Universidad Nacional de Ingeniería

Área de Conocimiento de Tecnología de la Información y Comunicación

Diseño de sistema de monitoreo de partículas PM2.5 y PM10 basado en IoT para la evaluación de la calidad del aire

Trabajo Monográfico para optar al título de Ingeniero en Electrónica

Elaborado por:

Br. Bryan Josué Espinoza Martínez.
Carnet: 2018-0105U

Br. Taiz de Jesús Rodríguez Ordeñana.
Carnet: 2018-0325U

Br. Gerry María Vargas Bakker.
Carnet: 2018-0017U

Tutor:

Ing. Joachin Alexanders Hernández López

Mayo 2026
Managua, Nicaragua

Dirección de Área de
Conocimiento de Tecnología
de la Información y Comunicación

Managua, 26 de enero 2026

Br. Taiz de Jesús Rodríguez Ordeñana **2018-0325U**
Br. Gerry María Vargas Bakker **2018-0017U**
Br. Bryan Josué Espinoza Martínez **2018-0105U**
Egresados Programa académico Ingeniería Electrónica
Sus manos.-

Estimados Egresados:

Reciban cordiales saludos y éxito en sus actividades.

Por medio de la presente, les comunico la aprobación del trabajo monográfico titulado: ***"Diseño de sistema de monitoreo de particulas PM2.5 y PM10 basado en IoT para la evaluación de la calidad del aire"****, el cual cumple con los requisitos establecidos en el capitulo II de la normativa de trabajos monográficos de la UNI como forma de culminación de estudios, por lo que queda oficialmente aprobado por esta Dirección.*

El docente responsable de acompañarle en el proceso de desarrollo de su tema monográfico es el Ing. Joachin Alexander Hernández López.

A partir de la fecha de aprobación, tienen como máximo seis meses para realizar el trabajo monográfico incluyendo la defensa.

Atentamente,

MSc. Claudia Lucía Benavidez Rugama
Directora Área de Conocimiento de
Tecnología de la Información y Comunicación

Cc. Ing. Joachin Alexander Hernández López – Tutor
MSc. Luisa Massiel Mercado Gutiérrez - Secretaria Académica.
Archivo DACTIC.

Móvil: (505) 8889 0903

Recinto Universitario Simón Bolívar
Avenida Universitaria
Managua, Nicaragua.
Apdo: 5595

claudia.benavidez@dactic.uni.edu.ni
www.uni.edu.ni

Managua, miércoles 10 de marzo del 2026

MSc. Claudia Lucía Benavidez Rugama
Directora
DACTIC
UNI

Reciba un cordial saludo de mi parte.

Por este medio hago constar que he realizado el seguimiento y revisión en calidad de tutor de la monografía: **"Diseño de monitoreo de partículas PM.2.5 y PM10 basado en IoT para la evaluación de calidad del aire "**, por lo anterior solicito de sus buenos oficios para las gestiones de realización de pre defensa.

El trabajo es presentado por:

Br. Taiz de Jesús Rodríguez Ordeñana	**Carnet: 2018-0325U**
Br. Gerry María Vargas Bakker	**Carné: 2018-0017U**
Br. Bryan Josué Espinoxa Martínez	**Carné: 2018-0105U**

Sin nada más a que referirme, me despido, deseándole éxitos en sus funciones.

Atte,

Joachin Alexander Hernández López
Tutor
Ingeniería Electrónica

DEDICATORIA

Dedicamos este trabajo a nuestros padres, quienes con su amor, paciencia y esfuerzo constante nos dieron las herramientas necesarias para alcanzar nuestras metas, a Dios, por brindarnos la sabiduría, la salud y la fortaleza necesaria para culminar esta etapa de nuestras vidas, por poner en nuestro camino a las personas adecuadas que nos guiaron y motivaron en cada paso y por ultimo y no menos importante a nosotros mismos, por la perseverancia, las noches de desvelo y el compromiso de no rendirnos ante los obstáculos. Este logro es el reflejo de nuestra constancia y pasión por aprender.

RESUMEN

El presente trabajo monográfico expone el diseño conceptual y el modelado funcional de un sistema embebido destinado al monitoreo constante de la calidad del aire, centrándose específicamente en la detección de material particulado (PM2.5) y (PM10). La problemática central que motiva este diseño es el incremento acelerado de las emisiones vehiculares e industriales en entornos urbanos, factores que deterioran el equilibrio ecológico y representan un riesgo crítico para la salud pública debido a la capacidad de estas micropartículas de penetrar en el sistema respiratorio y el torrente sanguíneo.

La investigación se desarrolla bajo un enfoque cualitativo-tecnológico, adoptando una metodología propositiva y documental que delimita el alcance a la ingeniería de detalle y la validación mediante simulación. Para la arquitectura del sistema, se seleccionó el microcontrolador ESP32 como núcleo de procesamiento, aprovechando su bajo costo, eficiencia energética y su capacidad nativa de conectividad Wi-Fi, lo que facilita la integración con ecosistemas de Internet de las Cosas (IoT). La adquisición de datos ambientales se realiza a través de la integración de un sensor de dispersión láser PMS5003, capaz de detectar partículas desde los 0.3 µm, y un sensor BME280 para la medición de temperatura, humedad y presión atmosférica.

Un aspecto distintivo de la propuesta es el desarrollo de una lógica de programación que incluye un modelo de corrección algorítmica para mitigar el error experimental provocado por la humedad relativa superior al 75%, condición que suele causar sobreestimaciones en los sensores ópticos. Los datos procesados se gestionan mediante el protocolo de comunicación MQTT y se visualizan de manera remota en la plataforma ThingSpeak, permitiendo un seguimiento en tiempo real y la generación de registros históricos en la nube.

Finalmente, la validación del sistema a través del entorno de simulación Wokwi confirmó la coherencia del firmware y la integridad de la arquitectura de red propuesta, estableciendo una base técnica sólida para una futura implementación física de estaciones de monitoreo accesibles en el contexto nacional.

Contenido

I.- Introducción 1
II.- Objetivos 3
3.1.- General 3
3.2.- Específicos 3
III.- Justificación 4
IV.- Marco Teórico 5
4.1. Calidad del Aire 5
4.2. Contaminación atmosférica. 6
4.3. Material Particulado 6
4.3.1. Definición de material particulado 7
4.3.2. Partículas PM 10. 7
4.3.3. Partículas PM 2.5 7
4.4. Fuente de emisión de partículas PM2.5 y PM10 8
4.5 Efectos de las partículas PM2.5 y PM10 en la salud 9
4.6. Normas y estándares de calidad del aire. 10
4.7. Sistema de monitoreo de calidad del aire 12
4.8. Tecnología IoT aplicada al monitoreo ambiental 12
4.9. Que es un microcontrolador 13
4.9.1.1. Características principales de los microcontroladores: 15
4.9.1.2. Características principales de los microprocesadores: 16
4.9.2. MCU vs MPU: Cómo elegir la adecuada para dispositivos IoT 17
4.10. Sensores 19
4.10.1. Tipos de sensores: 20
V.- Metodología 33
5.1. Enfoque de la investigación. 33
5.2. Alcance del proyecto 33
5.3. Métodos de la investigación 33
VI.- Desarrollo 34
6.1. Diseño de Hardware 34
6.1.1. Diagrama de arquitectura. 34
6.1.2. Selección de componentes 34
6.1.3. Esquema de conexión: 43
6.1.3.1. Consideraciones técnicas 44

6.1.3.2. Análisis de compatibilidad Eléctrica y lógica. 45
6.2. Diseño de Software. 46
6.3. Plataforma de Visualización IoT y Protocolo de Comunicación. 47
6.3.1. Justificación del Protocolo MQTT 47
6.3.2. Plataforma de Gestión: ThingSpeak 48
6.4. Simulaciones 49
VII.- Conclusiones 54
VIII.-Recomendaciones 55
IX.- Referencias Bibliográficas 56
Referencias 56
X.- Anexos 59

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Comparativa de tamaño de partículas PM 8
Figura 2 Estructura genérica de un microcontrolador. 14
Figura 3 comparativa de Microprocesador y Microcontrolador. 17
Figura 4 Sensor de visión industria 20
Figura 5 Sensor de temperatura tipo termopar 22
Figura 6 Sensor de radiación ionizante Geiger Counter Module SEN0463 23
Figura 7 Sensor de proximidad inductivo 24
Figura 8 Sensor de presión BMP580 25
Figura 9 Sensor de posición lineal magnetoestrictivo BTL 26
Figura 10 Sensor fotoeléctrico W4F 27
Figura 11 Sensor de partículas PM1.0, PM2.5, PS5003 28
Figura 12 Sensor de movimiento PIR HC-SR501 29
Figura 13 Sensor inductivo detector de metal 29
Figura 14 Sensor Ultrasónico de nivel 30
Figura 15 Sensor de fugas Lyric W1 31
Figura 16 Sensor de humedad y temperatura DTH22 AM2302 32
Figura 17 Diagrama de arquitectura del sistema 34
Figura 18 Microcontrolador ESP32 y su distribución de pines 35
Figura 19 Vista Superior del sensor PMS5003 37
Figura 20 Vista Superior del Sensor BME280 39
Figura 21 Pantalla LCD 20X4 40
Figura 22 Cables de conexión o jumper y G5 41
Figura 23 Protoboard o placa de prueba 41
Figura 24 Fuente de poder conmutada 42
Figura 25 Esquema de conexión del sistema 43
Figura 26 Diagrama de flujo 46
Figura 27 Arquitectura de comunicación y flujo de datos del sistema 48
Figura 28 Esquema visual de simulación realizada en Wokwi 49
Figura 29 Registro de concentración de partículas PM2.5 y PM10 en la nube 49
Figura 30 Registro de humedad y presión ambiental en la nube 50
Figura 31 Registro de temperatura ambiental 50

I.- Introducción

Uno de los principales problemas que afectan a las sociedades en la actualidad, tanto a nivel nacional como mundial, es el incremento de las emisiones vehiculares. Estas emisiones liberan a la atmósfera diversos contaminantes que contribuyen al calentamiento ambiental, deterioran la calidad del aire y representan un riesgo directo para la salud humana. Sustancias como el monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno generan partículas que permanecen suspendidas en el aire y, al ser inhaladas, pueden ocasionar múltiples afecciones respiratorias, cardiovasculares y ambientales.

El estudio de las condiciones atmosféricas y la calidad del aire se ha convertido en una necesidad fundamental, especialmente en zonas urbanas donde la circulación vehicular es constante. La presencia de partículas contaminantes como las PM2.5 y PM10 es un indicador clave para determinar el impacto que la contaminación ambiental tiene sobre la población y sobre el equilibrio ecológico.

A nivel internacional, regiones como Europa y América del Norte continúan destacando por su amplia disponibilidad de datos sobre calidad del aire. Sin embargo, en muchos países de ingresos bajos y medios todavía persisten limitaciones en las mediciones de PM2.5. Aun así, en los últimos años se ha registrado un aumento significativo en la cantidad de estaciones de monitoreo, lo que representa un avance importante en los esfuerzos por comprender y controlar la contaminación atmosférica (Organización Mundial de la Salud, s.f.).

En este contexto, se plantea la importancia de fortalecer la legislación ambiental y de implementar sistemas de monitoreo que permitan evaluar la concentración de partículas contaminantes en el aire. Contar con esta información facilita la toma de decisiones orientadas a la protección de la salud pública y a la prevención de futuras complicaciones derivadas de la exposición prolongada a contaminantes atmosféricos.

La prevención de la contaminación generada por las emisiones vehiculares es esencial para garantizar la continuidad de la vida en el planeta y para mantener el equilibrio que debe existir entre las actividades humanas y el medio ambiente. Actualmente, ese equilibrio se encuentra amenazado por los crecientes niveles de

contaminación, lo que hace indispensable promover acciones integrales que contribuyan a la preservación del entorno y al bienestar de las comunidades.

La presente investigación se delimita al diseño conceptual y modelado funcional de una estación de monitoreo ubicada teóricamente en entornos urbanos de alta densidad vehicular. El alcance no incluye la construcción física, centrando la validación en la arquitectura de hardware y la eficacia de la comunicación inalámbrica mediante simulación.

II.- Objetivos

3.1.- General

Diseñar un sistema de monitoreo de material particulado (PM2.5 y PM10) mediante arquitectura IoT para la evaluación de la calidad del aire, fundamentado en el análisis técnico de componentes y validación funcional por modelado.

3.2.- Específicos

- Analizar los parámetros técnicos de sensores de dispersión láser y microcontroladores para la selección de hardware compatible en niveles lógicos y alimentación.

- Diseñar el sistema embebido, incluyendo el esquema electrónico de interconexión y la lógica de programación con algoritmos de compensación por humedad relativa.

- Evaluar el desempeño del diseño conceptual mediante simulaciones en entornos digitales para verificar la integridad del flujo de datos desde la adquisición hasta la visualización remota.

III.- Justificación

La degradación de la calidad del aire se ha consolidado como uno de los desafíos ambientales más urgentes a nivel global, con un impacto directo en la mortalidad prematura y el desarrollo de enfermedades crónicas. En el contexto particular de Nicaragua, se identifica una brecha tecnológica significativa: la ausencia de un monitoreo sistemático y continuo de contaminantes atmosféricos, debida principalmente a los elevados costos de adquisición y mantenimiento de los equipos de medición convencionales. Esta falta de datos precisos impide la formulación de datos reales basadas en evidencia y deja a la población vulnerable ante niveles desconocidos de exposición al material particulado.

Este proyecto se justifica técnicamente al proponer el diseño de un sistema embebido de bajo costo basado en tecnología IoT, que ofrece una alternativa viable y escalable frente a las estaciones meteorológicas tradicionales. La elección de componentes como el ESP32 y sensores de dispersión láser permite democratizar el acceso a herramientas de medición ambiental, garantizando al mismo tiempo una precisión aceptable mediante la implementación de funciones de compensación por humedad relativa.

