

Características Servidor Virtual.

Característica	Especificación
Núcleos de Procesamiento	CPU Virtual 1 Núcleo
Memoria RAM	1 GB
Almacenamiento	25 GB
Tasa de Transferencia	1 TB Mensual
Dirección IPv4	161.35.123.65
Sistema Operativo	Ubuntu Server 18.04

Interfaz de Recepción de Datos (Node-Red)

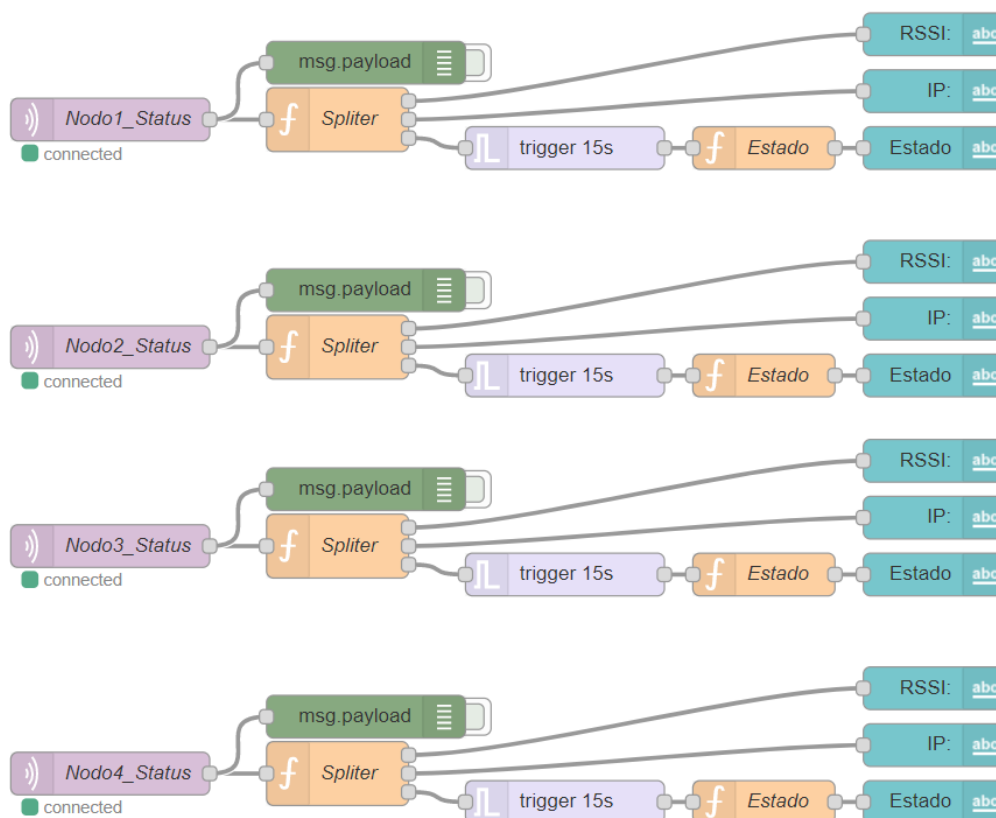
Node-Red es una herramienta de programación que permite enlazar diferentes dispositivos físicos con servicios en línea a través de una interfaz de programación visual. Esta herramienta se ha consolidado como el framework open-source para la gestión y transformación de datos en tiempo real en entornos IoT. Con la ayuda de esta herramienta se simplifica el proceso de conexión entre dispositivos de hardware, APIs y servicios en línea (Dahl, 2020). En este proyecto se utilizó node-red para la recepción y distribución de los datos provenientes de los nodos de medición mediante MQTT, además de implementar una interfaz de usuario encargada de la sincronización y presentación de la información del estado de los diferentes nodos. La programación en node-red se realiza a través de flujos, donde se conectan diferentes bloques funcionales. La interfaz de usuario cuenta con cuatro flujos para su operación.

El primer flujo se encarga de la monitorización del estado de cada nodo en la red, su configuración se muestra en la Figura 54, en este flujo se realiza la suscripción del

servidor hacia los tópicos de estado de cada nodo en la red (“locacion1/nodo[1 2 3 4]/estado”). El mensaje recibido en texto plano es procesado mediante el bloque *splitter* para obtener los valores individuales de RSSI, IP y Estado del nodo. En este flujo se revisa que los mensajes de estado lleguen en un periodo de 15 segundos debido a que los nodos realizan el envío periódico de esta información cada 10 segundos debido el proceso KeepAlive, si no se recibe ningún dato en ese periodo de tiempo, entonces se procede a cambiar el estado de la estación a “Desconectado”, actualizando la interfaz de usuario.

Figura 54.

Flujo de recepción de Información de Estado de Nodo.

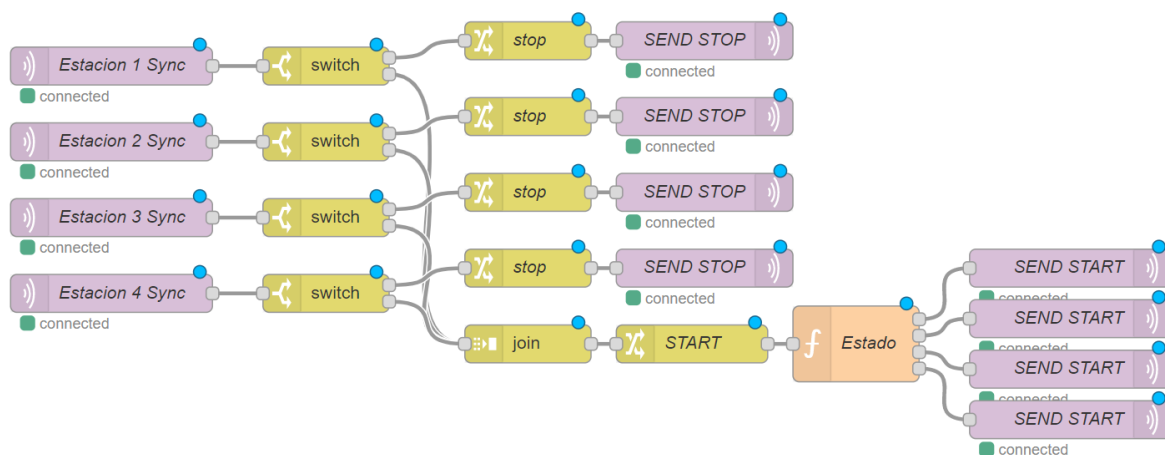


El segundo flujo de programación es el encargado de la sincronización de los nodos, indicado en el diagrama de la Figura 52. Este nodo se encarga de escuchar los

mensajes de sincronización de cada uno de los nodos, enviados al tópic “locación1/nodo[1 2 3 4]/control”. En el flujo de la Figura 55 se muestra la recepción de los mensajes de sincronización, que pasan por bloques de selección para determinar el tipo de mensaje que se recibió, si el contenido del mensaje es de sincronización, se direcciona el mensaje hacia el bloque de sincronización “join” en donde se comprueba que lleguen los mensajes de sincronización de todos los nodos, respondiendo de forma simultánea para el inicio de las operaciones.

Figura 55.

Flujo de Sincronización en Node-Red.

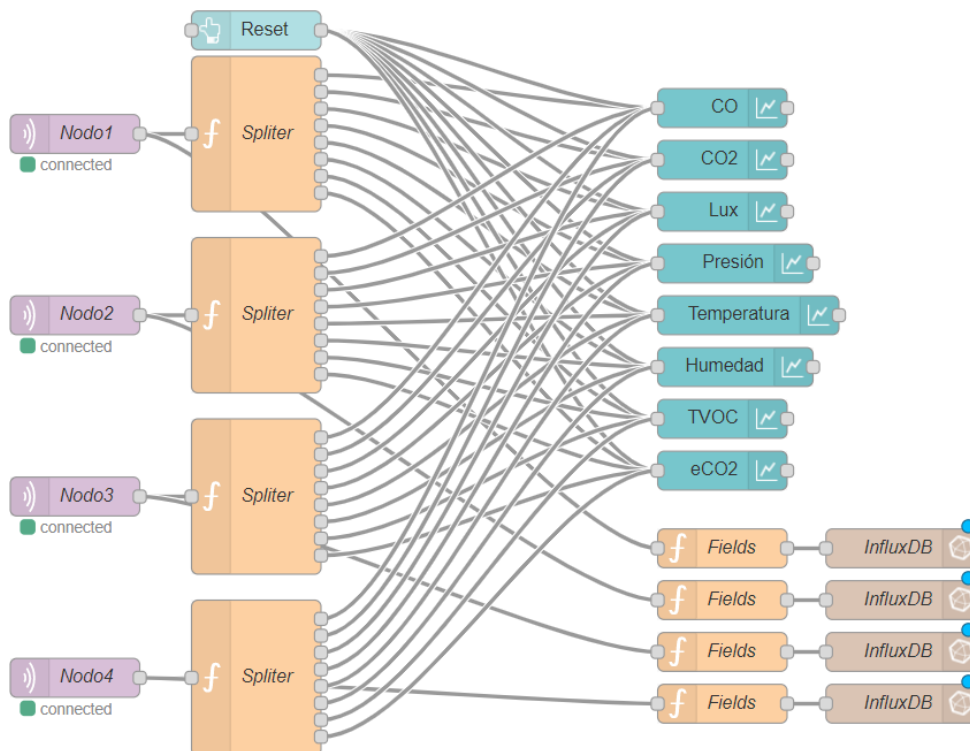


El tercer flujo de programa en node-red se encarga de la recepción y almacenamiento de los datos de cada variable y cada nodo. Los bloques de recepción están suscritos al tópic “locacion1/nodo[1 2 3 4]/sensores/data” que es el tópic al que cada nodo de medición envía todos sus datos después de ser medidos. Luego de esto, todos los datos se envían a un bloque “*spliter*” que permite diferenciar los datos de cada variable para ser presentados en las diferentes gráficas que se muestran en la interfaz de usuario.

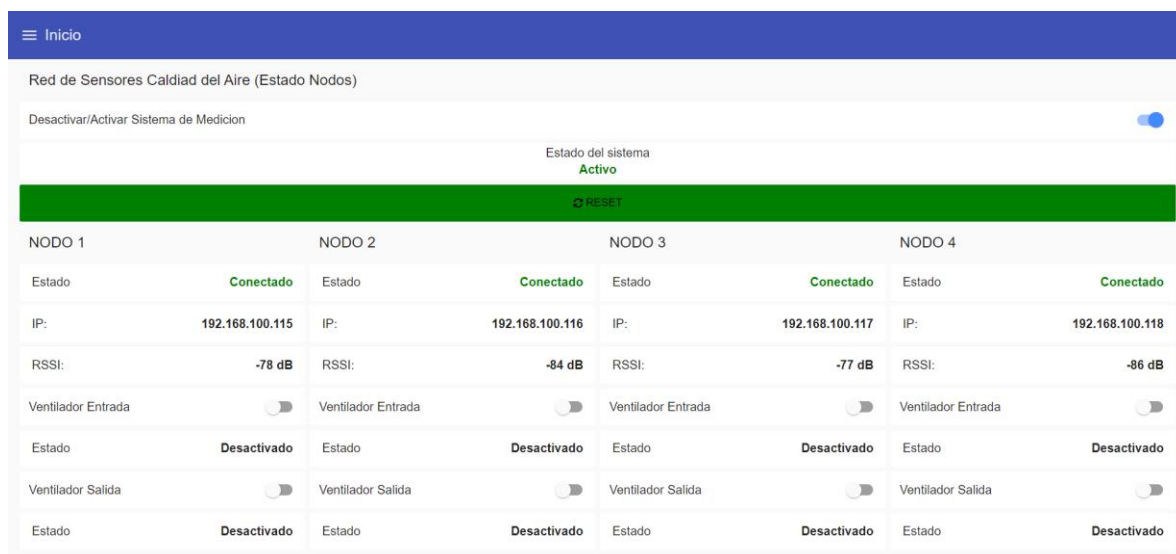
Adicionalmente los datos recibidos pasan al bloque “fields” que se encarga de darles formato para ser ingresados en la base de datos de InfluxDB. En donde se almacenarán con una marca temporal de la hora de la medición.

Figura 56.

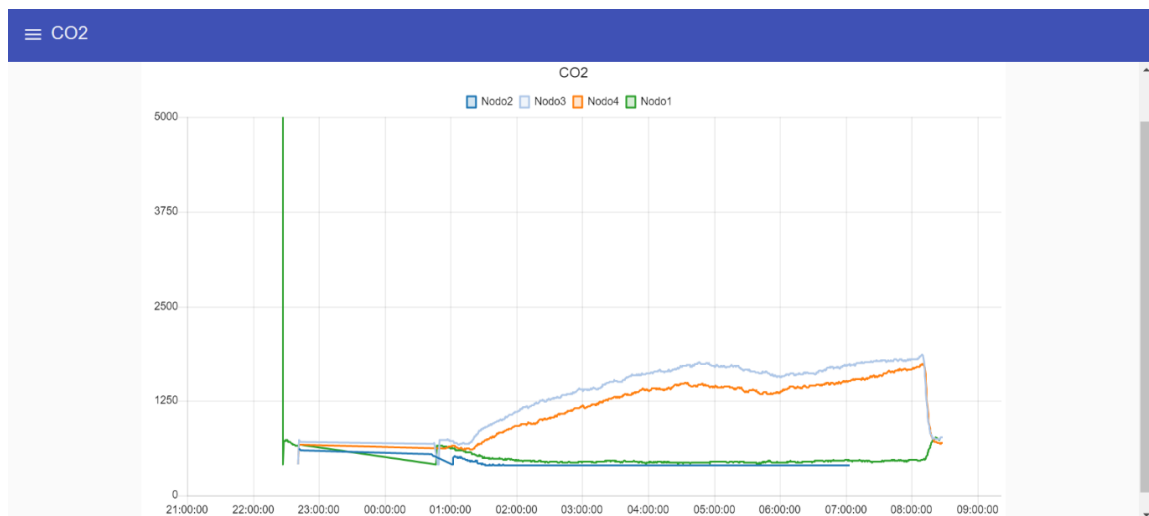
Recepción de Datos de Medición y Almacenamiento en Base de Datos.



Una de las características de node-red es que permite la creación de interfaces web de usuario, en donde se pueden implementar interfaces de control y visualización de los diferentes bloques implementados en los flujos del programa. La interfaz principal de la aplicación mostrada en la Figura 57 se encarga del control general del sistema, permitiendo iniciar o detener la operación de los nodos de medición a través del interruptor “Desactivar/Activar Sistema de Medición”. Adicionalmente se presenta la información de estado de cada nodo, además se implementó un control manual para la activación o desactivación del sistema de ventilación y limpieza en cada nodo.

Figura 57.*Interfaz de Usuario Node-Red.*

En conjunto con la interfaz de control se implementaron varias interfaces de visualización para la presentación de los datos recibidos por cada nodo, diferenciados por el tipo de variable a las cuales se pueden acceder a través del menú inicio en la Interfaz. En la Figura 58 se indica un ejemplo de la interfaz para los datos de la variable de CO₂.

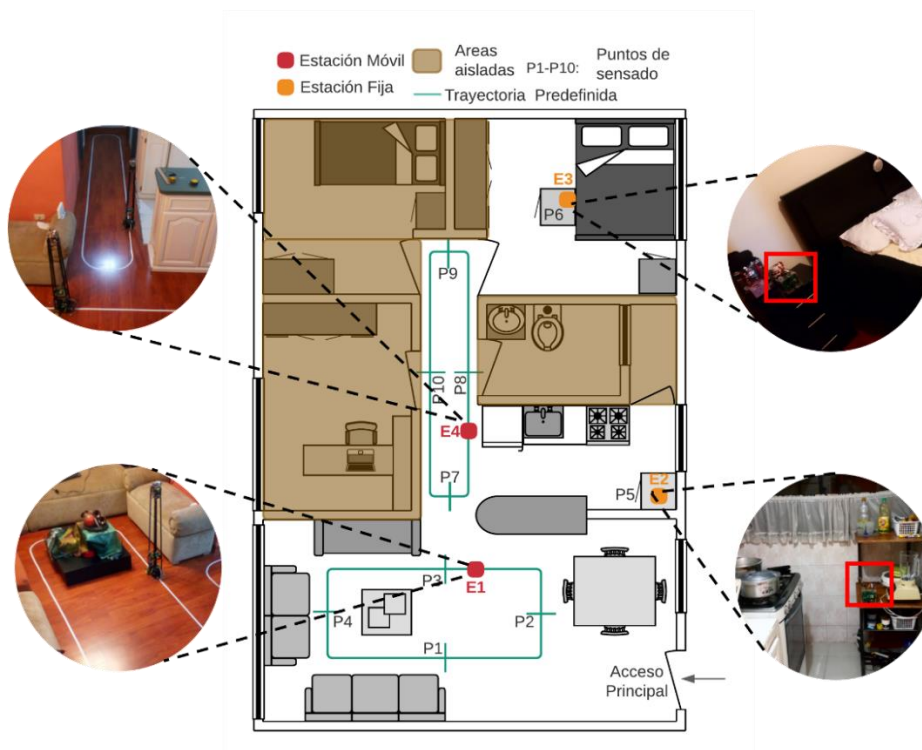
Figura 58.*Interfaz de Visualización de Datos para CO₂.*

Pruebas de Funcionamiento

Para realizar las pruebas del sistema de monitorización se trabajó en un departamento de 48m², posicionando las estaciones de la siguiente manera. La primera plataforma robótica denominada E1 se ubica en la sala, desplazándose por una trayectoria cubriendo los puntos de sensado P1, P2, P3 y P4, la primera de las plataformas fijas E2 se ubica en la cocina, cubriendo el punto de sensado P5, mientras que la segunda plataforma fija E3 se ubica aproximadamente en el centro de la habitación principal P6, finalmente la segunda plataforma robótica E4 se ubica en el pasillo desplazándose por otra trayectoria, sensando los puntos P7, P8, P9, P10, como se muestra en la Figura 59. Cabe destacar que las áreas en color marrón no se tomaron en cuenta para la toma de datos debido a la ausencia de actividad en estas áreas, por lo que fueron aisladas del sistema cerrando las puertas y bloqueando el acceso.

Figura 59.

Distribución de las plataformas multisensado dentro del entorno de prueba 1.