Desde el punto de vista operativo, la integración del protocolo MQTT y plataformas de gestión en la nube responde a la necesidad moderna de contar con información transparente, inmediata y accesible de forma remota para la toma de decisiones.

Socialmente, la relevancia de este diseño radica en su potencial para salvaguardar la salud pública. Al facilitar la identificación de áreas con alta concentración de PM2.5 y PM10, el sistema permite emitir alertas preventivas y planificar estrategias de mitigación urbana más efectivas. En última instancia, este trabajo no solo aporta una solución desde la ingeniería electrónica para reducir la brecha de datos ambientales en el país, sino que también fomenta una cultura de

vigilancia ambiental necesaria para asegurar un entorno saludable para las generaciones presentes y futuras.

IV.- Marco Teórico

4.1. Calidad del Aire

La calidad del aire es un factor determinante para la salud pública, el equilibrio ambiental y el desarrollo sostenible de las sociedades. Se define como el estado de la atmósfera en relación con la presencia y concentración de contaminantes que pueden afectar negativamente a los seres humanos, los ecosistemas y los bienes materiales. Un aire de buena calidad es aquel que mantiene concentraciones de contaminantes por debajo de los límites establecidos por las normativas ambientales y sanitarias.

La Organización Mundial de la Salud señala que la contaminación del aire constituye uno de los principales riesgos ambientales para la salud humana a nivel mundial, ya que la exposición continua a contaminantes atmosféricos incrementa la probabilidad de padecer enfermedades respiratorias, cardiovasculares y otros trastornos crónicos (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2021). En este sentido, la calidad del aire se evalúa mediante el monitoreo de diversos contaminantes, entre los cuales el material particulado PM2.5 y PM10 es considerado uno de los indicadores más relevantes.

En las zonas urbanas, la calidad del aire suele verse deteriorada por el crecimiento poblacional, el aumento del parque vehicular y la concentración de actividades industriales. Estos factores generan emisiones constantes de contaminantes que se acumulan en la atmósfera, especialmente en condiciones meteorológicas desfavorables. La medición de la calidad del aire permite identificar episodios de contaminación, evaluar tendencias a lo largo del tiempo y determinar el grado de cumplimiento de las normativas ambientales vigentes.

El monitoreo continuo de la calidad del aire es una herramienta fundamental para la gestión ambiental, ya que proporciona información confiable que respalda la toma de decisiones orientadas a la protección de la salud pública. En este contexto, la

implementación de sistemas de monitoreo automatizados basados en tecnologías IoT permite obtener datos en tiempo real,

optimizando la recopilación, el análisis y la visualización de información sobre contaminantes atmosféricos, particularmente las partículas PM2.5 y PM10.

4.2. Contaminación atmosférica.

La contaminación atmosférica es uno de los problemas ambientales más urgentes y preocupantes en la actualidad. Se refiere a la presencia en el aire de sustancias nocivas en concentraciones superiores a las consideradas saludables para los seres vivos y el medio ambiente. Es fundamental abordar este problema mediante la adopción de medidas para reducir las emisiones contaminantes y promover fuentes de energía limpia y sostenible. Solo así podremos garantizar un aire limpio y saludable para las generaciones presentes y futuras.

La Organización Mundial de la Salud señala que “la contaminación del aire (tanto el exterior como de interiores) es la presencia en él de agentes químicos, físicos o biológicos que alteran las características naturales de la atmósfera” (Organización Mundial de la Salud, s.f.).

La contaminación del aire exterior puede tener efectos perjudiciales para la salud humana, como enfermedades respiratorias, alergias y problemas cardiovasculares. Además, contribuye al cambio climático y al deterioro de los ecosistemas. Por otro lado, la contaminación del aire en los espacios interiores, como los hogares y los lugares de trabajo, también puede ser preocupante, ya que la exposición a sustancias contaminantes en estos ambientes cerrados puede tener impactos negativos en la salud, especialmente en las vías respiratorias.

4.3. Material Particulado

El material particulado (MP) es una mezcla de partículas sólidas y gotas líquidas suspendidas en el aire, como polvo, hollín, humo y suciedad, cuyo tamaño varía desde lo visible hasta lo microscópico (menos de 0.1 a 100 micrómetros), representando un riesgo para la salud respiratoria y cardiovascular al poder inhalarse profundamente en

los pulmones, clasificándose comúnmente en MP10 (grueso) y MP2.5 (fino) según su diámetro.

4.3.1. Definición de material particulado

Material particulado es definida como “la materia particulada es un indicador sustitutivo habitual de la contaminación del aire" (World Health Organization, s.f.). Es el polvo, hollín, humo y aerosol que se encuentran suspendidas en el aire y emitidas por vehículos diésel, la quema de residuos y cultivos, y las plantas generadoras de energía eléctrica a carbón, estas partículas son un problema mundial de salud pública, incluso a niveles relativamente bajos.

4.3.2. Partículas PM 10.

Partículas de menos de 10 micrómetros de diámetro. Pueden inhalarse y acumularse en el sistema respiratorio.

4.3.3. Partículas PM 2.5

Partículas de menos de 2.5 micrómetros de diámetro, llamadas "partículas finas". Suponen un mayor riesgo para la salud porque pueden alojarse profundamente en los pulmones (OPS/OMS | Organización Panamericana de la Salud., s.f.).

A continuación, se muestra en la Figura 1 comparativa de tamaño de partículas PM

Figura 1 Comparativa de tamaño de partículas PM



Fuente: Tomado de (EPA.gov, 2025).

4.4. Fuente de emisión de partículas PM2.5 y PM10

Las partículas PM2.5 y PM10 se originan a partir de múltiples fuentes de emisión, las cuales pueden clasificarse en naturales y antropogénicas. Las fuentes naturales incluyen procesos como la erosión del suelo, tormentas de polvo, incendios forestales y actividad volcánica. No obstante, en los entornos urbanos y periurbanos, las fuentes antropogénicas son las principales responsables del aumento de las concentraciones de material particulado en el aire.

El tráfico vehicular constituye una de las fuentes más significativas de emisión de partículas PM2.5 y PM10. La combustión de combustibles fósiles en motores de gasolina y diésel genera partículas finas que son liberadas directamente a la atmósfera. Además, el desgaste mecánico de frenos, neumáticos y superficies de rodamiento contribuye de manera importante a la generación de partículas PM10, especialmente en zonas con alta densidad vehicular (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos [EPA], 2022).

Las actividades industriales también representan una fuente relevante de material particulado. Procesos como la quema de combustibles, la fundición de metales, la producción de cemento y la generación de energía eléctrica liberan partículas que pueden permanecer suspendidas en el aire durante largos periodos.

Así mismo, la quema de residuos sólidos y agrícolas, una práctica común en muchos países en desarrollo, genera grandes cantidades de partículas PM2.5, las cuales pueden desplazarse a grandes distancias debido a su pequeño tamaño.

La identificación y caracterización de las fuentes de emisión de partículas PM2.5 y PM10 resulta esencial para el diseño de estrategias de mitigación y control de la contaminación atmosférica. El monitoreo de estas partículas permite evaluar el impacto de las fuentes emisoras y apoyar la formulación de políticas públicas orientadas a la reducción de emisiones contaminantes y a la mejora de la calidad del aire (Organización Panamericana de la Salud [OPS], 2020).

4.5 Efectos de las partículas PM2.5 y PM10 en la salud

Las partículas PM2.5 y PM10 son consideradas uno de los contaminantes atmosféricos más perjudiciales para la salud humana debido a su tamaño y capacidad de penetración en el organismo. Las partículas PM10 pueden ser inhaladas y depositarse en las vías respiratorias superiores, mientras que las PM2.5, al ser más pequeñas, pueden alcanzar las regiones más profundas de los pulmones e incluso ingresar al torrente sanguíneo.

Diversos estudios han demostrado que la exposición a concentraciones elevadas de material particulado está asociada con un incremento en la incidencia de enfermedades respiratorias como asma, bronquitis y enfermedad pulmonar obstructiva crónica. Asimismo, la exposición prolongada a partículas PM2.5 se relaciona con enfermedades cardiovasculares, incluyendo hipertensión, infartos y accidentes cerebrovasculares, como resultado de procesos inflamatorios y oxidativos inducidos en el organismo (World Health Organization, 2021).

Otros efectos adversos en la salud incluyen la irritación de ojos, nariz y garganta, disminución de la función pulmonar y un mayor riesgo de infecciones respiratorias, especialmente en niños, adultos mayores y personas con enfermedades preexistentes. Además, estudios epidemiológicos han señalado una asociación entre la exposición crónica a partículas finas y el aumento de la mortalidad prematura, lo que resalta la gravedad del problema de la contaminación por material particulado.

Debido a estos riesgos, la Organización Mundial de la Salud ha establecido valores guía para las concentraciones de PM2.5 y PM10, con el objetivo de minimizar

los impactos negativos sobre la salud pública. El monitoreo constante de estos contaminantes permite identificar niveles de riesgo, emitir alertas preventivas y apoyar la implementación de medidas orientadas a la protección de la población y al mejoramiento de la calidad del aire.

4.6. Normas y estándares de calidad del aire.

Según la norma técnica obligatoria nicaragüense (MARENA, 2001). Las normas y estándares del aire son los límites máximos permisibles de inmisión establecidos para los contaminantes atmosféricos prioritarios esto con el fin de proteger la salud de la población y preservar el ambiente. Esta norma expresa los valores numéricos en microgramos por metro cúbico y partes por millón para los siguientes entes:

- Partículas Totales en Suspensión (PPM)
- Material Particulado (PM10)
- Dióxido de azufre (SO2)
- Dióxido de nitrógeno (NO2)
- Ozono (O3)
- Monóxido de carbono (CO)
- Plomo (Pb)

Los límites se definen para diferentes períodos de medición que puede ser anual, cada 24 horas, 8 horas y 1 hora.

La norma también nos establece métodos que son estandarizados para el monitoreo como lo son altura para estaciones de monitoreo (entre 1.5 y 8 metros), ubicación, frecuencias de muestreo y diseño de monitoreo según la densidad poblacional y características de la zona, para así garantizar la confiabilidad en el seguimiento y las mediciones.

A continuación, se muestran en Tabla 1 límites máximos permisibles de inmisión y su muestreo

Tabla 1 Limites permisibles de inmisión y su muestreo

LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINACION			
CONTAMINANTE	**SIMBOLOGIA**	**LIMITE MAXIMO ug/m3 / ppm**	**MUESTREO**
Partículas totales en Suspensión	PTS	75 / na	24 horas continuas 2 veces por semana
Material Particulado	PM10	50 / na	24 horas continuas 2 veces por semana
Dióxido de Azufre	SO2	80 / 0.03	5 minutos cada 1 hora continuo
Dióxido de Nitrógeno	NO2	100 / 0.05	5 minutos cada 1 hora continuo durante 8 días
Ozono	O3	160 / 0.08	5 minutos cada 8 horas continuas
Monóxido de Carbono	CO	10000 / 9.0	5 minutos cada 8 horas continuas
Plomo	PB	0.5 / na	24 horas continuas 2 veces por semana

Estos límites definen la concentración máxima admisible para preservar la salud en el ambiente, estar dentro de estos márgenes indica una calidad del aire aceptable según estándar nacional, superarlos puede implicar riesgos como afecciones respiratorias, daños al ecosistema entre otro.

4.7. Sistema de monitoreo de calidad del aire

De acuerdo con la norma nicaragüense (MARENA, 2001) un sistema de monitoreo de calidad del aire es un conjunto organizado de estaciones, métodos y protocolos destinados a medir de manera sistemática la concentración de contaminantes atmosféricos, con el fin de vigilar el cumplimiento de los límites permisibles y proteger la salud pública.

4.8. Tecnología IoT aplicada al monitoreo ambiental

Para este diseño de un sistema de monitoreo de aire se utilizará un microcontrolador ESP32 para poder medir las variables de manera remota y constante, el ESP32 es una buena elección óptima para los requerimientos de este proyecto ya que es un microcontrolador de bajo costo, wifi integrado, consumo eficiente y ocupa el ID de Arduino que tiene la ventaja de ser un sistema open source, se escogieron sensores que cumplen con las funciones necesarias para realizar las mediciones en el tiempo de muestreo requerido, dichas mediciones serán visibles por medio de un servidor de IoT gratuito para monitorear las mediciones.

La calidad del aire sigue siendo una de las cuestiones ambientales más críticas a nivel global. De acuerdo con la OMS, 9 de cada 10 individuos respiran aire que excede los niveles seguros de contaminación, siendo las áreas urbanas las más perjudicadas. Los efectos de la contaminación del aire sobre la salud incluyen afecciones respiratorias, problemas cardiacos y fallecimientos prematuros. Un monitoreo efectivo de la calidad del aire es esencial para gestionar los niveles de contaminación y asegurar condiciones de vida más saludables en las ciudades.

La tecnología de IoT facilita el seguimiento de la calidad del aire mediante el uso de sensores que identifican contaminantes dañinos, como partículas (PM2. 5,

PM10), dióxido de carbono (CO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2), dióxido de azufre (SO_2) y ozono (O_3). Estos dispositivos transmiten información en tiempo real a un sistema central que permite su análisis y visualización para el uso de la administración.

Algunos beneficios del uso de tecnología IoT

Alertas inmediatas: Los sensores de IoT pueden generar alertas cuando los niveles de contaminantes superan los límites seguros, permitiendo el rápido actuar de personal competente para su debida revisión.

Transparencia informativa: La información obtenida por los diferentes sensores puede mostrarse en tableros de gestión ambiental, brindando transparencia y ofreciendo al personal datos necesarios para tratar de mejor manera el problema.