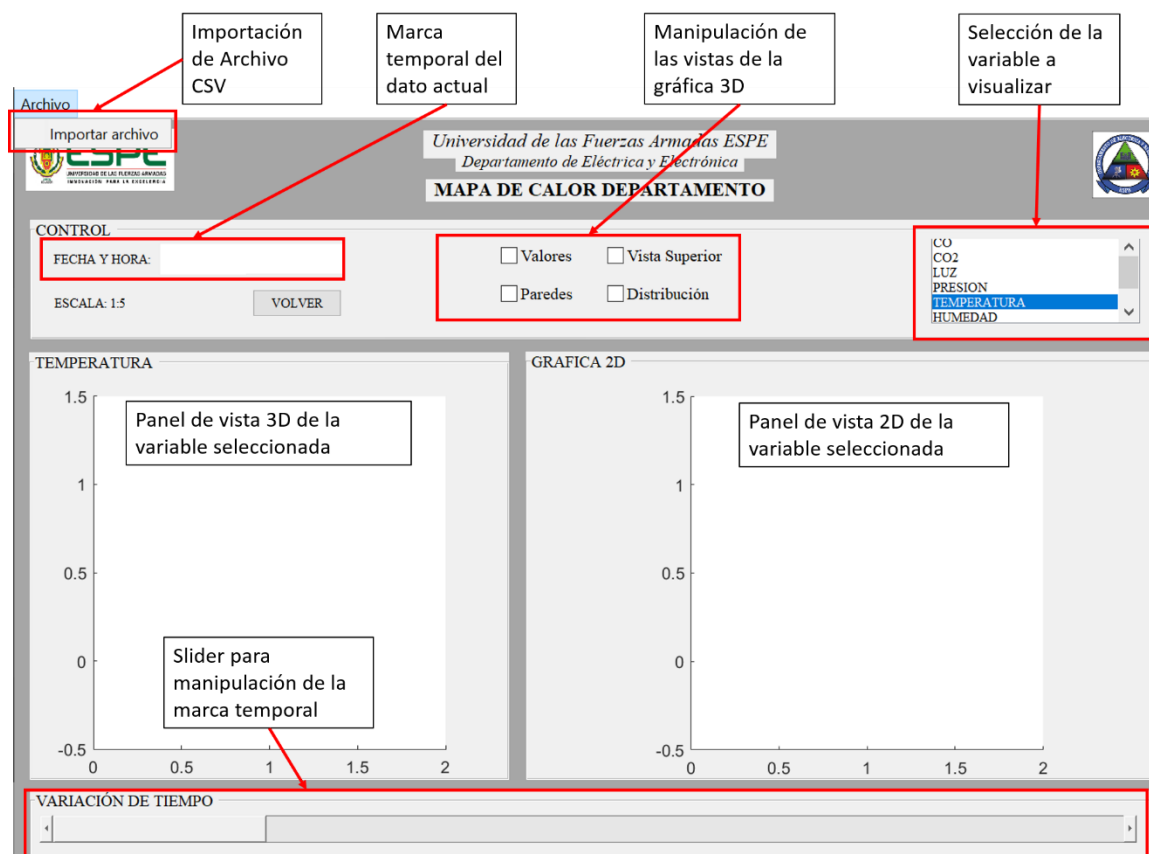


Software de Procesamiento

Una vez realizadas las mediciones y almacenadas en la base de datos, se extraen los datos en formato csv para ser analizados fuera de línea en el software Matlab. Para esto se desarrolló una interfaz que permite la carga y visualización de estos datos. En la Figura 60 se describen los componentes de la interfaz gráfica que permiten al usuario seleccionar la variable a visualizar y presentar sus valores en los diferentes puntos del sitio de pruebas generando un mapa de calor. Así como también, permite modificar la visualización del mapa de calor para obtener información más detallada, en conjunto con una vista de la evolución de la variable durante todo el periodo de prueba.

Figura 60.

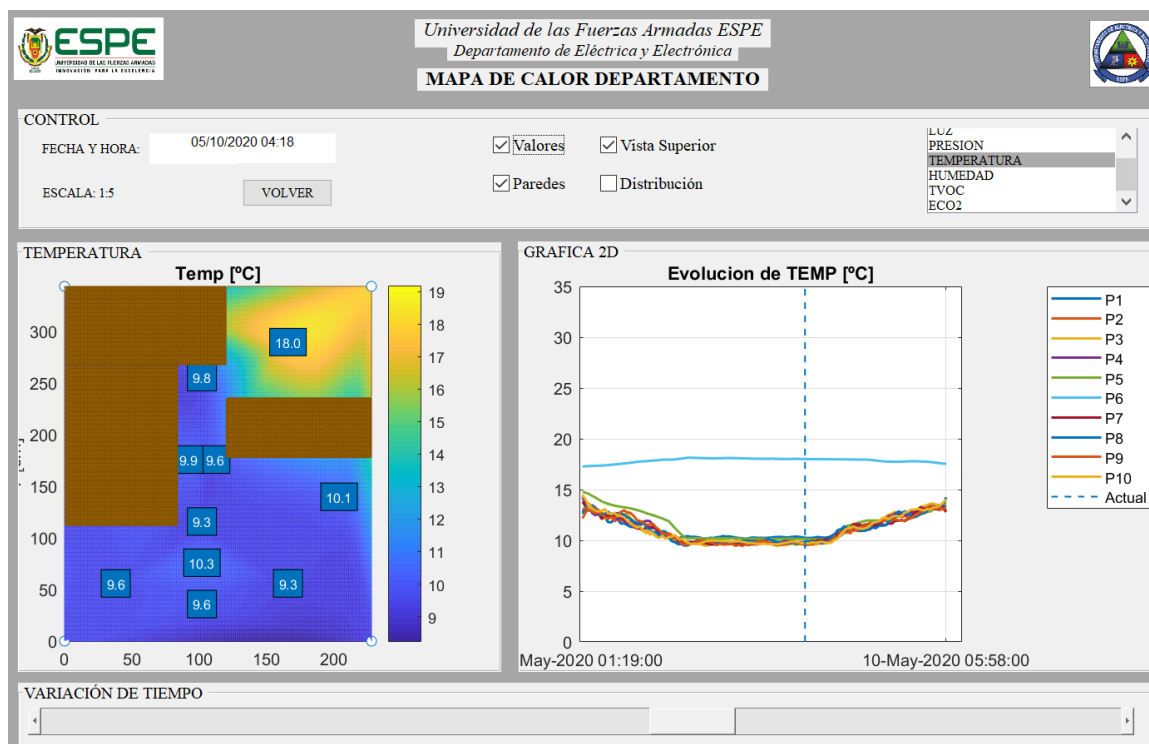
Descripción de la interfaz gráfica en Matlab.



En la Figura 61 se puede observar el funcionamiento de la interfaz, con datos reales de la evolución de Temperatura como ejemplo, adicionalmente se han marcado las casillas de “Valores”, “Vista Superior” y “Paredes” para una representación al estilo vista de planta del entorno de prueba.

Figura 61.

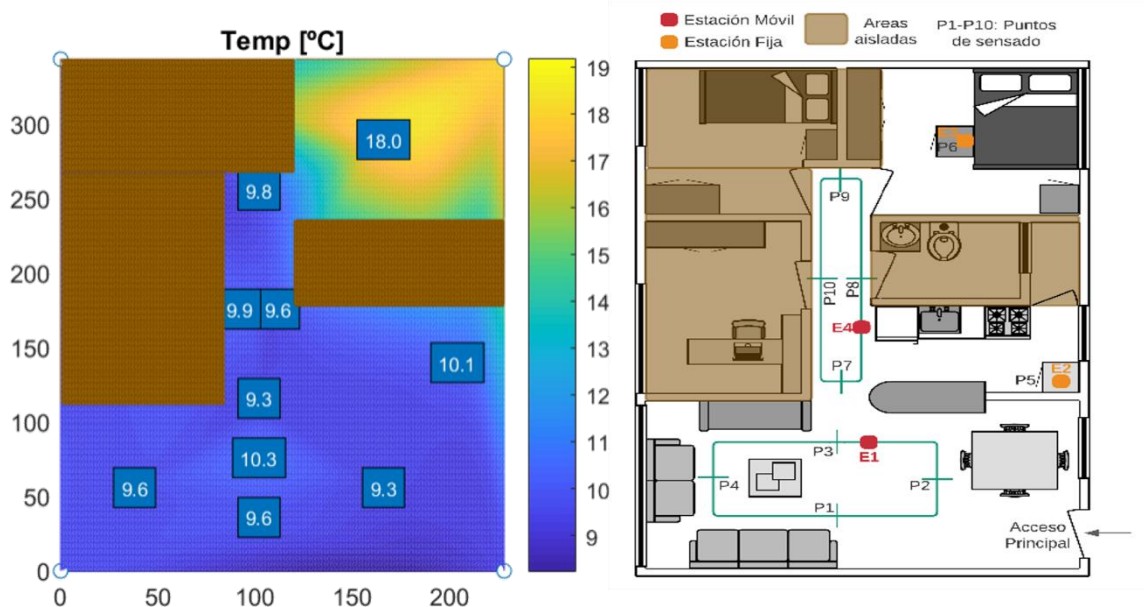
Interfaz de visualización de datos.



Finalmente, al seleccionar la casilla de “Distribución” se despliega una figura detallando la distribución física del entorno de sensado. En la Figura 62 se indica la distribución física del entorno de prueba en relación con el mapa de calor de la variable seleccionada.

Figura 62.

Mapa de calor VS Distribución física del entorno.