Predicción de efectos en la salud: Analizando tendencias y datos del pasado, los sistemas de IoT pueden anticipar los futuros niveles de calidad del aire.

Planeación urbana: Con información en tiempo real se pueden localizar áreas de alta contaminación y desarrollar planes estratégicos adecuados para reducirla.

4.9. Que es un microcontrolador.

Un microcontrolador es un dispositivo electrónico que puede ser programado para realizar las acciones o instrucciones que nosotros deseemos. Este instrumento funciona de manera similar a como lo haría un ordenador, pero tiene un tamaño menor, un coste más bajo y suele utilizarse para tareas con enfoques más específicos. Está formado por los siguientes componentes (Universidad Europea, 2024):

Elementos internos del microcontrolador:

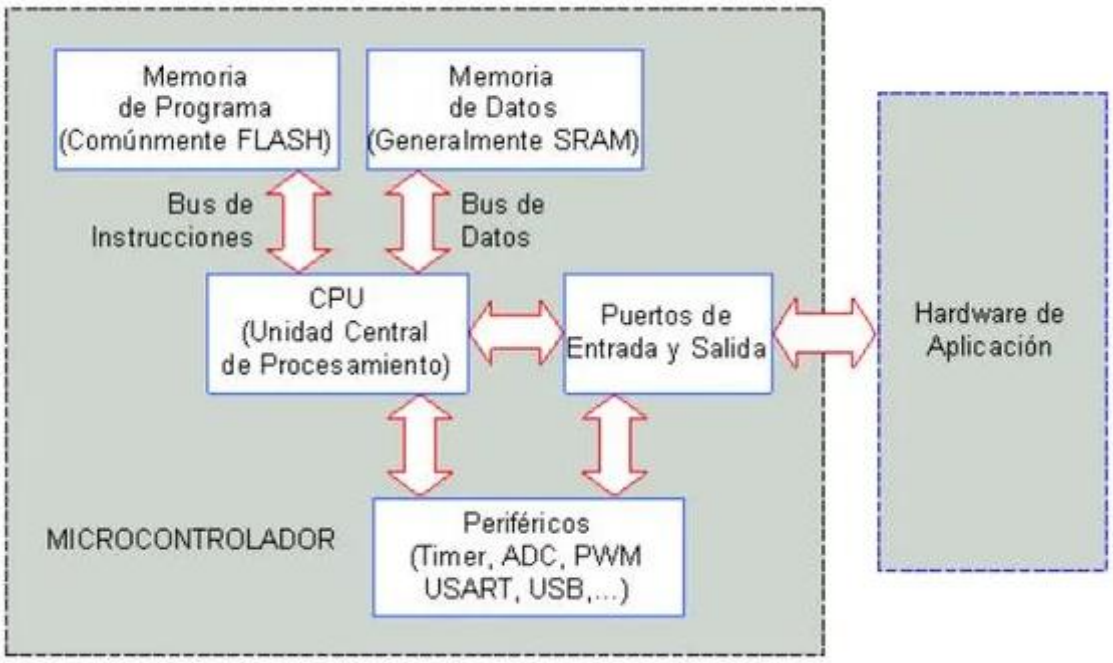
Los elementos internos de un microcontrolador son las partes integradas dentro del chip que permiten su funcionamiento:

- Unidad Central de Procesamiento (CPU): es el núcleo del microcontrolador y el encargado de llevar a cabo las operaciones definidas por el programa almacenado en la memoria.
- Memoria: un microcontrolador cuenta con dos tipos de memoria, la memoria RAM y la memoria ROM, cada una de ellas encargada de una tarea específica.
- RAM: almacena temporalmente los datos con los que trabaja el programa.

- ROM: en contraposición, la memoria ROM se utiliza para almacenar de manera permanente el programa que debe ejecutar el microcontrolador.
- Oscilador: los microcontroladores incluyen un oscilador que produce pulsos a una frecuencia determinada para sincronizar todas las funciones internas.

A continuación, en la figura 2 se muestra la estructura genérica de un microcontrolador.

Figura 2 Estructura genérica de un microcontrolador.



Fuente: Tomado de (Aprendiedo Arduino, 2016)

4.9.1. Microcontroladores vs Microprocesadores.

Los microcontroladores y los microprocesadores comparten muchas similitudes. Ambos pueden describirse como procesadores de un solo chip capaces de ejecutar lógica computacional, y ambos son muy valiosos en el desarrollo y la proliferación de la tecnología informática general. Sin embargo, los dos componentes difieren tanto en la arquitectura de hardware como en la aplicación.

La característica definitoria de un microcontrolador es la combinación de todos los elementos informáticos necesarios en un solo chip: los microcontroladores no requieren ningún circuito externo adicional para funcionar. Por el contrario, los microprocesadores constan de una CPU y varios chips de apoyo que proporcionan memoria, interfaz serie, E/S y otras funciones necesarias.

La principal diferencia entre estos dos tipos de microchips es que los microcontroladores son autónomos, mientras que los microprocesadores están diseñados para interactuar con auxiliares externos.

Como resultado, las tareas generalizadas y exigentes que podrían requerir hardware especializado con mayor potencia de procesamiento son más adecuadas para los microprocesadores. Las tareas específicas dentro de los sistemas integrados, como el control de sensores o motores, son buenos ejemplos de aplicaciones de microcontroladores adecuadas (IBM, s.f.).

4.9.1.1. Características principales de los microcontroladores:

- Procesamiento en tiempo real: las MCU se destacan en aplicaciones donde la previsibilidad de los tiempos y la ejecución de tareas son fundamentales, como en los sistemas de control de vuelo o el monitoreo ambiental en sondas espaciales.

- Bajo consumo de energía: En aplicaciones aeroespaciales, la eficiencia energética es esencial, especialmente en la exploración espacial, donde la energía es limitada. Las MCU están diseñadas para funcionar con un consumo mínimo, lo que las hace adecuadas para naves espaciales pequeñas o UAV de baja potencia.

- Rentable: dado que los microcontroladores integran múltiples funcionalidades en un solo chip, tienden a ser más rentables que los sistemas complejos basados en microprocesadores.

- Robustez y confiabilidad: muchas MCU están diseñadas para soportar entornos hostiles, incluidas temperaturas extremas y radiación, lo que es importante tanto para los sistemas espaciales como para la aviónica de grado de defensa

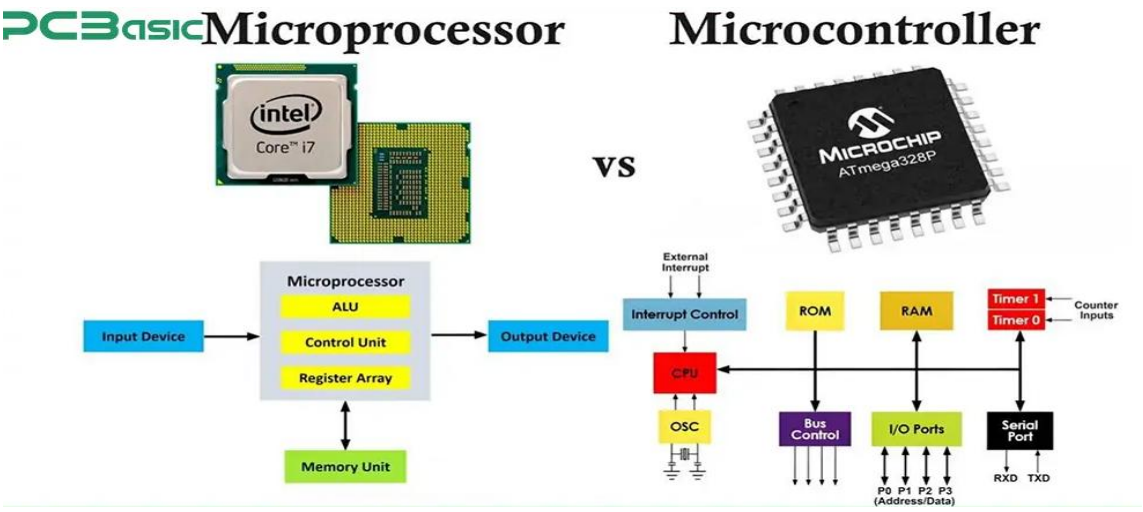
4.9.1.2. Características principales de los microprocesadores:

- Alto poder de procesamiento: las MPU son ideales para tareas que requieren una gran capacidad computacional, como computación central, análisis de datos, procesamiento de imágenes, fusión de sensores y toma de decisiones impulsada por IA en sistemas aeroespaciales.

- Multitarea: Las MPU pueden gestionar múltiples tareas simultáneamente, lo que las hace ideales para aplicaciones de alto rendimiento que requieren multitarea. Esto las hace ideales para sistemas complejos que requieren la gestión de varios subsistemas, como navegación, comunicaciones y control.
- Flexible y escalable: los microprocesadores se pueden combinar con una amplia gama de periféricos externos, memoria y coprocesadores, lo que permite diseños más personalizables y escalabilidad en la arquitectura del sistema.
- Compatibilidad con sistemas operativos avanzados: Las MPU pueden ejecutar sistemas operativos completos como Linux o VxWorks, lo que permite ejecutar aplicaciones de software sofisticadas junto con operaciones en tiempo real. Esto es fundamental para sistemas que requieren un alto rendimiento de datos y un amplio control de software (VORAGO TECHNOLOGIES, s.f.).

A continuacion se muestra en la figura 3 comparativa de Microprocesador y Microcontrolador

Figura 3 comparativa de Microprocesador y Microcontrolador.



Fuente: Tomado de (PCB asic, 2025)

4.9.2. MCU vs MPU: Cómo elegir la adecuada para dispositivos IoT

Al diseñar dispositivos IoT, una de las decisiones críticas es elegir entre un microcontrolador (MCU) y un microprocesador (MPU). Ambos componentes desempeñan un papel fundamental en el funcionamiento de las aplicaciones IoT, pero su función varía según los requisitos del dispositivo.

1. ***Potencia de procesamiento:***

- Los microcontroladores (MCU) son ideales para dispositivos IoT con tareas más sencillas y menos exigentes. Están optimizados para un funcionamiento rentable, en tiempo real y de bajo consumo, lo que los hace ideales para aplicaciones como sensores, domótica o dispositivos portátiles

- Los microprocesadores (MPU), por otro lado, ofrecen mayores capacidades de procesamiento, lo que los hace adecuados para dispositivos IoT más complejos que requieren mayor potencia computacional, como concentradores domésticos inteligentes, cámaras de seguridad avanzadas o sistemas de computación de borde.

2. ***Consumo de energía:***

La eficiencia energética suele ser un factor crítico en los dispositivos IoT, ya que muchos funcionan con baterías o se implementan en ubicaciones remotas. Los microcontroladores están diseñados para consumir la mínima energía, lo que los convierte en la opción preferida para dispositivos IoT que necesitan funcionar con bajo consumo durante periodos prolongados. Por el contrario, las MPU tienden a consumir más energía debido a su mayor capacidad de procesamiento, lo que las hace más adecuadas para dispositivos IoT enchufables o de alto rendimiento.

3. Complejidad de la aplicación

- Los MCU son perfectos para tareas sencillas y dedicadas que requieren poca potencia de procesamiento. Por ejemplo, un sensor de temperatura en un termostato inteligente se beneficiaría de la simplicidad y eficiencia de un microcontrolador.
- Las MPU son ideales para sistemas IoT más complejos que requieren multitarea, procesamiento intensivo de datos y mayor potencia computacional. Dispositivos como altavoces inteligentes o asistentes de voz suelen depender de las capacidades de una MPU para gestionar múltiples tareas simultáneamente.

4. Consideraciones de costo

Al comparar MCU y MPU, los microcontroladores tienden a ser más rentables, un factor clave en muchos diseños de IoT. Si se construye una red de IoT a gran escala, como sensores agrícolas conectados o dispositivos de monitoreo ambiental, el menor costo de los MCU será una gran ventaja. Sin embargo, para dispositivos IoT

avanzados que requieren procesamiento o renderizado de gráficos de alta velocidad, una MPU podría ser necesaria a pesar de su mayor costo (VORAGO TECHNOLOGIES, s.f.).

En la siguiente tabla 2 se muestra de manera clara la diferencia entre microcontroladores y microprocesadores.

Tabla 2 Diferencia entre microcontroladores y microprocesadores.

Factor de decisión	Microcontroladores	Microprocesador
Complejidad de la tarea	Ideal para tareas de control simples, fijas y repetitivas.	Más adecuado para multitareas, operaciones complejas y alto procesamiento de datos.
Fuente de alimentación	Diseño de bajo consumo, admite funcionamiento con batería y modos de suspensión.	Un mayor consumo de energía requiere una fuente de alimentación constante y estable.
Tamaño y costo	Solución de un solo chip, compacta y rentable	Requiere múltiples módulos externos, más complejos y costosos.
Control en tiempo real	Respuesta rápida, adecuada para aplicaciones de control en tiempo real.	Generalmente no es ideal para tareas estrictas en tiempo real.
Aplicaciones típicas	Electrodomésticos, sensores, control industrial, electrónica automotriz, wearables	Computadoras, teléfonos inteligentes, servidores, sistemas de IA, plataformas gráficas

Fuente: Tomado de (PCB asic, 2025)

4.10. Sensores

Un sensor es un dispositivo que detecta el cambio en el entorno y responde a alguna salida en el otro sistema. Un sensor convierte un fenómeno físico en un voltaje analógico medible (o, a veces, una señal digital) convertido en una pantalla legible para humanos o transmitida para lectura o procesamiento adicional (DEWEsoft, 2025).

4.10.1. Tipos de sensores:

1. Sensores de visión e imagen

Los sensores de visión e imagen detectan objetos, colores, patrones o movimiento y convierten esta información en una imagen visual para su procesamiento o visualización. Ampliamente utilizados en automatización, robótica, seguridad, imágenes médicas y control de calidad, estos sensores permiten que las máquinas interpreten y respondan a los datos visuales, mejorando la precisión y la eficiencia en todas las industrias.