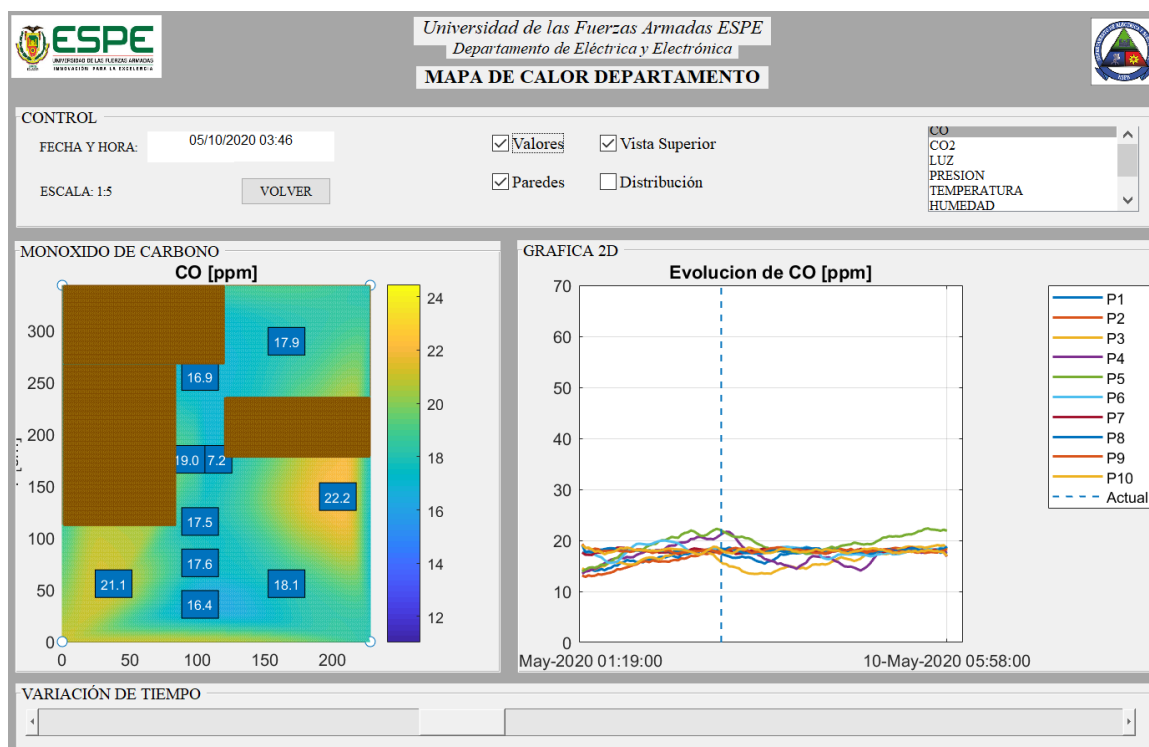
Pruebas y Resultados

Una vez definido el funcionamiento del sistema de monitoreo y descrito el entorno de pruebas, se procede a realizar la prueba de funcionamiento, en el cual se selecciona un periodo de 7 horas de duración. El sistema empieza su operación con la activación del interruptor de inicio presente en la interfaz de usuario implementada en el servidor virtual (Node-red). Inicialmente las plataformas robóticas con las estaciones E1 y E4 se ubican en los puntos P1 y P7 de su respectivo circuito. Cuando se activa el sistema, las plataformas fijas se sincronizan con las plataformas móviles para realizar la toma de datos en cada punto de la trayectoria seguida por las plataformas móviles. Cada vez que las plataformas móviles completan una vuelta al circuito y regresan a la posición inicial, inician un período de descanso de 5 minutos antes de empezar un nuevo ciclo de sensado. Como consideración adicional, se mantuvieron todas las ventanas del departamento cerradas durante toda la prueba.

Luego de culminar el periodo de prueba, se procede a extraer los datos almacenados en la base de datos para su análisis en la interfaz de Matlab, obteniendo los siguientes resultados para las concentraciones de CO, CO₂ y TVOC. En la Figura 63 se muestra que la concentración de CO se mantiene en un promedio de 19ppm, ubicándose en el límite de una concentración “Buena” según ASHRAE como se indica en la Tabla 3. Por otra parte, se observa que los niveles de CO presentan valores por encima del promedio en el área de la Cocina (P5) llegando a un máximo de 22.2ppm, presumiblemente por su cercanía con la cocina y tanque de gas.

Figura 63.

Concentración de CO, Prueba en Departamento.

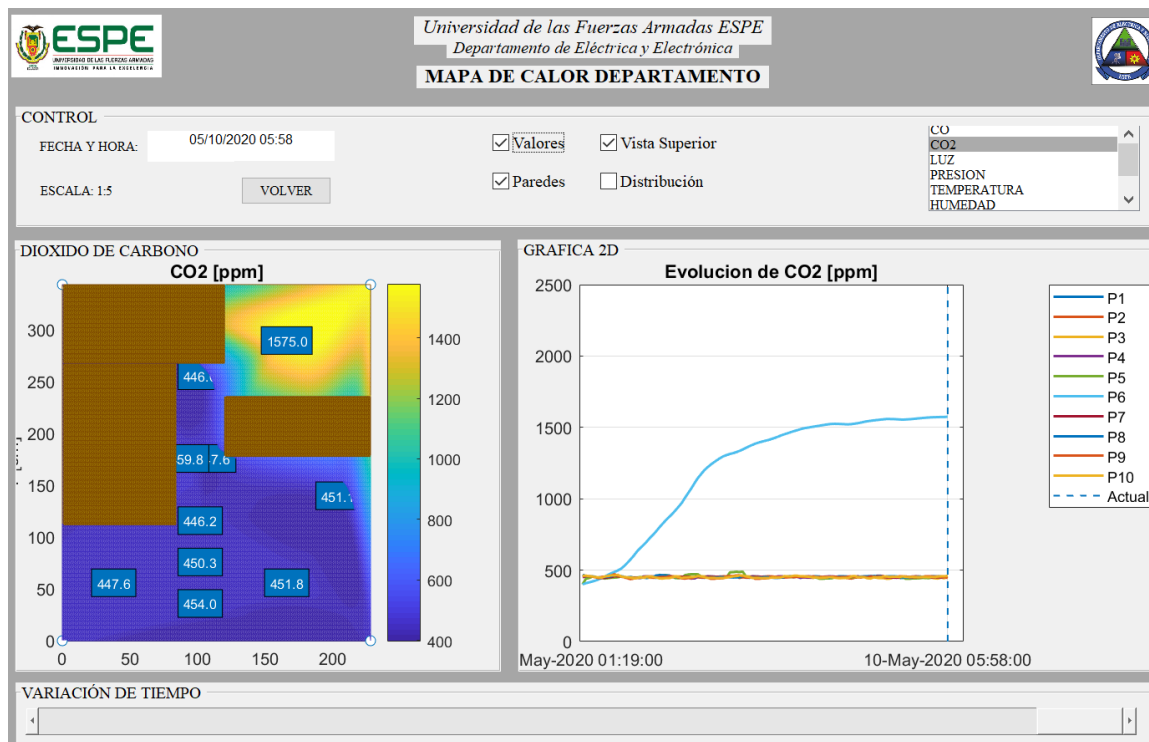


En cuanto al Dióxido de Carbono, se obtuvo una variación considerable de la concentración de este gas en la habitación principal, cabe destacar que en la habitación principal (P6) se encontraba presente una persona durante todo el período de prueba. En la Figura 64 se puede observar que la concentración aumenta considerablemente

llegando a un máximo de 1575ppm, ubicándose en un estado “Peligroso” de la calidad de aire según la Tabla 3.

Figura 64.

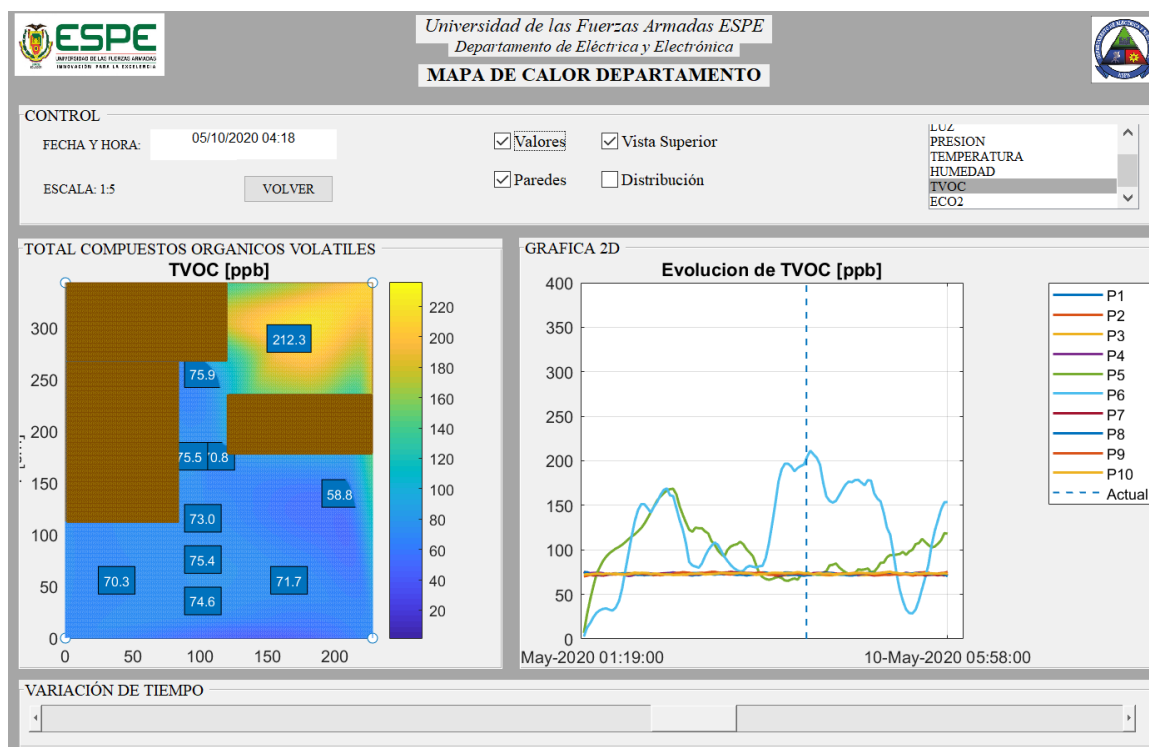
Concentración de CO₂, Prueba en Departamento.



Los resultados de la calidad de aire presentados en la Figura 65 muestran un comportamiento bastante estable en el área de la sala y el comedor manteniéndose en un valor promedio de 72 ppb, mientras que en el área de la cocina y el dormitorio se presentaron variaciones en las medidas, llegando a un pico de 212 ppb. Estos valores se mantienen dentro del rango “Moderado” (90-261 ppb) de calidad del aire en relación a compuestos orgánicos volátiles.

Figura 65.

Concentración TVOC, Prueba en Departamento.

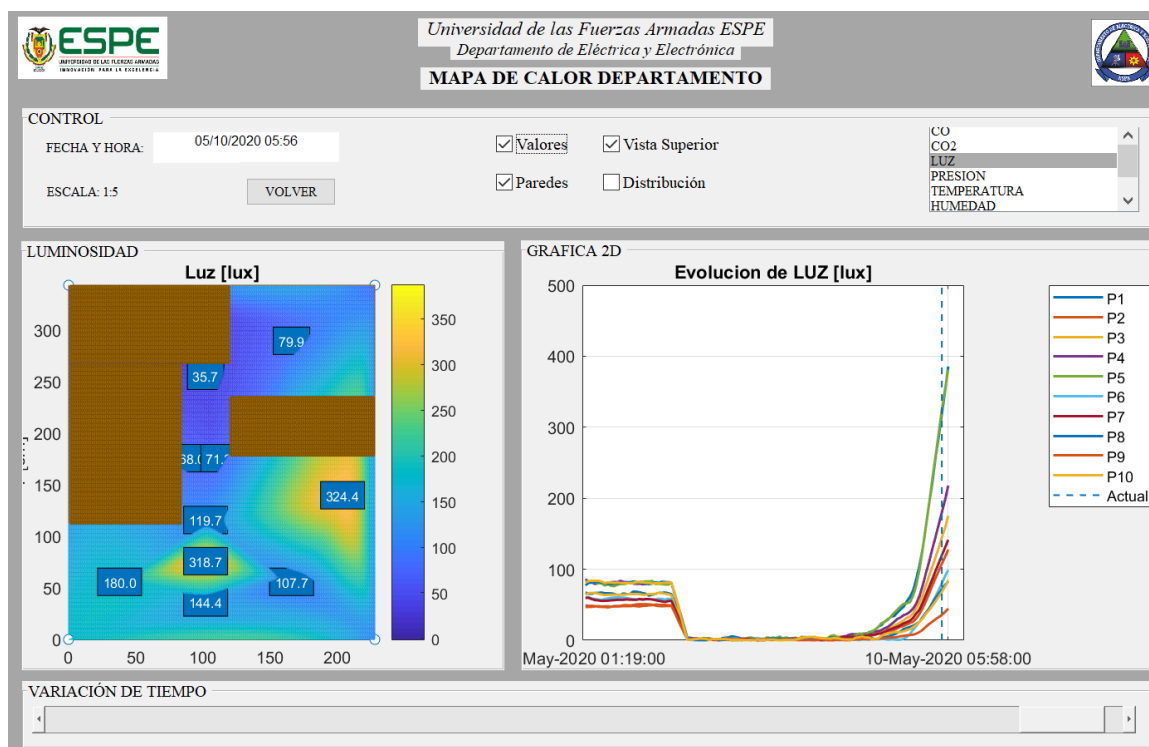


En cuanto a las variables de condiciones ambientales, se puede observar que la Presión y Humedad Relativa no presentan variaciones considerables, manteniéndose en 72kPa y 55% respectivamente. Por otra parte, la Temperatura varió entre 15 °C y 10 °C en todo el departamento, a excepción del dormitorio principal, donde se mantuvo en un promedio de 19 °C.

Finalmente, los datos de Luminosidad muestran una variación que permite identificar el momento en que se apagaron las luces del departamento, para luego mantenerse en un valor de 0 lux hasta que empiezan a incrementar a medida que amanece. En la Figura 66, se observan los datos de luminosidad y se destaca que la plataforma multisensado ubicada en la cocina cerca de una ventana, midió los datos más altos de luminosidad.

Figura 66.

Concentración de LUZ, Prueba en Departamento.



En resumen, en la Tabla 24 se muestran las concentraciones máximas de las variables de estudio durante toda la prueba.

Tabla 24.

Resumen de las concentraciones máximas obtenidas durante la prueba del departamento.

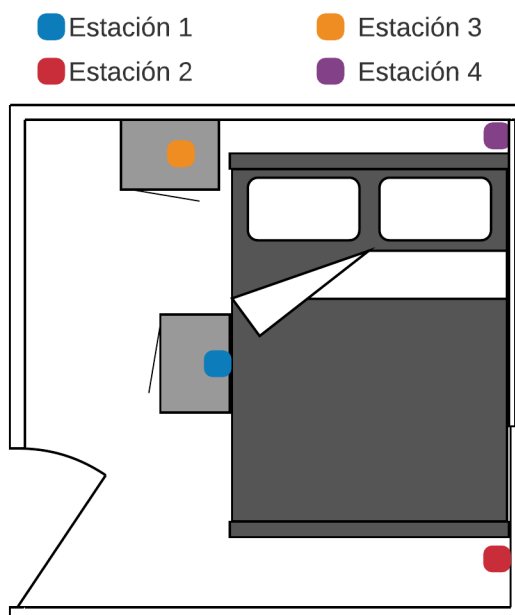
Estación	Ubicación	CO [ppm]	CO ₂ [ppm]	TVOC [ppb]	LUZ [lux]	PRESION [kPa]	TEMP [°C]	HUM [%]
E1-P1	Parte inferior de la sala	16	454.0	72.6	175.3	72.3	13.7	52.4
E1-P2	Comedor	17.2	451.8	73.7	127.7	72.3	12.8	51.7
E1-P3	Parte superior de la sala	17.5	450.3	72.5	217.7	72.4	13.5	52.3
E1-P4	Centro de la sala	22.0	447.6	75.4	385.5	72.4	14.2	53.0
E2-P5	Cocina	22.2	623.2	168.3	381.3	72.4	13.6	56.4
E3-P6	Dormitorio principal	18.6	1575	234.6	98.8	72.4	18.0	54.3
E4-P7	Parte inferior del pasillo	18.1	446.2	74.9	141.6	72.4	12.9	51.6

Estación	Ubicación	CO	CO ₂	TVOC	LUZ	PRESION	TEMP	HUM
		[ppm]	[ppm]	[ppb]	[lux]	[kPa]	[°C]	[%]
E4-P8	Parte central del pasillo	18.4	447.6	72.0	82.6	72.3	14.2	52.5
E4-P9	Fuera de la habitación principal	17.5	446.0	74.0	44.6	72.3	13.2	52.5
E4-P10	Parte central del pasillo	18.8	459.8	72.6	84.6	72.3	14.1	52.9

Luego de realizar el análisis de la calidad de aire y condiciones ambientales del departamento, se observa que la mayor actividad se produce dentro el dormitorio principal, por lo que se realiza un estudio dentro del dormitorio con el objetivo de identificar la distribución más detallada de la calidad de aire. Debido a las dimensiones del dormitorio se establecen cuatro puntos de medición, configurando las plataformas robóticas para trabajar como estaciones fijas, tal como se muestra en la Figura 67.

Figura 67.

Distribución de las plataformas multisensado dentro del entorno de prueba 2.

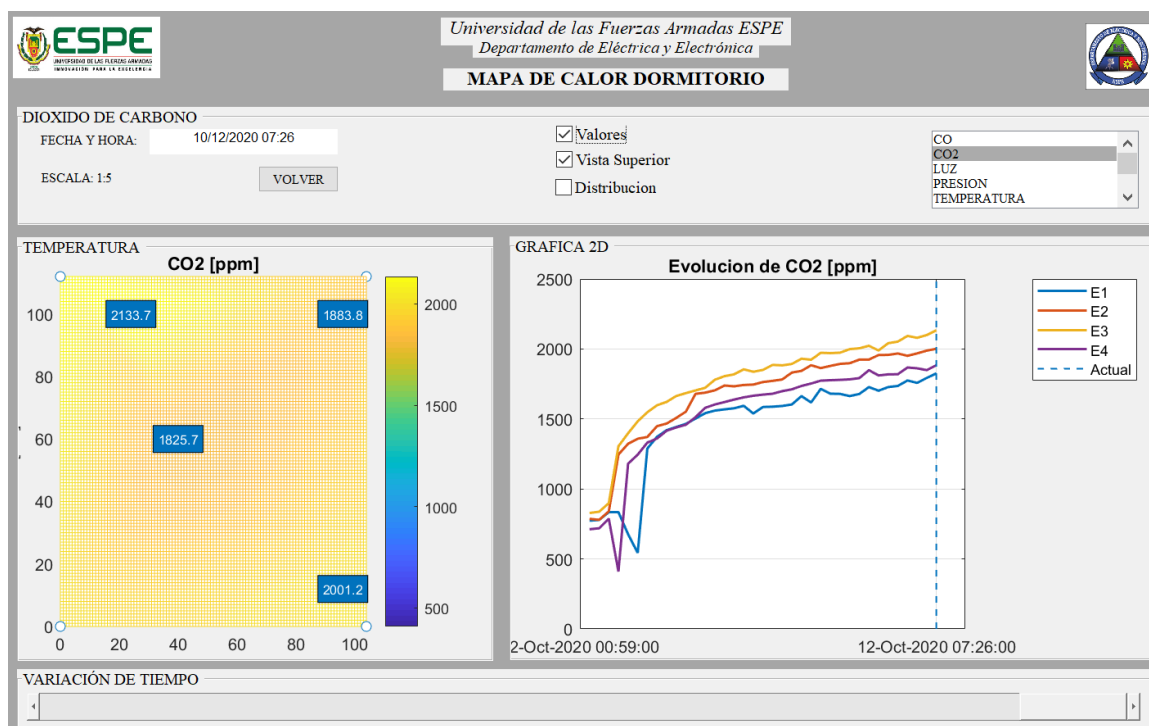


Para efectuar la toma de datos en este entorno, se selecciona un periodo de 7 horas de duración, durante ese periodo se mantuvieron puertas y ventanas cerradas. El

sistema empieza su operación a través del interruptor de la interfaz de Node-red, con la diferencia que cada estación multisensado representa un punto de sensado dentro del entorno. En cuanto a la concentración de CO se mantiene dentro del rango “Bueno”, a diferencia del CO₂ cuyas concentraciones se muestran en la Figura 68, y se observa que los datos sensados por la Estación 3 son mayores durante toda la prueba, llegando a un valor de concentración máximo de 2133 ppm, situándose en el rango “Peligroso”.