Los tipos comunes incluyen sensores de imagen CMOS y CCD. Los CMOS ofrecen bajo consumo de energía y procesamiento rápido, mientras que los CCD proporcionan una mayor calidad de imagen y rendimiento con poca luz. Los sensores termográficos especializados detectan la radiación infrarroja para visión nocturna y mantenimiento industrial, mientras que los sensores de tiempo de vuelo (ToF) miden la profundidad para el mapeo 3D en sistemas autónomos y realidad aumentada (THOMAS FOR INDUSTRY, 2023).

Figura 4 Sensor de visión industria



Fuente: Tomado de (Keyence corporation, 2024)

2. Sensores de temperatura

Un sensor de temperatura es un dispositivo diseñado para medir el grado de calor o frío de un objeto. El funcionamiento de un medidor de temperatura depende del voltaje en el diodo. El cambio de temperatura es directamente proporcional a la resistencia del diodo. Cuanto más fría sea la temperatura, menor será la resistencia, y viceversa.

La resistencia a través del diodo se mide y se convierte a unidades de temperatura legibles (Fahrenheit, Celsius, Centígrados, etc.) y se muestra numéricamente en las unidades de lectura. En el campo de la monitorización geotécnica, estos sensores de temperatura se utilizan para medir la temperatura interna de estructuras como puentes, presas, edificios, centrales eléctricas, etc (ENCARDIO, s.f.).

Algunos tipos comunes de sensores de temperatura incluyen detectores de temperatura de resistencia (RTD), termistores y termopares. Los RTD proporcionan lecturas de alta precisión al detectar cambios en la resistencia eléctrica con las variaciones de temperatura, lo que los hace ideales para aplicaciones industriales y de laboratorio. Generalmente fabricados con materiales cerámicos o poliméricos, los termistores ofrecen tiempos de respuesta rápidos y se utilizan a menudo en electrónica de consumo y dispositivos médicos. Los termopares, que consisten en dos cables metálicos diferentes unidos por un extremo, generan un voltaje proporcional a las diferencias de temperatura y son ideales para entornos hostiles y de alta temperatura, como hornos, motores y sistemas aeroespaciales. Con diversas configuraciones disponibles, los sensores de temperatura son cruciales en la automatización de

procesos, la monitorización de la seguridad y la eficiencia energética en múltiples industrias.

Figura 5 Sensor de temperatura tipo termopar



Fuente: Tomado de (National Control Devices, 2024)

3. Sensores de radiación

Los sensores de radiación, también conocidos como detectores de radiación, son dispositivos electrónicos que detectan la presencia de partículas alfa, beta o gamma y transmiten señales a contadores y sistemas de visualización. Son esenciales en la monitorización ambiental, la imagenología médica, las centrales nucleares y las aplicaciones de seguridad industrial.

Estos sensores varían según el tipo de sensor y los niveles de energía mínimos y máximos detectables. Algunos tipos comunes incluyen los tubos Geiger-Müller, que detectan la radiación mediante ionización; los detectores de centelleo, que utilizan la emisión de luz para medir los niveles de radiación; y los detectores semiconductores, que ofrecen alta precisión para aplicaciones de laboratorio e investigación. Los sensores de radiación son fundamentales en las inspecciones de seguridad, los estudios de contaminación y la monitorización de las dosis de radiación en industrias que requieren un estricto cumplimiento normativo.

A continuación, se muestra en la figura 6 Sensor de radiación ionizante Geiger Counter Module SEN0463

Figura 6 Sensor de radiación ionizante Geiger Counter Module SEN0463



Fuente: Tomado de (DFRobot , 2024)

4. Sensores de proximidad

Un Sensor de Proximidad es un dispositivo electrónico capaz de detectar la presencia o el movimiento de un objeto sin necesidad de contacto físico. A diferencia de interruptores mecánicos como los finales de carrera, el Sensor de Proximidad transforma la presencia del objeto en una señal eléctrica de forma no invasiva.

Existen distintos tipos de Sensores de Proximidad, como los inductivos, capacitivos y magnéticos, cada uno diseñado para detectar diferentes tipos de materiales y operar en entornos industriales diversos (CPI, 2025).

Los sensores de proximidad son generalmente dispositivos de corto alcance, pero también están disponibles en diseños que pueden detectar objetos a una distancia de hasta varios centímetros. Un tipo de sensor de proximidad comúnmente utilizado es un sensor de proximidad capacitivo. Este dispositivo utiliza el cambio en la capacitancia resultante de una reducción en la distancia de separación entre las placas de un condensador, una de las cuales está unida al objeto que se observa, para determinar el movimiento y la posición del objeto a partir del sensor

A continuación, se muestra en la figura 7 Sensor de proximidad de tipo inductivo

Figura 7 Sensor de proximidad inductivo



Fuente: Tomado de (Pepperl+Fuchs, 2024)

5. Sensores de presión

Un sensor de presión convierte los cambios mecánicos de presión en gases o líquidos en señales eléctricas. Los tipos más comunes de sensores de presión se basan en el principio piezoresistivo, capacitivo o piezoeléctrico (Baumer, s.f.).

La mayoría de los sensores de presión funcionan mediante un diafragma y un puente de galgas extensométricas, que detecta la fuerza ejercida sobre una unidad de área y la convierte en una señal eléctrica. Sus especificaciones clave incluyen la función del sensor, las presiones de trabajo mínimas y máximas, la precisión a escala real y características especializadas como la salida digital o la resistencia a altas temperaturas. Con una amplia variedad de diseños disponibles, los sensores de presión desempeñan un papel crucial en la dinámica de fluidos, el control de procesos y el diagnóstico de sistemas en numerosas industrias.

A continuación, se muestra en la figura 8 Sensor de presión BMP580:

Figura 8 Sensor de presión BMP580



Fuente: Tomado de (Bosch Sensorte , 2024)

6. Sensores de posición

Definición de sensor de posición: Es un sensor que se utiliza para detectar el movimiento de un objeto y convertirlo en señales aptas para transmisión, control o procesamiento. Estos sensores se utilizan normalmente para medir la distancia del cuerpo desde la posición de referencia. Por lo tanto, detectan la distancia que el cuerpo se ha movido de una posición a otra y esta señal se utiliza frecuentemente como retroalimentación para que el sistema de control tome las medidas pertinentes.

El funcionamiento del sensor de posición depende principalmente de proporcionar control de movimiento, conteo y codificación de diferentes tareas mediante la determinación de la existencia o inexistencia de un objetivo o mediante la detección de su velocidad, dirección, distancia o movimiento (EL PRO CUS, s.f.).

A continuación, se muestra en la figura 9 Sensor de posición de tipo lineal magnetostrictivo BTL

Figura 9 Sensor de posición lineal magnetostrictivo BTL



Fuente: Tomado de (Balluff, 2024)

7. Sensores fotoeléctricos

Los sensores fotoeléctricos son dispositivos electrónicos que detectan objetos dentro de su campo de visión midiendo los cambios en la luz emitida. Además de detectar la presencia de objetos, pueden evaluar el color, la limpieza y la posición, lo que los hace muy versátiles para aplicaciones de automatización y control de calidad.

Estos sensores funcionan mediante un emisor y un receptor, donde el emisor proyecta luz y el receptor detecta las variaciones causadas por el paso de un objeto a través del haz. Se utilizan ampliamente en la fabricación, la manipulación de materiales y la robótica para tareas como el recuento de artículos, el guiado de sistemas de recogida robóticos y el control de puertas y portones automáticos. Su capacidad para proporcionar detección sin contacto los hace esenciales en entornos de alta velocidad y precisión

A continuación, se muestra en la figura 10 Sensor fotoeléctrico W4F.

Figura 10 Sensor fotoeléctrico W4F



Fuente: Tomado de (SICK AG, 2021)

8. Sensores de partículas

Los sensores o detectores de partículas son dispositivos electrónicos diseñados para detectar polvo y partículas en el aire, proporcionando señales para controlar o visualizar sistemas para monitorear la calidad del aire, la eficiencia de la filtración y los niveles de contaminación. Estos sensores se utilizan comúnmente en la monitorización de contenedores industriales y cámaras de filtros, así como en aplicaciones ambientales, médicas y de climatización (HVAC) donde la pureza del aire es una preocupación.

Las especificaciones clave incluyen el tipo de transductor, el tamaño mínimo de partícula detectable, el rango de temperatura de funcionamiento, el volumen de la muestra y el tiempo de respuesta. Los sensores de partículas en ingeniería nuclear se clasifican por separado como detectores de radiación, que están diseñados para detectar partículas alfa, beta y gamma (véase la sección Sensores de radiación). Con la creciente preocupación por la contaminación del aire y la seguridad en el lugar de trabajo, los sensores de partículas son fundamentales para mantener los estándares de aire limpio y el cumplimiento normativo (Thomas net, 2025).

A continuación, se muestra en la figura 11 sensor de partículas (PM1.0, PM2.5, PM10.5) PS5003

Figura 11 Sensor de partículas PM1.0, PM2.5, PS5003



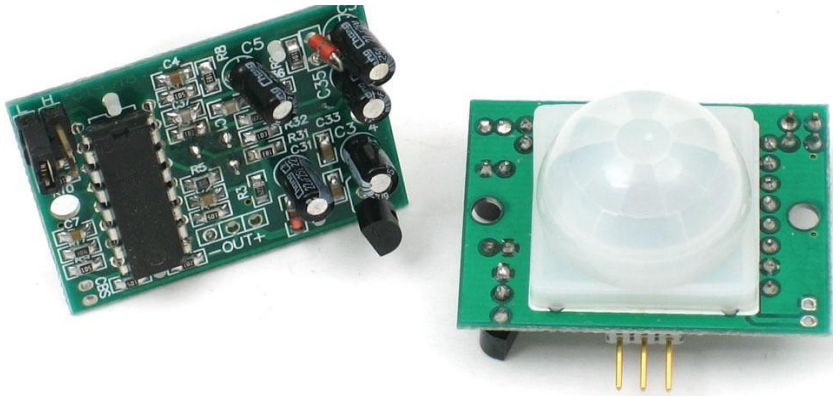
Fuente: Tomado de (Plantower, 2016)

9. Sensores de movimiento

Los sensores de movimiento son dispositivos electrónicos que se activan cuando detectan cualquier movimiento en la zona en la que se encuentran instalados. Funcionan con emisores y receptores de señales. Los sensores de movimiento se colocan en puntos estratégicos y tienen utilidades muy diversas, a pesar de que una de las principales es velar por la seguridad detectando a los intrusos (Grupo Control, 2023).

A continuación, se muestra en la figura 12 Sensor de movimiento PIR HC-SR501

Figura 12 Sensor de movimiento PIR HC-SR501



Fuente: Tomado de (Adafruit Industries, 2023)

10. Sensores de metal

Los sensores y detectores de metal operan mediante campos electromagnéticos para identificar objetos metálicos ferrosos, no ferrosos y acero inoxidable, tanto en seguridad como en industria. Utilizan bobinas para generar un campo que, al ser perturbado por un metal, genera señales eléctricas (corrientes de Foucault) para la detección. Estos sensores pueden ser permanentes o portátiles y utilizan diferentes tecnologías, siendo la inducción electromagnética el método más utilizado (SUMINSA, 2025).

A continuación, se muestra en la figura 13 Sensor inductivo detector de metal.

Figura 13 Sensor inductivo detector de metal



Fuente: Tomado de (Omron Corporation , 2024)

11. Sensores de nivel

Los sensores de nivel son dispositivos electrónicos o mecánicos que miden la altura de líquidos o sólidos a granel en tanques, fundamentales para el control de procesos industriales, prevención de desbordamientos y gestión de stock. Se clasifican en sensores de punto (alarma alto/bajo) y de nivel continuo (Tecnico Z, 2020).

Los sensores de nivel funcionan utilizando diversas tecnologías, incluyendo métodos ultrasónicos, de capacitancia, vibratorios y mecánicos, con diseños disponibles para medición con o sin contacto. Las especificaciones clave incluyen el tipo de sensor, la función y la distancia máxima de detección, lo que permite adaptarlos a aplicaciones que requieren una monitorización precisa del nivel, prevención de desbordamientos y gestión de inventario.

En la siguiente figura 14 se muestra sensor de nievel de tipo ultrasónico.

Figura 14 Sensor Ultrasónico de nivel



Fuente: Tomado de (Endress+Hauser, 2024)

12. Sensores de fugas

Los sensores de fuga son dispositivos esenciales para la seguridad industrial y doméstica, diseñados para detectar escape de agua, gases o fluidos en sistemas presurizados utilizan tecnologías acústicas, ultrasónicas, de humedad o humo para

identificar fallas, previniendo daños estructurales, ineficiencia operativa y situaciones de alto riesgo.

Estos sensores funcionan con diferentes tecnologías según la aplicación. Algunos detectores de fugas ultrasónicos identifican fugas de aire mediante ondas sonoras de alta frecuencia, mientras que otros utilizan agentes espumantes para comprobar la integridad de las juntas de las tuberías. En el envasado al vacío, los detectores de fugas especializados evalúan la eficacia del sellado, garantizando una contención hermética. Al proporcionar monitoreo en tiempo real, los sensores de fugas ayudan a prevenir desperdicios, contaminación y situaciones peligrosas en entornos industriales y comerciales.

En la siguiente figura 15 se presenta imagen de referencia de sensor de fugas

Figura 15 Sensor de fugas Lyric W1



Fuente: Tomado de (Honeywell International , 2017)

13. Sensores de humedad

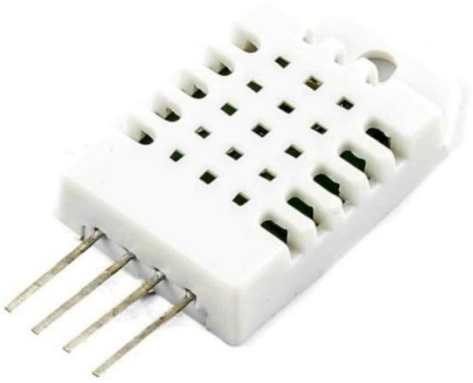
Los sensores de humedad permiten medir la temperatura y la cantidad de humedad relativa en el aire dentro de un espacio específico. Los resultados de estas medidas son transmitidos a impulsos eléctricos, usualmente para disparar un mecanismo mayor.

Son esenciales dentro de maquinarias industriales que operan con componentes químicos, almacenaje de productos secos, medir riesgos en el depósito, detectar fuga en calderas cerradas y, sobre todo, dentro de la industria agroalimentaria para controlar los espacios de invernadero o la necesidad de riego en las plantas.

Los sensores más avanzados pueden medir los niveles de humedad incluso en superficies o dentro de determinadas fibras sintéticas (EDS ROBOTICS, 2022).

En la siguiente figura 16 se presenta imagen de referencia de un sensor de humedad y temperatura

Figura 16 Sensor de humedad y temperatura DTH22 AM2302



Fuente: Tomado de (Aosong Electronics Co, 2015)

14. Sensores eléctricos

Los sensores eléctricos se pueden clasificar según los parámetros eléctricos específicos que miden. Las categorías principales incluyen sensores de corriente, sensores de corriente de efecto Hall, sensores de bobina Rogowski, sensores de corriente de transformador y sensores de tensión. Cada tipo funciona con principios diferentes para detectar y monitorizar las propiedades eléctricas, desempeñando un papel crucial en la gestión de la energía, el diagnóstico de sistemas y la automatización (Thomas net, 2023).

V.- Metodología

La metodología adoptada es de carácter propositivo y documental, orientada al diseño teórico de un sistema de monitoreo ambiental. El estudio se limita a la fase de ingeniería conceptual y de detalle, abarcando desde la selección técnica de sensor de dispersión láser hasta el modelado de la arquitectura de red. No se contempla la ejecución física ni el despliegue de campo, centrando el rigor científico en la validación técnica de los componentes elegidos y la coherencia del diseño frente a los estándares de medición de material particulado.

La validación del sistema se realizó mediante simulación en entorno Wokwi, permitiendo verificar la coherencia del firmware y la arquitectura de comunicación propuesta, sin realizar pruebas experimentales con hardware físico.

5.1. Enfoque de la investigación.

La investigación es de tipo cualitativo-Tecnológico, se centra en la selección de tecnologías, el diseño de la arquitectura del sistema y la definición de protocolos de comunicación que aseguren la integridad de los datos ambientales.

5.2. Alcance del proyecto

Alcance Descriptivo y Propositivo: El proyecto describe los requerimientos técnicos para el monitoreo de aire y propone una solución técnica detallada (diagramas, selección de componentes).

5.3. Métodos de la investigación

Se emplearán métodos de análisis, síntesis, introducción, deducción, comparación y descriptivos para recopilar y analizar la información relacionada con la calidad del aire.

VI.- Desarrollo

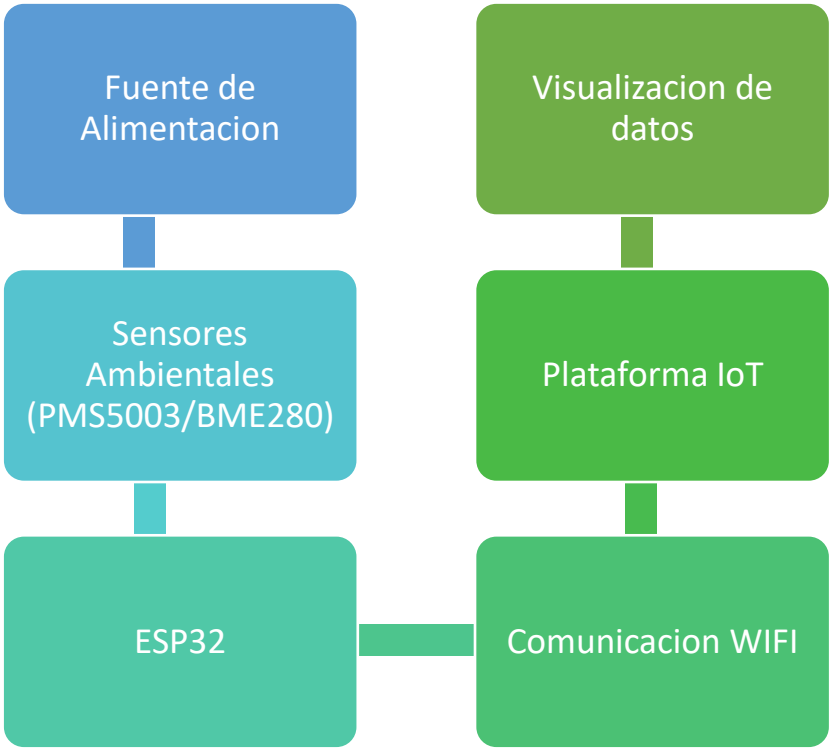
6.1. Diseño de Hardware

En este apartado se muestra la lógica de funcionamiento mediante un diagrama de bloques, y se presenta las consideraciones para selección de componentes.

6.1.1. Diagrama de arquitectura.

A continuación, se muestra en la Figura 17 diagrama de arquitectura.

Figura 17 Diagrama de arquitectura del sistema



Fuente: Elaboración propia

6.1.2. Selección de componentes

1. **Microcontrolador:**

Para el diseño de este trabajo se propone trabajar con el microcontrolador ESP32 ya que es un microcontrolador de bajo costo y alto rendimiento, se destaca por integrar un potente procesador de doble núcleo de 32 bits y opciones de conectividad

inalámbrica en un solo chip, bajo consumo de energía lo que da opción de uso de baterías y posee una amplia gama de pines de entrada/salida de propósito general y soportan varias interfaces como I2C, UART, ADC, DAC

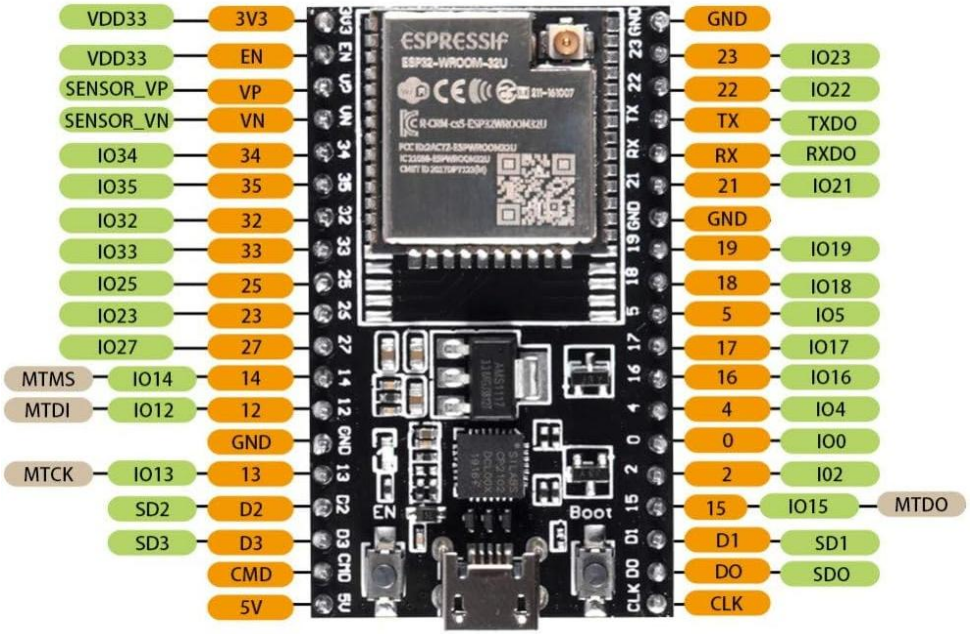
Características Técnicas ESP32:

- Procesador de doble núcleo Xtensa LX6 de 32 bits.
- Frecuencia de operación hasta 240 MHz.
- Memoria SRAM interna de 520 KB.
- Conectividad Wi-Fi 802.11 b/g/n integrada.
- Soporte nativo para protocolos TCP/IP y MQTT.
- Múltiples interfaces UART, I2C, SPI y ADC.

Su integración de conectividad inalámbrica reduce la necesidad de módulos externos, disminuyendo consumo energético y complejidad del diseño, su compatibilidad con entorno Arduino IDE facilita el modelado del firmware.

Se muestra en Figura 18 el ESP32 y su distribución de pines.

Figura 18 Microcontrolador ESP32 y su distribución de pines



Fuente: Adaptado de (Espressif Systems, 2023)

2. Sensor

Para este proyecto proponemos el uso del sensor PMS5003 para la medición de concentración de partículas PM en el aire, debido a que es considerado como un sensor de alta precisión el cual mide la concentración de partículas suspendidas en microgramos por metro cúbico ($\mu g/m3$) para tres tamaños claves:

PM 1.0, Son partículas extremadamente finas como virus, humo y se considera que son capaces de entrar al torrente sanguíneo.

PM2.5, Partículas finas como polvo fino, bacterias.

PM10, Son partículas un poco más gruesas como el polvo.

Fundamento Físico del sensor:

El PMS5003 basa su funcionamiento en el principio de dispersión de luz descrito por la Teoría de Mie. Cuando una partícula atraviesa un haz láser monocromático, la intensidad de la luz dispersada es proporcional al tamaño y composición de la partícula, lo que se resume en una lectura de partículas muchos más alta en comparación con sensores que usan LED, el PMS5003 detecta partículas desde 0.3 µm.

De forma simplificada, la intensidad dispersada puede modelarse como:

$$I(\theta)=I0\cdot f(d,\lambda,m)$$

Donde:

- I(θ)= Intensidad detectada
- I = Intensidad incidente
- d = diámetro de partícula
- λ = longitud de onda del láser
- m = índice de refracción relativo

A continuación, se muestra en la Figura 19 sensor PMS5003.

Figura 19 Vista Superior del sensor PMS5003



Fuente: Adaptado de (Plantower, 2016)

El sensor realiza procesamiento interno y entrega concentración en µg/m³.

Precisión típica especificada por fabricante: ±10% para concentraciones entre 0–500 µg/m³.

Cabe señalar que el procesamiento interno de señal y los algoritmos de conversión a concentración en µg/m³ son propietarios del fabricante, por lo que el análisis presentado corresponde al principio físico general del método de medición

Proceso de Medición Paso a Paso:

1. Aspiración de Aire: El sensor integra un pequeño ventilador interno que genera un flujo de aire constante a través de una cámara oscura.
2. Iluminación Láser: Dentro de la cámara, un diodo láser proyecta un haz de luz concentrado que atraviesa el flujo de aire.
3. Dispersión de Luz: Cuando las partículas suspendidas en el aire cruzan el haz láser, la luz se dispersa en múltiples direcciones.
4. Detección Fotométrica: Un fotodiodo de alta sensibilidad, ubicado en un ángulo específico, capta los destellos de luz dispersada.

5. Procesamiento Digital: El microprocesador interno del sensor PMS5003 analiza la intensidad y el patrón de los destellos según la Teoría de Mie. Esto le permite calcular:

- El tamaño equivalente de las partículas.
- La cantidad de partículas por unidad de volumen.
- La concentración de masa (PM1.0, PM2.5, PM10) en $\mu g/m3$

Sin embargo, como casi todos los sensores ópticos de bajo costo tiene una debilidad física, y es que no distinguen entre una partícula de polvo y una micro gota de agua y/o humedad, esto ocurre debido a la función mediante dispersión laser, entonces cuando la humedad relativa supera entre 60-70 %, las partículas higroscópicas (las que traen agua) aumenta su tamaño debido a absorción de vapor de agua, generando sobreestimaciones en la medición, es decir, que el PMS5003 interpreta esto como un incremento de partículas PM cuando en la realidad es alta humedad.

Para mitigar este efecto, se propone un modelo de corrección aproximado:

Cuando la HR > 75%, se aplica un factor de corrección aproximado k≈ 0.016 mediante la fórmula PMCorregido = PMmedido×(1−k(HR−75)), mitigado así la sobreestimación de partículas en climas húmedos.

Para HR > 75%

Donde:

- HR = Humedad relativa (%)
- k = coeficiente experimental (≈ 0.016)

El coeficiente k corresponde a un valor aproximado tomado de literatura técnica para sensores ópticos de bajo costo y su validación experimental constituye una línea futura de investigación.

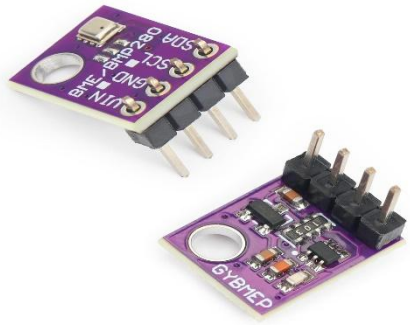
Debido a que el sensor PMS5003 no distingue entre partículas y microgotas de agua (higroscopia), se utiliza el BME280 para obtener la Humedad Relativa (HR)

Sensor BME280

El BME280 es un popular sensor ambiental digital que integra medición de temperatura, humedad relativa y presión atmosférica en un solo chip de bajo consumo. El acrónimo "BME" significa barómetro, higrómetro y termómetro, que son las tres funciones principales del sensor.

1. Medición de humedad: mediante un sensor capacitivo que mide la constate dieléctrica del aire.
2. Medición de presión: Utiliza un sensor conocido como piezorresistivo basado en MEMS (Sistemas Micro Electro-Mecánicos)
3. Medición de temperatura: un termistor integrado mide la temperatura, esta lectura además de reportar la temperatura ambiente, puede compensar las lecturas de presión y humedad, ya que son parámetros que varían con la temperatura.