Figura 68.

Concentración de CO₂ Prueba en Dormitorio Principal.



En cuanto al resto de variables sensadas, en la Tabla 25 se muestra un resumen de las concentraciones máximas detectadas por cada estación.

Tabla 25.

Resumen de las concentraciones máximas obtenidas durante la prueba en el dormitorio principal.

Estación	Ubicación	CO [ppm]	CO₂ [ppm]	TVOC [ppb]	LUZ [lux]	PRESION [kPa]	TEMP [°C]	HUM [%]
E1	Al pie de la cama	14.6	1825.7	220.0	17.6	72.2	22.1	64.1
E2	Centro de la habitación	11.1	2001.2	170.3	27.2	72.5	20.1	64.8
E3	Cabecera de la cama	17.2	2133.7	238.5	23.1	72.4	18.8	62.7
E4	Cabecera de la cama	15.5	1883.8	243.9	16.1	72.1	20.1	71.9

Capítulo VI

Conclusiones y Recomendaciones

En el trabajo de investigación desarrollado se implementó una red de sensores inalámbricos fijos y móviles con el objetivo de realizar la monitorización de la calidad del aire y condiciones ambientales en espacios interiores. Para lograr este objetivo, se realizaron dos estudios bibliográficos. El primer estudio se enfoca en determinar las principales variables que afectan a las condiciones ambientales y la calidad del aire en estos entornos. En cuanto a la calidad del aire se seleccionó al CO₂, CO y TVOC, mientras que para las condiciones ambientales se seleccionaron la Humedad, Temperatura, Presión y Luminosidad como variables de estudio. Las variables seleccionadas fueron determinadas, no por su efecto individual en el entorno, sino por la sensación y síntomas que generan cuando se combinan en diferentes concentraciones.

El segundo estudio bibliográfico fue sobre el estado del arte de los sistemas de medición de la calidad del aire, del cual se determinó que la mejor forma de representar la distribución de las variables en un entorno interior es mediante la implementación de redes de sensores, por lo que se decidió implementar una red compuesta por cuatro estaciones. Adicionalmente, con el objetivo de tener una mayor cobertura de sensado y optimizar el uso de recursos se decidió acoplar dos plataformas multisensado en plataformas robóticas las cuales siguen una trayectoria predefinida, deteniéndose en puntos específicos para la toma de datos.

Una vez comprobado el funcionamiento de las plataformas multisensado, se configuró la red inalámbrica para que toda la información de la calidad del aire recolectada por las plataformas multisensado pueda ser recopilada, para su almacenamiento y presentación en un servidor remoto. Mediante una interfaz de usuario implementada en el servidor se puede administrar la operación y estado de cada nodo en la red para una

ejecución correcta y sincronizada en un periodo de prueba definido. Una vez terminadas las pruebas se extraen los datos almacenados para ser analizados con mayor detalle fuera de línea.

Diseño de la Plataforma Multisensado

Para el diseño de las plataformas multisensado se realizó la selección de los sensores adecuados para la medición de las variables de calidad del aire y condiciones ambientales. En base a la investigación bibliográfica realizada, para las variables químicas se seleccionaron sensores de tipo óptico y de óxido metálico. En particular, para el CO se seleccionó el sensor MQ-7, debido a que este sensor presenta mayor sensibilidad a este gas en particular. En cuanto a la medición de TVOC se seleccionó al sensor SGP30 el cual presenta una respuesta del total de componentes orgánicos volátiles TVOC. Finalmente, para la medición de CO₂ se seleccionó el sensor de tipo óptico Analog Infrared CO₂ Sensor, que trabaja con luz infrarroja no dispersiva. Para la medición de las variables de condiciones ambientales como Luminosidad, Presión, Temperatura y Humedad se seleccionaron sensores convencionales de la empresa Adafruit. De los sensores seleccionados, el MQ-7, destinado a medir el monóxido de carbono, requirió de una etapa de instrumentación adecuada para cumplir con las condiciones de funcionamiento indicadas por el fabricante, siendo necesario el establecimiento de periodos de operación del sensor a diferentes niveles de tensión. Para este tipo de sensores es muy necesario realizar la calibración del sensor, el cual fue sometido varias pruebas de laboratorio en las que se expuso al sensor ante diferentes niveles conocidos de concentración del químico, obteniendo así datos que permitieron determinar la curva característica de la respuesta del sensor obteniendo medidas con una alta precisión.

Debido a que los sensores de tipo óxido metálico son propensos a almacenar residuos del químico, provocando perturbaciones en la medida, se estudiaron diferentes sistemas de ventilación y limpieza que permitan excitar a los sensores de manera óptima y remover cualquier partícula adherida. El sistema de ventilación consiste en un contenedor que permite controlar el flujo de aire, en donde se ubican a los sensores de tipo MOX. Para este estudio se implementaron dos sistemas de ventilación, utilizando dos materiales para la construcción del contenedor, uno en acrílico y otro en acero inoxidable. El sistema trabaja en tres etapas, la primera es la de flujo de aire para la limpieza de los sensores, en la segunda etapa se realiza el ingreso del químico a medir, y finalmente en la tercera etapa se realiza la lectura de los sensores. En cada uno de los sistemas se realizaron pruebas utilizando un filtro de aire para la limpieza de los sensores. Como resultado tras realizar pruebas en un entorno controlado se determinó que la diferencia entre las medidas del sistema en acero inoxidable y el sistema en acrílico no presentaron diferencias considerables. Sin embargo, en pruebas a largo plazo y dependiendo de las concentraciones expuestas en los contenedores, el sistema con contenedor de acero inoxidable sería el más adecuado debido a que este material no mantiene las partículas de los gases. En cuanto al uso del filtro, se observó que el flujo de aire a través de este para la limpieza de los sensores dio como resultado una velocidad limpieza más rápida de estos, sin embargo, realizando la limpieza de los sensores con un flujo de aire sin el uso del filtro, es decir con un flujo de aire medioambiental la velocidad de limpieza disminuyó. Aunque los resultados de las mediciones en el periodo de limpieza indicaron que el filtro realizaba un mejor trabajo, durante el periodo de muestreo los resultados fueron similares en ambos sistemas, como se indica en la sección 0. En función a todas las pruebas realizadas, se decidió trabajar con el sistema de acrílico y sin filtro de aire ya que presentaba diferencias mínimas con los otros sistemas por ser el sistema más económico, compacto y menos complejo de construir.

Una vez seleccionado el sistema de ventilación e instrumentación adecuados para los diferentes sensores, se diseñó la placa de control para la integración de todos los componentes. Esta placa se diseñó tomando en cuenta los requerimientos de energía de los diferentes sensores y actuadores del sistema para una distribución adecuada, minimizando las interferencias entre señales digitales de alta frecuencia y señales analógicas de baja frecuencia. Además, tomando en cuenta el alto consumo de corriente de los sensores de tipo MOX, fue necesario el diseño de un sistema de alimentación adecuado que permita cubrir las necesidades de energía hacia cada componente del sistema para una operación ininterrumpida por largos periodos de tiempo. Por otra parte, para disminuir posibles pérdidas de información y perturbaciones adicionales se recomienda emplear sensores con acondicionamientos adecuados y que tengan métodos de comunicación digital como I²C que reduce el número de conexiones en el sistema. En el desarrollo de este proyecto se emplearon un total de 24 sensores, 20 sensores digitales con comunicación I²C, 4 sensores tipo MOX analógicos, y 4 sensores ópticos con comunicación UART distribuidos en cuatro plataformas multisensado. La implementación de estas estaciones demostró resultados con alta confiabilidad y precisión validando el correcto diseño de las placas de control.

Plataformas Robóticas

Con el objetivo de maximizar el área cubierta por las plataformas multisensado, y optimizar recursos al utilizar menos plataformas de medición, se decidió la implementación de plataformas robóticas móviles. Estas plataformas se construyeron a partir de un robot móvil de doble tracción, sobre el cual se acopló una estructura metálica diseñada de tal manera que permita la medición de la calidad del aire y condiciones ambientales a una altura de 95 cm, que es la altura en las personas pasan la mayoría del tiempo en entornos interiores, ya sea sentados o acostados. Las plataformas robóticas fueron diseñadas para recorrer trayectorias predefinidas, deteniéndose en ubicaciones específicas para el registro de datos. Debido a la altura de la estructura, se modificó la

base del robot para mejorar su estabilidad en curvas, implementando una configuración diferencial de tracción únicamente trasera. En cuanto al método de orientación y desplazamiento del robot, se realizó un estudio bibliográfico, determinando que el método de seguidor de línea era el más adecuado por los requerimientos del sistema debido a que se la necesidad del robot era realizar un desplazamiento sencillo, pero preciso un posicionamiento en puntos específicos dentro de una trayectoria predefinida.

El control del desplazamiento de la plataforma inicialmente fue de tipo proporcional, sin embargo, al añadir la estructura metálica se modificó drásticamente el comportamiento la planta, haciendo que el robot se vuelva muy inestabl. Lo cual fue corregido al añadir una parte derivativa al controlador proporcional inicial para la corrección de los sobreimpulsos generados principalmente en las curvas. Es importante recalcar que un factor importante en el desplazamiento de la plataforma fue el agarre de las ruedas con el suelo, por lo que fue necesario su recubrimiento con bandas elásticas que eviten el deslizamiento de las ruedas. En relación con la estructura metálica, se recomienda que en trabajos futuros sea posible modificar la altura en la que se ubica la plataforma multisensado, permitiendo así realizar mediciones a diferentes alturas, obteniendo la capacidad de realizar análisis no solo en 2D, sino que también en 3D.