Figura 20 Vista Superior del Sensor BME280



Fuente: Adaptado de (Bosch Sensortec, 2018)

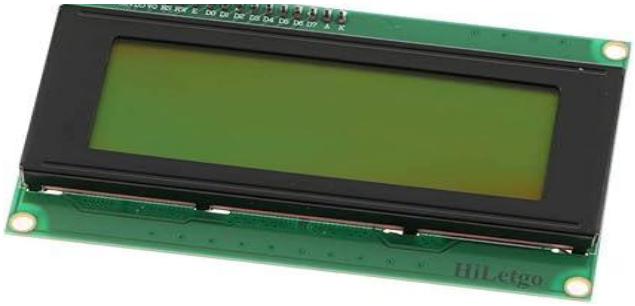
La principal ventaja para el diseño que propone en este documento es que permite la compensación por software para el error de humedad del PMS5003. Al obtener datos de humedad precisos, el EPS32 puede corregir las lecturas del material particulado, haciendo que el sistema de monitoreo de la calidad del aire sea más confiable.

3. Pantalla LCD.

Es un panel delgado y plano que utiliza las propiedades de cristales líquidos para controlar la luz y mostrar imágenes o texto. No emiten luz por sí mismos, por lo que necesitan una retroalimentación, esto lo hace generalmente de Leds. Se propone un LCD de 20x4 dispone de 4 filas de 20 caracteres cada una.

En la siguiente Figura 21 se presenta LCD 20x4:

Figura 21 Pantalla LCD 20X4



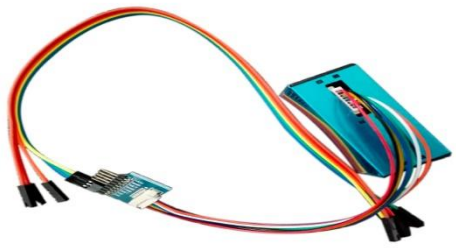
Fuente: Adaptado de (Adafruit Industries, s.f.)

4. Cables de conexión

Los Cables de conexión o jumper se utilizan para interconectar componentes en protoboard y tarjetas de desarrollo como el ESP32 sin tener que soldar, para este proyecto se sugiere comprar el conjunto de cables con la unidad G5 (para conectar a la protoboard) o bien el conjunto de jumper, G5 y sensor PMS5003.

En la Figura 22 se muestra cables de conexión propuestos con unidad G5 integrada.

Figura 22 Cables de conexión o jumper y G5

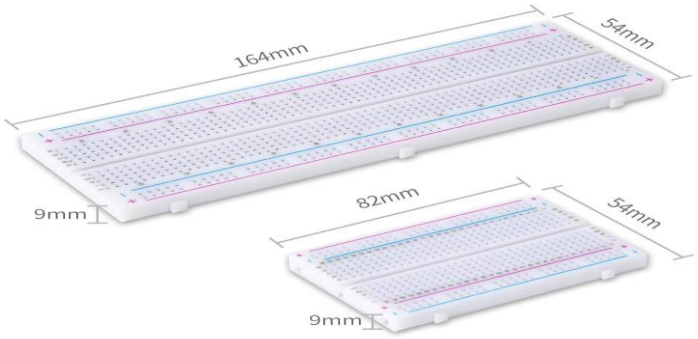


Fuente: Adaptado de (Adafruit Industries, s.f.)

5. Protoboard

EL Protoboard o placa de prueba es una herramienta esencial en el montaje de circuitos electrónicos.

Figura 23 Protoboard o placa de prueba



Fuente: Adaptado de (Adafruit Industries, s.f.)

6. Fuente de poder.

Dispositivo esencial para la transformación de corriente eléctrica de la red (110/120 v) a corriente continua y de bajo voltaje (5v) que es el usa la mayoría de los dispositivos electrónicos.

En Figura 24 se muestra fuente de poder conmutada con entrada universal (110-220V) y salida regulada de 5V DC.

Figura 24 Fuente de poder conmutada

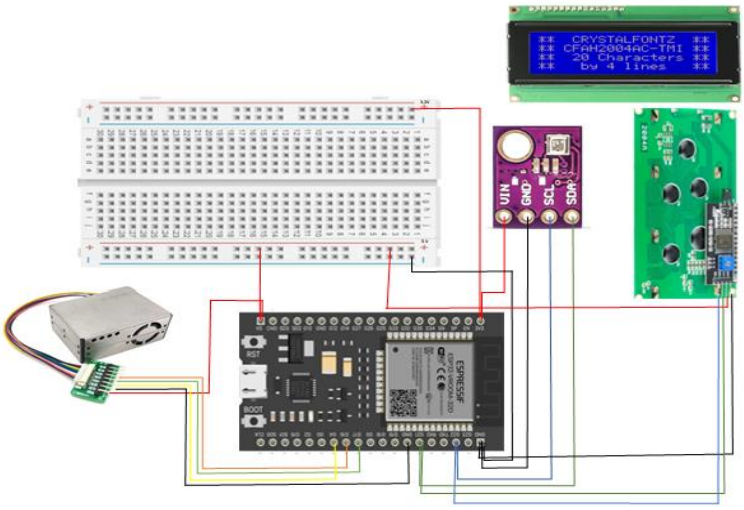


Fuente: Adaptado de (Mean Well, s.f.)

6.1.3. Esquema de conexión:

A continuación, en la Figura 25, se muestra el esquema de conexión del sistema de medición de partículas PM suspendidas en el aire.

Figura 25 Esquema de conexión del sistema



Fuente: Elaboración propia.

Paso 1: Conexion del sensor (PMS5003) al ESP32

El PMS5003 se comunica por UART, usar los pines 16 y 17 ya que son los pines por defecto del segundo puerto serial

1. Primero conectar VCC (Pin 1 PMS5003) al pin VIN del ESP32, el ventilador interno del PMS5003 requiere 5v para funcionar correctamente.
2. Conectar el GND (Pin 2) a cualquier pin GND del EPS32.
3. Conectar TX (pin 5 del PMS) al GPIO 16 (RX2). Esto debido a que el sensor trasmite y el microcontrolador recibe.
4. Conectar RX (Pin 4 del PMS) al GPIO 17 (TX2). Para que el microcontrolador mande comandos al sensor.
5. Conectar SET (Pin 3 del PMS) a GPIO 4. (En el código debe quedar en High para que pueda empezar a medir).

Paso 2: integrando el BME280.

El BME280 utiliza el protocolo I2C, lo que nos permite compartir cables para realizar la conexión de la LCD (opcional).

1. Conectar el pin VIN del sensor al pin 3.3V del ESP32, si se conecta a 5v se podría quemar el sensor.
2. Conectar GND del sensor al GND común, o se puede unir al cable de tierra del PMS5003.
3. Conectar SCL del sensor al GPIO 22 del ESP32.
4. Conectar SDA al GPIO 21 del ESP32.

En Tabla 3 se presenta cuadro representativo de las conexiones de los sensores al ESP32.

Tabla 3 Cuadro representativo de las conexiones de los sensores al ESP32

Sensor	Pin sensor	Pin ESP32
PMS5003	VCC	VIN
PMS5003	TX	GPIO 16
PMS5003	RX	GPIO 17
PMS5003	SET	GPIO 4
BME280	VIN	3.3 V
BME280	SCL	GPIO 22
BME280	SDA	GPIO 21

Fuente: Elaboración propia

6.1.3.1. Consideraciones técnicas

1. Puerto Serial: Se recomienda usar el UART2 (pines 16 y 17) para no interferir con la programación por USB (UART0).
2. Pin SET: Para que el sensor dure años, conecta el Pin 3 a un GPIO.

6.1.3.2. Análisis de compatibilidad Eléctrica y lógica.

Tabla 4 Análisis de compatibilidad eléctrica y Lógica

Componente	Voltaje de Operación	Nivel Lógico	Protocolo
ESP32	3.3 V (VCC)	3.3 V	Maestro
PMS5003	5 V(VCC)	3.3 V	UART (serial)
BME280	1.8V-3.6V	3.3V	I2C/SPI

Fuente: Elaboración propia.

Justificación Técnica

- Compatibilidad de Voltaje: El ESP32 entrega una salida de 3.3V que alimenta directamente al BME280. El sensor PMS5003 requiere 5V para su ventilador interno (disponible en el pin VIN/5V del ESP32), pero opera internamente a 3.3V.
- Compatibilidad Lógica: Todos los componentes operan con niveles lógicos de 3.3V, lo que permite la conexión directa de los pines de datos (SDA/SCL y TX/RX) sin necesidad de conversores de nivel.
- Protocolos: El ESP32 cuenta con múltiples puertos UART (para el PMS5003) e interfaces I2C (para el BME280), permitiendo la lectura simultánea de ambos sensores.

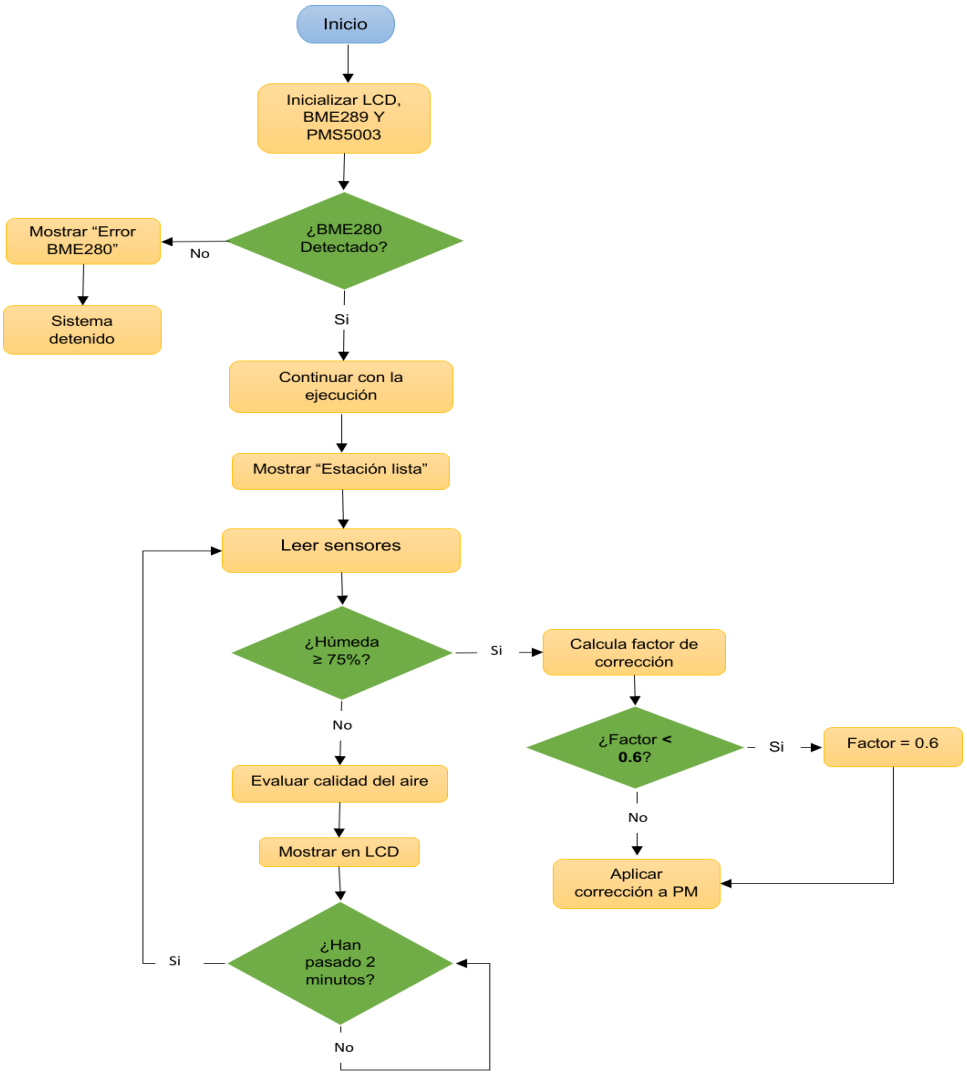
6.2. Diseño de Software.

Diagrama de Flujo.

En este apartado se muestra el código y su funcionamiento.

A continuación, se muestra en la siguiente Figura 26 diagrama de flujo de la lógica del código.

Figura 26 Diagrama de flujo



Fuente: Elaboración propia

Funcionamiento:

Cuando el sistema “se inicia”, el ESP32 hace lo siguiente:

1. Activa el GPIO 4 (SET) para encender el PMS5003.
2. Espera unos 30 segundos (tiempo necesario para que el ventilador del PMS estabilice el flujo de aire).
3. Lee la Humedad del BME280.
4. Lee los PM2.5 del PMS5003.
5. Aplica la corrección: Si la humedad es mayor al 75%, el código resta un porcentaje al valor de PM2.5 para eliminar el error por vapor de agua.
6. Posteriormente se muestra el resultado en la LCD.

6.3. Plataforma de Visualización IoT y Protocolo de Comunicación.

Para la gestión y visualización de los datos recolectados, se ha seleccionado la plataforma ThingSpeak, integrada con el protocolo de comunicación MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). Esta elección se fundamenta en los siguientes criterios técnicos:

6.3.1. Justificación del Protocolo MQTT

A diferencia del protocolo HTTP convencional, MQTT es un protocolo de mensajería ligero basado en el modelo publicador-suscriptor. Es ideal para dispositivos embebidos como el ESP32 debido a:

- Bajo Consumo de Ancho de Banda: Los encabezados de los paquetes son mínimos (2 bytes), lo que reduce la carga de trabajo del microcontrolador y optimiza el uso de la red Wi-Fi.
- Eficiencia Energética: Permite que el dispositivo mantenga una sesión abierta con el servidor (Keep-alive) sin necesidad de renegociar la conexión en cada envío, facilitando el uso de modos de bajo consumo (Deep Sleep).
- Robustez: Garantiza la entrega de mensajes de calidad del aire incluso en condiciones de conectividad inestable.

Se elige por su ligereza (mensajería basada en publicador-suscriptor) y bajo consumo de ancho de banda (encabezados de 2 bytes), ideal para el ESP32 en condiciones de red inestable.

6.3.2. Plataforma de Gestión: ThingSpeak

ThingSpeak actuará como el servidor centralizado (Broker) y la interfaz de usuario. El flujo de datos se describe a continuación:

1. Publicación: El ESP32 empaqueta las lecturas corregidas de PM2.5, PM10, temperatura y humedad en un formato estructurado.
2. Transmisión: Los datos se envían vía Wi-Fi hacia el canal configurado en la nube mediante el protocolo MQTT.
3. Visualización (Dashboard): La plataforma procesa la información y la presenta en tiempo real mediante gráficas de tendencia y widgets indicadores. Esto permite realizar un análisis histórico de la calidad del aire y exportar los datos para evaluaciones estadísticas posteriores.

ThingSpeak se sustenta como plataforma de gestión debido a su capacidad nativa para procesar canales de datos en tiempo real, facilidad de integración con protocolos industriales y herramientas de análisis estadístico integradas para el monitoreo histórico.

A continuación, se muestra en la siguiente Figura 27 diagrama de flujo de datos del sistema IoT. En el cual el microcontrolador ESP32 actúa como nodo sensor procesando la información; los datos son transmitidos de forma inalámbrica mediante un Router Wi-Fi hacia un Broker MQTT (encargado de la mensajería y gestión de protocolos), para finalmente ser visualizados y almacenados en un Dashboard interactivo.

Figura 27 Arquitectura de comunicación y flujo de datos del sistema



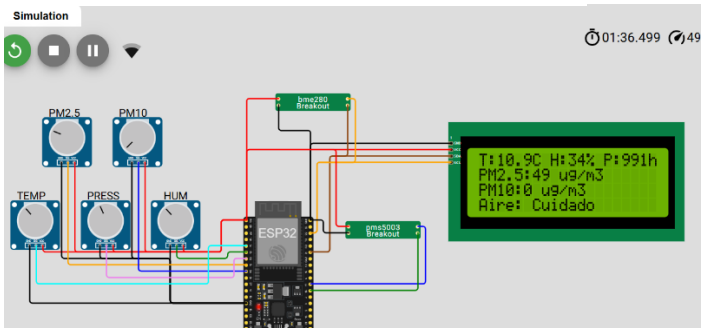
Fuente: Elaboración propia

6.4. Simulaciones

En este apartado se muestran los resultados de simulaciones realizadas en la plataforma digital wokwi de las conexiones del sistema y de la comunicación con la plataforma propuesta

En la siguiente figura 28 se muestra visual del esquema de conexiones realizado en Wokwi

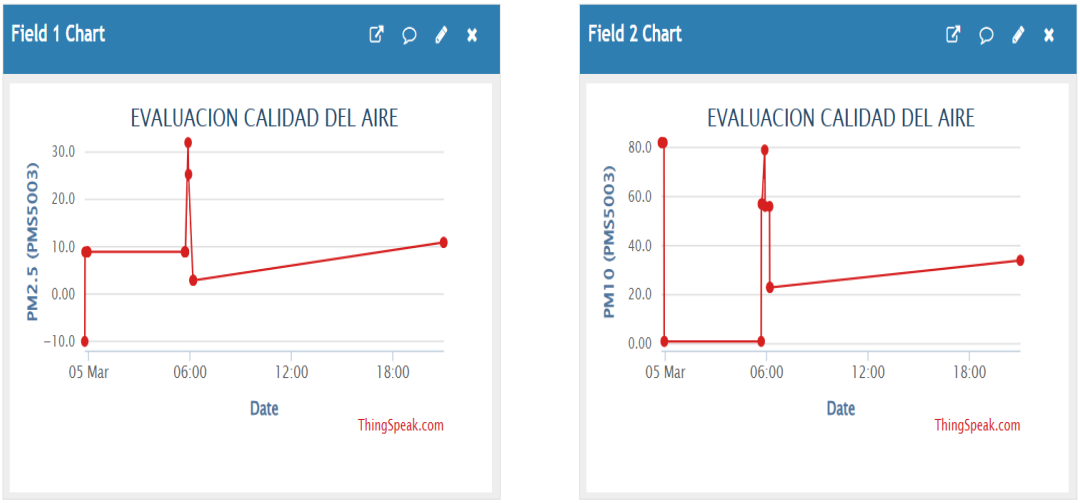
Figura 28 Esquema visual de simulación realizada en Wokwi



.

Fuente: Elaboración propia

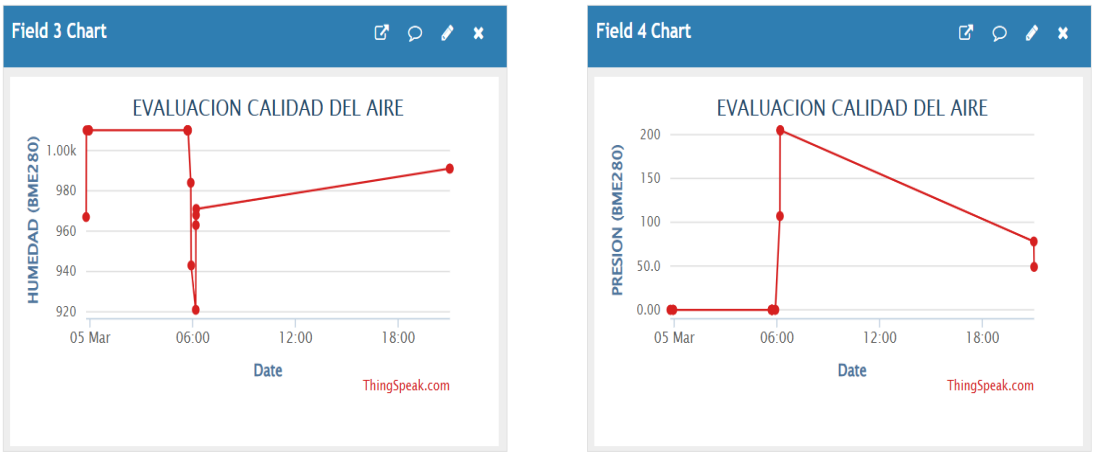
Figura 29 Registro de concentración de partículas PM2.5 y PM10 en la nube



Fuente: Elaboración propia

La figura 30 muestra registro de humedad y presión ambiental (de izquierda a derecha respectivamente

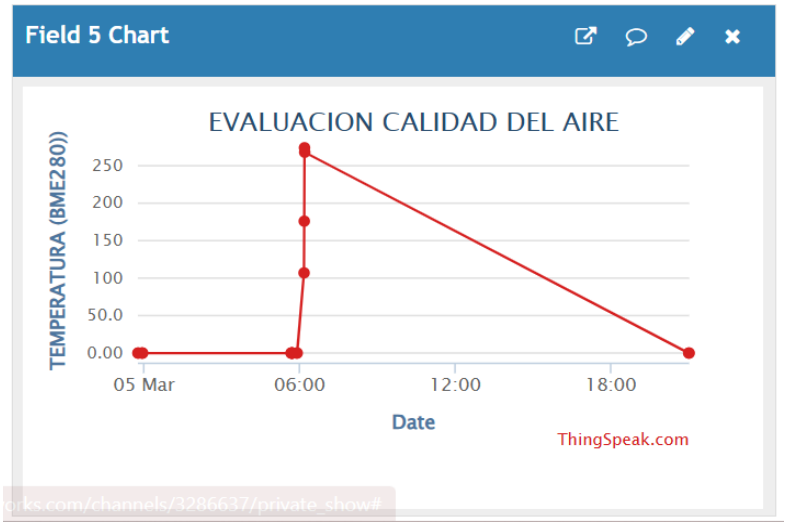
Figura 30 Registro de humedad y presión ambiental en la nube



Fuente: Elaboración propia

La figura 31 muestra registro de temperatura ambiental.

Figura 31 Registro de temperatura ambiental



Fuente: Elaboración propia.

A continuación se muestra código de simulación en la plataforma wokwi

```ino
// Librerias a usar para este proyecto
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <WiFi.h>
#include <PubSubClient.h> //Comunicacion por protocolo MQTT
#include <Adafruit_BME280.h> //Libreria para sensor BME280
#include <PMS.h> //Libreria para PMS5003
// Declaracion variables globales
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4); //LCD y tamaño
WiFiClient espClient; //variable para comunicacion con la nube
PubSubClient client(espClient); //comunicacion MQTT
// declaracion de sensores para la simulacion (bme280 y pm5003)
#ifndef SIMULACION
  Adafruit_BME280 bme;
  PMS pms(Serial2);
  PMS::DATA pmsData;
  #define PMS_RX_PIN 16
  #define PMS_TX_PIN 17
#endif
// configuracion de red wifi y thinkspeak
#define IOT_ENABLED   // sirve para inicializar la conexion con servidor

const char* ssid = "Wokwi-GUEST"; //nombre de la red del simulador
const char* password = "";  // lo dejamos sin contraseña
const char* mqtt_server = "mqtt3.thingspeak.com"; //server por defeault de programa
```

```ino
const int mqtt_port = 1883; // puerto por default
const char* mqtt_client_id = "PCUVBxgQKgADOTkUEAwjGjs"; // client id lo da el programa cuando se crea un proyecto
const char* mqtt_user = "PCUVBxgQKgADOTkUEAwjGjs"; // usuario lo da el programa cuando se crea el proyecto
const char* mqtt_pass = "zCEzKCV3pjBvIdCitRSAJaio"; // lo da el programa junto con el client id y usuario
const char* channel_id = "3286637"; // ide del canal creado

unsigned long lastPub = 0; // declaracion variable para envio datos a la nube
const long pubInterval = 20000; // 20 segundos de espera para el envio a la nube (el minimo de la version gratuita es 15)
// configuracion de datos para los potenciometros
#define SIMULACION   // inicializacion para simulacion (se puede comentar al momento de tener en fisico el circuito)

#ifdef SIMULACION
  #define PIN_TEMP   34   // Temperatura (-10 a 50°C)
  #define PIN_HUM    35   // Humedad (0 a 100%)
  #define PIN_PRES   32   // Presión (950 a 1050 hPa)
  #define PIN_PM25   33   // PM2.5 (0 a 200 µg/m³)
  #define PIN_PM10   39   // PM10 (0 a 300 µg/m³)

  #define POT_RANGE(pin, min, max) (min + (analogRead(pin) / 4095.0) * ((max) - (min))) // formula para mapear los valores
#endif
// declaracion de variables
// temperatura, humedad y presion se declaran tipo float para poder leer decimales
// pm25 y pm10 se declaran tipo uint_16t se usa debido a que los valores de los sensores y se ahorra memoria
float temperatura = 0;
float humedad = 0;
```

```ino
  float humedad = 0;
  float presion = 0;
  uint16_t pm25 = 0;
  uint16_t pm10 = 0;

  unsigned long lastRead = 0; // guarda la utima lectura de los sensores
  const long readInterval = 5000; // 5 segundos
  // configuraciones para conexion a wifi y mqtt

  // conexion a wifi esp32
  void conectarWiFi() {
    Serial.print("Conectando WiFi");
    WiFi.begin(ssid, password);
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
      delay(500);
      Serial.print(".");
    }
    Serial.println("\nWiFi conectado");
  }
  // conexion protocolo mqtt
  void conectarMQTT() {
    while (!client.connected()) {
      Serial.print("Conectando MQTT...");
      if (client.connect(mqtt_client_id, mqtt_user, mqtt_pass)) {
```

```
      Serial.println("conectado");
    } else {
      Serial.print("falló, rc=");
      Serial.print(client.state());
      Serial.println(" reintento en 5s");
      delay(5000);
    }
  }
}
// condicion de la calidad de aire dependiendo cuantas particulas hay
String calidadAire() {
  int cat25 = (pm25 <= 12) ? 1 : (pm25 <= 35) ? 2 : (pm25 <= 55) ? 3 : 4;
  int cat10 = (pm10 <= 50) ? 1 : (pm10 <= 150) ? 2 : (pm10 <= 250) ? 3 : 4;
  int catFinal = max(cat25, cat10);
  return (catFinal == 1) ? "Bueno" : (catFinal == 2) ? "Moderado" : (catFinal == 3) ? "Cuidado" : "Peligroso";
}
// lectura de valores en la simulacion
void leerSensores() {
  #ifdef SIMULACION
    temperatura = POT_RANGE(PIN_TEMP, -10.0, 50.0);
    humedad     = POT_RANGE(PIN_HUM, 0.0, 100.0);
    presion     = POT_RANGE(PIN_PRES, 950.0, 1050.0);
    pm25        = (uint16_t)POT_RANGE(PIN_PM25, 0.0, 200.0);
    pm10        = (uint16_t)POT_RANGE(PIN_PM10, 0.0, 300.0);
  #else
    temperatura = bme.readTemperature();
    humedad     = bme.readHumidity();
    presion     = bme.readPressure() / 100.0;
    if (pms.readUntil(pmsData)) {
      pm25 = pmsData.PM_AE_UG_2_5;
      pm10 = pmsData.PM_AE_UG_10_0;
    }
  #endif
  // Corrección por alta humedad
  if (humedad >= 75.0) {
    float factor = 1.0 - (humedad - 75.0) * 0.016;
    if (factor < 0.6) factor = 0.6;
    pm25 = (uint16_t)(pm25 * factor);
    pm10 = (uint16_t)(pm10 * factor);
    Serial.print("Alta humedad ("); Serial.print(humedad);
    Serial.print("%) - Factor: "); Serial.println(factor);
  }

  Serial.printf("T:%.1f°C H:%.0f%% P:%.0fhPa PM2.5:%d PM10:%d\n",
                temperatura, humedad, presion, pm25, pm10);
```

```
// mensajes en pantalla LCD
// se muestran en pantalla las variables humedad, temperatura, presion, pm2.5 y pm10 y el valor de calidad de aire
void mostrarLCD() {
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.printf("T:%.1fC H:%.0f%% P:%.0fhPa", temperatura, humedad, presion);
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.printf("PM2.5:%d ug/m3", pm25);
  lcd.setCursor(0, 2);
  lcd.printf("PM10:%d ug/m3", pm10);
  lcd.setCursor(0, 3);
  lcd.print("Aire: " + calidadAire()); // dependiendo cuantas particulas haya mostrara mensaje de bueno, malo, peligro
  if (humedad >= 75.0) {
    lcd.setCursor(15, 3);
    lcd.print("*"); // se mostrara asterisco en la pantalla cuando se haya corregido valor por humedad
  }
}
// envio de datos de los sensores a thingspeak
void publicarMQTT() {
  String payload = "field1=" + String(temperatura, 1) +
                   "&field2=" + String(humedad, 0) +
                   "&field3=" + String(presion, 0) +
                   "&field4=" + String(pm25) +
                   "&field5=" + String(pm10);
  String topic = "channels/" + String(channel_id) + "/publish";
```

```
    if (client.publish(topic.c_str(), payload.c_str())) {
      Serial.println("Publicado OK");
    } else {
      Serial.println("Fallo publicación");
    }
  }
  // configuracion para inicializar estacion
  void setup() {
    Serial.begin(9600);
    delay(1000);
    Serial.println("Iniciando estación...");

    // Inicializar LCD
    Wire.begin();
    lcd.init();
    lcd.backlight();
    lcd.print("Cargando");
    delay(2000);
    // Inicializacion sensores fisicos
    #ifndef SIMULACION
      if (!bme.begin(0x76)) {
        lcd.clear();
        lcd.print("Error BME280");
        while (1);
      }
      Serial2.begin(9600, SERIAL_8N1, PMS_RX_PIN, PMS_TX_PIN);
      pms.passiveMode();
    #endif
    // Conecciòn a servidor
    #ifdef IOT_ENABLED
      conectarWiFi();
      client.setServer(mqtt_server, mqtt_port);
      conectarMQTT();
    #endif

    lcd.clear();
    lcd.print("Estacion lista");
    delay(2000);
    lcd.clear();

    leerSensores();
    mostrarLCD();
  }
  // envio de datos a la nube
  void loop() {
  // envio de datos a la nube
  void loop() {
    #ifdef IOT_ENABLED
      if (!client.connected()) {
        conectarMQTT();
      }
      client.loop();
    #endif

    if (millis() - lastRead >= readInterval) {
      lastRead = millis();
      leerSensores();
      mostrarLCD();

      #ifdef IOT_ENABLED
        if (millis() - lastPub >= pubInterval) {
          lastPub = millis();
          publicarMQTT();
        }
      #endif
    }
    delay(10);
  }
```