Otro aspecto importante para considerar en el diseño de las plataformas robóticas fue la autonomía de estas. Debido a que al acoplar la estructura metálica y los componentes del sistema de medición su peso aumentó considerablemente, por lo que los motores encargados de su desplazamiento realizaban un mayor esfuerzo para mover la estación, llegando a calentarse. Por esta razón se tuvo que implementar un banco de baterías con la energía suficiente para alimentar a las plataformas durante periodos de más de 6 horas. Aunque las plataformas no estuvieron activas durante todo el tiempo ya que tuvieron periodos de descanso destinados al enfriamiento de los motores y ahorro de

energía, los motores utilizados tuvieron un alto consumo energético para lograr un desplazamiento a una velocidad constante. Es por esto que para trabajos futuros se recomienda realizar un estudio para la selección de motores más adecuados para un consumo energético óptimo. Adicional, se recomienda el análisis del diseño de las dimensiones del robot ya que pueden ser mejoradas aumentando el área de superficie de la base haciéndolo más estable y dando mayor espacio para la implementación de motores más grandes y eficientes.

Configuración de Red

La configuración de la red de sensores fue realizada estableciendo un nodo servidor y cuatro nodos de medición representados por las plataformas multisensado fijas y móviles. Estos nodos de medición se conectan vía Wi-Fi mediante un router con el nodo servidor para la transmisión de datos y sincronización de funcionamiento. El nodo servidor consiste en un servidor remoto, configurado en la nube del proveedor de servicios digitales DigitalOcean cuya configuración permite la agregación de servicios y una descentralización del servidor respecto a la ubicación de los nodos de medición. El intercambio de información entre los nodos de medición y el servidor se realizó utilizando el protocolo de comunicación MQTT, debido a su gran presencia en los sistemas del Internet de las Cosas, y su facilidad de ser implementado dentro de los controladores de cada nodo. Este protocolo, con topología de estrella y de tipo cliente-servidor opera mediante un sistema de publicador-suscriptor, lo que permite establecer comunicaciones de uno a uno, o de muchos a muchos, haciendo que el sistema sea altamente escalable. La implementación de este protocolo de comunicación demostró ser altamente eficiente al organizar los mensajes entre los nodos mediante un sistema jerárquico basado en tópicos. Esta implementación permitió ordenar adecuadamente todos los mensajes provenientes de los nodos de medición para diferenciar su origen y propósito para el correcto funcionamiento de la red.

En cada plataforma multisensado la implementación de la tarjeta de desarrollo ESP32 como controlador permitió ejecutar diferentes procesos de forma simultánea debido a su arquitectura de doble núcleo y sistema operativo en tiempo real Free-RTOS. De esta forma se

separó la ejecución de los diferentes procesos en cada estación encargados del control de diferentes tareas. En el primer núcleo del controlador se implementaron los procesos encargados de la comunicación de la red, un proceso dedicado a la conexión Wi-Fi y otro encargado a la conexión MQTT. En el segundo núcleo del controlador se ejecutan los procesos de medición y recolección de información de estado de la plataforma. Como resultado de la implementación de la red Wi-Fi, fue posible la implementación del servicio OTA en los controladores ESP32, que permite la actualización de la versión del programa del controlador a nuevas versiones de forma inalámbrica y masiva. Esta implementación representó un ahorro de tiempo significativo al prescindir de conexiones físicas de forma manual e individual para realizar las actualizaciones.

Para controlar la operación de los nodos en la red se implementó una interfaz de usuario en el nodo servidor. Esta interfaz, desarrollada en la herramienta Node-red se encarga de controlar el inicio o paro de los nodos de medición enviando comandos de activación vía MQTT a todas las plataformas multisensado. Adicionalmente, se encarga de la recepción y distribución de los datos recolectados por los nodos de medición y de dar formato a esta información para su almacenamiento en una base de datos. La implementación de esta interfaz simplificó en gran medida el proceso de almacenamiento de datos, al contener bloques especializados en el formato que se requería para el ingreso de la información en la base de datos, sin embargo, su interfaz gráfica para la presentación de los datos no era la más completa, por lo que no se pudo realizar un procesamiento de la información en tiempo real y se tuvo que realizar de forma offline en una interfaz desarrollada en Matlab. Por esta razón se recomienda el análisis de otras aplicaciones con prestaciones similares, pero que permitan mejorar la presentación de los datos, permitiendo analizarlos en tiempo real, dando apertura a la implementación de estrategias de control en función de la información recolectada.

Pruebas y Análisis de Resultados

Para realizar las pruebas de funcionamiento del sistema en los entornos descritos en la sección 0, en donde se mantuvieron puertas y ventanas cerradas, condiciones que el habitante mantenía habitualmente en su día a día. Obteniendo como resultado concentraciones de las variables medias dentro de un rango normal en su mayoría, con valores de condiciones ambientales como Temperatura de 19°C, Humedad Relativa del 55%, Presión constante de 72.4kPa. En cuanto a las variables químicas, tanto el CO, como TVOC se mantuvieron en valores normales, llegando a picos de CO de 22.2 ppm y de TVOC de 234.6 ppb, mientras que los valores de CO₂ presentaron un aumento considerable de la concentración, específicamente en el área del dormitorio, lugar donde permaneció un habitante durante el periodo de prueba, llegando a valores pico de CO₂ de 1575 ppm ubicando a este valor en un rango de concentración peligroso para la salud. Estos resultados demostraron que la ventilación del entorno es un factor clave. El habitante del departamento mencionó que después de mejorar la ventilación de su dormitorio abriendo las ventanas mejoró no solo su estado de ánimo sino también su percepción de la calidad del suyo al despertar el siguiente día.

En vista de que la información más relevante obtenida en el análisis del primer entorno de sensado fue la concentración de CO₂ dentro del dormitorio principal debido a la actividad humana, se realizó una prueba más detallada dentro de la habitación, configurando cuatro nuevas ubicaciones para las plataformas multisensado. En el caso de las plataformas robóticas se las configuró para funcionar como estaciones fijas. En cuanto a las condiciones ambientales se obtuvieron concentraciones dentro de rangos aceptables para cada variable, llegando a recolectar valores máximos de 27.2 lux de luz, un valor constante de 72.2 kPa de presión, 71.9 % de humedad relativa y 22.1°C de temperatura. Por otra parte, los valores correspondientes a CO y TVOC se mantuvieron

en concentraciones aceptables, cuyos picos máximos son 17.2 ppm y 243.9 ppb respectivamente, lo cual no sucedió con el CO₂, puesto que se obtuvieron concentraciones consideradas de riesgo, de las cuales las estaciones situadas cerca del espaldar de la cama recolectaron mayores concentraciones de este gas, alcanzado picos de 2133.7 ppm y 2001.2 ppm respectivamente, valores que pueden ser perjudiciales para la salud si se mantienen por más de 8 horas.

Finalmente, el sistema implementado en este proyecto permite un despliegue fácil y rápido en diversos entornos de prueba, esto se debe gracias a la autonomía que presentan las plataformas multisensado. Teniendo como único requisito, la definición de las trayectorias a seguir por parte de las plataformas móviles, y de una conexión Wi-Fi, teniendo la posibilidad de prescindir de una conexión a internet, ya que el nodo servidor puede ser implementado de forma local, aunque su implementación en la nube represente ventajas en relación con un servidor local. Se recomienda que para trabajos futuros se realicen pruebas en espacios más amplios y con mayor actividad humana, como laboratorios, aulas de clase, oficinas, etc., permitiendo explotar todo el potencial de este sistema de monitorización de la calidad del aire condiciones ambientales en entornos interiores.

Referencias Bibliográficas

- Adafruit Industries, A. (n.d.). *Adafruit SGP30 Air Quality Sensor Breakout - TVOC and eCO2*. Retrieved November 25, 2020, from <https://www.adafruit.com/product/3709>
- Adafruit Industries, A. (2016). *Adafruit Si7021 Temperature & Humidity Sensor Breakout Board*. <https://www.adafruit.com/product/3251>
- Adafruit Industries, A. (2018). *Adafruit VEML7700 Lux Sensor - Adafruit Industries*. <https://www.adafruit.com/product/4162>
- Adafruit Industries, A. (2020). *MPL115A2 - I2C Barometric Pressure/Temperature Sensor*. <https://www.adafruit.com/product/992>
- Airgas. (n.d.). *Airgas - X05NI83CP5875D8 - 20PPM Hydrogen Sulfide, 60PPM Carbon Monoxide, 1.45% Methane, 15% Oxygen Balance Nitrogen Certified Standard Mixture, Size 58 Disposable Aluminum Cylinder, CGA-C10*. Retrieved February 11, 2021, from <https://www.airgas.com/product/Gases/Mixed-Gases/p/X05NI83CP5875D8>
- Araki, M. (1996). *CONTROL SYSTEMS, ROBOTICS AND AUTOMATION* (Vol. 2). [https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=RF1xDAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA58&dq=pid+trial+and+error+method&ots=zB_3wnALjl&sig=9mVSomquEsYd2CK8tNbbv6QB3AE&redir_esc=y#v=onepage&q=pid trial and error method&f=false](https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=RF1xDAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA58&dq=pid+trial+and+error+method&ots=zB_3wnALjl&sig=9mVSomquEsYd2CK8tNbbv6QB3AE&redir_esc=y#v=onepage&q=pid%20trial%20and%20error%20method&f=false)
- Autosolar Energy Solutions SLU. (2015). *¿Cómo calcular la capacidad de las baterías?* <https://autosolar.es/blog/aspectos-tecnicos/como-calcular-la-capacidad-de-las-baterias>

- Bakó-Biró, Z., Wargocki, P., Weschler, C. J., & Fanger, P. O. (2004). Effects of pollution from personal computers on perceived air quality, SBS symptoms and productivity in offices. *Indoor Air*, 14(3), 178–187. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00218.x>
- Bartual, J., Doctor, S., Ciencias, E., M^a, Q., & Subils, J. B. (1987). *NTP 607: Guías de calidad de aire interior: contaminantes químicos*.
- Blanxart, A. F. (n.d.). *NTP 463: Exposición a fibras de amianto en ambientes interiores*.
- Bruce, N., Perez-Padilla, R., & Albalak, R. (2000). Indoor air pollution in developing countries: A major environmental and public health challenge. *Bulletin of the World Health Organization*, 78(9), 1078–1092. <https://doi.org/10.1590/S0042-96862000000900004>
- Burger, H. (1990). Bioaerosols: Prevalence and health effects in the indoor environment. *The Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 86(5), 687–701. [https://doi.org/10.1016/S0091-6749\(05\)80170-8](https://doi.org/10.1016/S0091-6749(05)80170-8)
- Carazo Fernández, L., Fernández Alvarez, R., González-Barcala, F. J., & Rodríguez Portal, J. A. (2013). Contaminación del aire interior y su impacto en la patología respiratoria. *Archivos de Bronconeumología*, 49(1), 22–27. <https://doi.org/10.1016/j.arbres.2012.04.005>
- CLIMAX. (2016). *FILTRO 757-N ABEK1*. <https://static.shop033.com/resources/7A/890/Other/FILTRO757-N-ABEK.pdf>

- Cretescu, I., Lutic, D., & Manea, L. R. (2017). Electrochemical Sensors for Monitoring of Indoor and Outdoor Air Pollution. In *Electrochemical Sensors Technology*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.68512>
- Dahl, L. R. (2020). *Node-RED*. <https://nodered.org/>
- DFRobot. (2018). Gravity: Analog Infrared CO2 Sensor For Arduino (0~5000 ppm). *DFRobot*. https://wiki.dfrobot.com/Gravity__Analog_Infrared_CO2_Sensor_For_Arduino_SKU__SEN0219
- Dhingra, S., Madda, R. B., Gandomi, A. H., Patan, R., & Daneshmand, M. (2019). Internet of things mobile-air pollution monitoring system (IoT-Mobair). *IEEE Internet of Things Journal*, 6(3), 5577–5584. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2903821>
- Digital Ocean. (2020). *DigitalOcean – The developer cloud*. <https://www.digitalocean.com/>
- espressif.com. (2020). *ESP32 Wi-Fi & Bluetooth MCU | Espressif Systems*. <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>
- Ha, Q. P., Metia, S., & Phung, M. D. (2020). Sensing Data Fusion for Enhanced Indoor Air Quality Monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 20(8), 4430–4441. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2964396>
- Hanwei Electronics. (2016). *MQ-7 Gas Sensor Datasheet (Vol. 1)*. <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Biometric/MQ-7.pdf>
- Hellisheiðarvirkjun. (n.d.). *Geothermal Exhibition at Hellisheiðarvirkjun*. Retrieved January 6, 2021, from <https://www.south.is/en/services/on-power>

- Hu, J., Edsinger, A., Lim, Y. J., Donaldson, N., Solano, M., Solochech, A., & Marchessault, R. (2011). An advanced medical robotic system augmenting healthcare capabilities - Robotic nursing assistant. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 6264–6269. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2011.5980213>
- Hu, Z., Cong, S., Song, T., Bian, K., & Song, L. (2020). AirScope: Mobile Robots-Assisted Cooperative Indoor Air Quality Sensing by Distributed Deep Reinforcement Learning. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(9), 9189–9200. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3004339>
- iRobot. (2018). *iRobot Robot Aspirador*. https://tienda.irobot.es/es/irobot-roomba-606/R606040.html?lang=es_ES&cgid=es
- Isidro Montes, I., Abu Shams, K., Alday, E., Carretero Sastre, J. L., Ferrer Sancho, J., Freixa Blanxart, A., Monsó Molas, E., Pascal Martínez, I., Rodríguez Becerra, E., & Rodríguez Panadero, F. (2005). Guidelines on asbestos-related pleuropulmonary disease. *Archivos de Bronconeumología*, 41(3), 153–168. <https://doi.org/10.1157/13071586>
- ISO. (2016). ISO/IEC 20922:2016 - Information Technology - Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) v3.1.1. *International Organization for Standardization*, 73. <https://www.iso.org/standard/69466.html>
- Kim, J. Y., Chu, C. H., & Shin, S. M. (2014). ISSAQ: An integrated sensing systems for real-time indoor air quality monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 14(12), 4230–4244. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2359832>

- Maynard, R., Krzyzanowski, M., Vilahur, N., Héroux, M.-E., & Europa, W. R. für. (2017). Evolution of WHO air quality guidelines: past, present and future. In *WHO Regional Office for Europe*. <http://www.euro.who.int/pubrequest>
- Mosquitto. (2018). *Eclipse Mosquitto*. Eclipse Mosquitto. <https://mosquitto.org/>
- MQTT. (n.d.). *MQTT: The Standard for IoT Messaging*. Mqtt.Org. Retrieved March 4, 2021, from <https://mqtt.org/>
- Netatmo. (2018). *Estación Meteorológica Wifi Inteligente*. <https://www.netatmo.com/es-es/weather/weatherstation>
- Neumann, P. P., Hirschberger, P., Baurzhan, Z., Tiebe, C., Hofmann, M., Hullmann, D., & Bartholmai, M. (2019, May 1). Indoor Air Quality Monitoring using flying Nanobots: Design and Experimental Study. *ISOEN 2019 - 18th International Symposium on Olfaction and Electronic Nose, Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/ISOEN.2019.8823496>
- Newentor. (2020, December 17). *Newentor Weather Station Wireless Indoor Outdoor Multiple Sensors*. <https://www.newentor.com/en/products/newentor-weather-station-wireless-indoor-outdoor-multiple-sensors>
- OMS. (2016). *Contaminación del aire de interiores y salud*. Contaminación Del Aire de Interiores y Salud. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>
- Pololu. (2001). *QTR-8A and QTR-8RC Reflectance Sensor Array User's Guide*. <http://www.pololu.com/docs/0J12/all>
- Pololu. (2019). *GitHub - pololu/qtr-sensors-arduino: Arduino library for the Pololu QTR reflectance sensors*. <https://github.com/pololu/qtr-sensors-arduino>

- Real Time Engineering Ltd. (2004). *FreeRTOS - Market leading RTOS (Real Time Operating System)*. <https://www.freertos.org/>.
<https://www.freertos.org/index.html>
- Rodriguez, Z., & Zurita, D. (2017). *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MECATRÓNICO PORTABLE CON DOPAJE AUTOMÁTICO PARA LA DETECCIÓN DE MUESTRAS EXPLOSIVAS*.
- Ruiz, I. (2013). *Principios Deteccion Gas-ISSGA*.
- Saad, S. M., Shakaff, A. Y. M., Saad, A. R. M., Yusof, A. M., Andrew, A. M., Zakaria, A., & Adom, A. H. (2017). Development of indoor environmental index: Air quality index and thermal comfort index. *AIP Conference Proceedings*, 1808. <https://doi.org/10.1063/1.4975276>
- Salvi, S., & Barnes DM, P. J. (2010). *Is Exposure to Biomass Smoke the Biggest Risk Factor for COPD Globally?* <https://doi.org/10.1378/chest.10-0645>
- Schaar, R. (2018). *Optical Sensors Designing the VEML7700 Into an Application*. www.vishay.com/doc?91000
- Semiconductors, N. (2017). *MPL115A2 Miniature I 2 C digital barometer, 50 to 115 kPa*.
- Semiconductors, V. (2005). *VEML7700 High Accuracy Ambient Light Sensor With I2C Interface*. Current. <https://www.vishay.com/docs/84286/veml7700.pdf>
- Sensirion. (2020). *Datasheet SGP30 - Indoor Air Quality Sensor for TVOC and CO2eq Measurements*. www.sensirion.com

- Spachos, P., & Hatzinakos, D. (2016). Real-Time Indoor Carbon Dioxide Monitoring Through Cognitive Wireless Sensor Networks. *IEEE Sensors Journal*, 16(2), 506–514. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2479647>
- SparkFun Motor Driver - Dual TB6612FNG (1A) - ROB-14451 - SparkFun Electronics. (2020). <https://www.sparkfun.com/products/14451>
- Steinemann, A. (2018). Fragranced consumer products: effects on asthmatics. *Air Quality, Atmosphere, & Health*, 11(1), 3–9. <https://doi.org/10.1007/s11869-017-0536-2>
- Stellman, J. M., & Solá, X. (1998). *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo* (3rd ed.). Ministerio de Trabajo y Seguridad Social.
- Su, J. H., Lee, C. S., Huang, H. H., Chuang, S. H., & Lin, C. Y. (2010). An intelligent line-following robot project for introductory robot courses. *World Transactions on Engineering and Technology Education*, 8(4), 455–461.
- Sundell, J. (2004). On the history of indoor air quality and health. *Indoor Air*, 14(s7), 51–58. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00273.x>
- Systems, E. (2018). *ESP-IDF Programming Guide latest documentation*. <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/system/freertos.html>
- Turanjanin, V., Vu Ci Cevi C, B., Jovanovi, M., Mirkov, N., & Lazovi, I. (2014). *Indoor CO 2 measurements in Serbian schools and ventilation rate calculation*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.10.028>

- US EPA, O. (2000). *Carbon Monoxide's Impact on Indoor Air Quality*.
<https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/carbon-monoxides-impact-indoor-air-quality>
- van Raan, A. F. J. (2004). Sleeping Beauties in science. In *Budapest Scientometrics* (Vol. 59, Issue 3). Kluwer Academic Publishers.
- Zhang, F., Shi, Y., Fang, D., Ma, G., Nie, C., Krafft, T., He, L., & Wang, Y. (2020). Monitoring history and change trends of ambient air quality in China during the past four decades. *Journal of Environmental Management*, 260, 110031. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.110031>
- Zimmermann, L., Weigel, R., & Fischer, G. (2018). Fusion of nonintrusive environmental sensors for occupancy detection in smart homes. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(4), 2343–2352. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2752134>