Nota: Esta versión esta adecuada para la simulación a este código solo se le agrega las variables para los potenciómetros (por cuestiones de simulación) y los chips custom que representan al bme280 y pms5003 están para demostración de conexión, Elaboración propia

VII.- Conclusiones

El presente proyecto permitió el diseño conceptual y modelado funcional de un sistema embebido para el monitoreo de material particulado PM2.5 y PM10 basado en arquitectura IoT, demostrando la viabilidad técnica de integrar sensores ópticos de bajo costo con plataformas de transmisión remota de datos.

El análisis técnico realizado confirmó la compatibilidad eléctrica y funcional entre el microcontrolador ESP32 y los sensores PMS5003 y BME280, estableciendo una arquitectura coherente para adquisición, procesamiento y transmisión de datos ambientales.

Se identificó sensibilidad a condiciones de alta humedad relativa en los sensores ópticos de dispersión láser, lo que puede generar sobreestimaciones en las mediciones. Ante esta situación, se propuso un modelo teórico de compensación por humedad que mejora la confiabilidad potencial del sistema.

El estudio evidenció que el protocolo MQTT constituye una alternativa eficiente para aplicaciones IoT de monitoreo ambiental debido a su bajo consumo de ancho de banda y su robustez en entornos de conectividad variable.

Aunque el trabajo se limita a la fase de diseño conceptual, los resultados obtenidos permiten afirmar que la solución propuesta es técnicamente viable y escalable para futuras implementaciones físicas en entornos urbanos con limitaciones presupuestarias.

VIII.- Recomendaciones

- Construcción física del prototipo y su validación experimental mediante comparación con equipos certificados de medición ambiental.
- Implementar procesos de calibración estadística para mejorar la precisión del sensor PMS5003 bajo diferentes condiciones ambientales.
- Integrar almacenamiento local mediante tarjeta SD para respaldo ante fallas de conectividad.
- Evaluar estrategias de bajo consumo energético utilizando modos Deep Sleep del ESP32.
- Incorporar comunicación segura mediante MQTT sobre TLS para garantizar integridad y confidencialidad de los datos transmitidos.
- Considerar el diseño de encapsulado resistente a condiciones climáticas para permitir despliegue en exteriores.

IX.- Referencias Bibliográficas

Referencias

Adafruit Industries. (s.f.). Adafruit Industries: https://learn.adafruit.com/character-lcds/overview

Adafruit Industries. (s.f.). Adafruit Industries: https://www.adafruit.com/product/1953

Adafruit Industries. (s.f.). Adafruit Industries: https://www.adafruit.com/product/239

Adafruit Industries. (19 de 09 de 2023). https://learn.adafruit.com/pir-passive-infrared-proximity-motion-sensor

Aosong Electronics Co. (17 de 02 de 2015). https://www.digikey.com/htmldatasheets/production/1801448/0/0/1/am2302.html

Aprendiedo Arduino. (26 de 06 de 2016). https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2016/06/26/microcontroladores-2/

Balluff. (25 de 11 de 2024). https://www.balluff.com/en-us/news/new-magnetostrictive-sensor-generation-btl

Baumer. (s.f.). Baumer: https://www.baumer.com/int/es/service-support/funcionamiento/funcionamiento-y-tecnologia-de-sensores-de-presion/a/Know-how_Function_Pressure-sensors

Boudreau, D., McDaniel, M., Sprout, E., & Turgeon, A. (14 de December de 2022). *Pollution*. National Geographic Society: https://education.nationalgeographic.org/resource/pollution/

Bosch Sensorte . (10 de 01 de 2024).

Bosch Sensortec. (2018). Bosch Sensortec: https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme280-ds002.pdf

CPI. (14 de Abril de 2025). CPI: https://cpi.com.ar/blogs/articulos/sensores-de-proximidad

DEWEsoft. (04 de Marzo de 2025). Dewesoft.com: https://dewesoft.com/es/blog/que-es-un-sensor

DFRobot . (12 de 01 de 2024). https://www.dfrobot.com/product-2547.html

EDS ROBOTICS. (21 de Febrero de 2022). EDS ROBOTICS: https://www.edsrobotics.com/blog/tipos-sensores-mas-usados/

EL PRO CUS. (s.f.). EL PRO CUS: https://www.elprocus.com/position-sensor/

Electronica Real. (s.f.). Electronica Real: https://electronicareal.cl/producto/fuente-de-poder-switching-220v-12v-30a-irm10187/?srsltid=AfmBOop4hbdhOS6Z52DDufkeG8oaLtgSWDNFqdoHJjEha_Hj5NcDxquS

ENCARDIO. (s.f.). https://www.encardio.com/blog/temperature-sensor-probe-types-how-it-works-applications

Endress+Hauser. (28 de 02 de 2024). https://www.endress.com/en/field-instruments-overview/level-measurement

EPA.gov. (24 de 06 de 2025). EPA en español: https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles#:~:text=exposici%C3%B3n%20al%20PM?-,%C2%BFQu%C3%A9%20es%20el%20PM%2C%20y%20c%C3%B3mo%20llega%20al%20aire?,uso%20de%20un%20microscopio%20electr%C3%B

Espressif Systems. (2023). Espressif Systems: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf

Grupo Control. (18 de May0 de 2023). Grupo Control: https://grupocontrol.com/tipos-de-sensores-de-movimiento/

Honeywell International . (26 de 05 de 2017). https://phpionline.co.uk/products/lyric-w1-leak-freeze-detector-launched-honeywell/

IBM. (s.f.). IBM: https://www.ibm.com/es-es/think/topics/microcontroller

Keyence corporation. (20 de 02 de 2024). https://www.keyence.com/products/sensor/vision-sensor/

Mean Well. (s.f.). Mean Well: https://www.mercadolibre.com.ec/fuente-de-poder-conmutada-110220-vac-a-5v-5a/up/MECU1557197390#:~:text=Caracter%C3%ADsticas:%20Voltaje%20de%20entrada:%20110/220V%20AC%20(Selector,Conexiones:%20Borneras%20de%20conexi%C3%B3n%20para%20m%C3%BAltiples%20tomas.

Medina Palacios, N. V., & Larios Moraga, C. A. (6 de Junio de 2018). *Sistema de monitoreo remoto, inalámbrico y en tiempo real de los niveles de concentración de dos contaminantes atmosféricos definidos en la norma técnica nicaragüense de calidad del aire.* Retrieved 3 de Mayo de 2023, from Universidad Nacional de Ingeniería: http://ribuni.uni.edu.ni/id/eprint/2316

National Control Devices. (10 de 04 de 2024). https://store.ncd.io/product/industrial-wireless-thermocouple-high-temperature-sensor/

Omron Corporation . (09 de 01 de 2024). https://industrial.omron.eu/en/products/inductive-sensors

OPS/OMS | Organización Panamericana de la Salud. (s.f.). *paho.org*. paho.org: https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire

Organización Mundial de la Salud. (s.f.). *Contaminación atmosférica*. Organización Mundial de la Salud: https://www.who.int/es/health-topics/air-pollution#tab=tab_1

PCB asic. (24 de 11 de 2025). https://www.pcbasic.com/es/blog/microcontroller_vs_microprocessor.html

Pepperl+Fuchs. (05 de 02 de 2024). https://www.pepperl-fuchs.com/en/products/industrial-sensors/proximity-sensors/inductive-sensors-gp31876

Plantower. (2016). Plantower: https://www.plantower.com/en/products_33/66.html

Plantower. (01 de 06 de 2016). https://www.plantower.com/en/products_33/74.html

Rosales Morales, A. M., Delgado Fuentes, A. J., & Canales Molina, H. J. (s.f.). *Creación de una estación de monitoreo ambiental utilizando microcontrolador Arduino Yun y sensores electroquímicos para la realización de mediciones de monóxido de carbono, ozono y material particulado de 2.5 y 10 µm, presentes en el aire en la ciudad de.* Retrieved 28 de Abril de 2023, from Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua - León: http://riul.unanleon.edu.ni:8080/jspui/bitstream/123456789/6813/1/239971.pdf

Sánchez Quintero, L. M., & Barraza Villareal, C. A. (31 de Diciembre de 2018). *Evaluación de la concentración de material particulado PM10 en la región norte – centro histórico de la ciudad de Barranquilla.* https://doi.org/10.1080/00022470.1969.10466535

SICK AG. (25 de 02 de 2021). https://www.sick.com/at/en/w4f-miniature-photoelectric-sensor-performance-to-perfection/w/press-2021-w4f/

SUMINSA. (24 de Nov de 2025). SUMINSA: https://suminsaindustria.com/detector-de-metal/

Tarazona Rincón, P. A. (25 de Mayo de 2018). *Evaluación de la calidad de aire por emisiones de material particulado (PM10) en la vereda Mochuelo-Alto Bogotá D.C.* Retrieved 29 de Abril de 2023, from Universidad El Bosque: https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstream/handle/20.500.12495/3282/Tarazona_Rinc%C3%B3n_Paula_Andrea_2018.pdf?sequence=1

Tecnico Z. (15 de Agosto de 2020). Tecnico Z: https://www.youtube.com/watch?v=_FRgVwnp8Wo&t=1s

THOMAS FOR INDUSTRY. (2023). THOMAS FOR INDUSTRY: https://www.thomasnet.com/articles/instruments-controls/types-of-sensors/

Thomas net. (29 de ov de 2023). Thomas net: https://www.thomasnet.com/articles/instruments-controls/all-about-electrical-sensors/

Thomas net. (2025). Thomas net: https://www.thomasnet.com/articles/instruments-controls/types-of-sensors/

Universidad Europea. (06 de Mayo de 2024). universidad europea.com: https://universidadeuropea.com/blog/que-es-microcontrolador/

VORAGO TECHNOLOGIES. (s.f.). https://www.voragotech.com/technology/mcu-vs-mpu-guide

World Health Organization. (s.f.). *Contaminación del aire ambiente (exterior)*. (W. H. Organization, Editor) Retrieved 29 de junio de 2023, from World Health Organization: https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health

X.- Anexos

```
// Librerias a usar para este proyecto
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <WiFi.h>
#include <PubSubClient.h> //Comunicacion por protocolo MQTT
#include <Adafruit_BME280.h> //Libreria para sensor BME280
#include <PMS.h> //Libreria para PMS5003
// Declaracion variables globales
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4); //LCD y tamaño
WiFiClient espClient; //variable para comunicacion con la nube
PubSubClient client(espClient); //comunicacion MQTT
// declaracion de sensores para la simulacion (bme280 y pm5003)
#ifndef SIMULACION
  Adafruit_BME280 bme;
  PMS pms(Serial2);
  PMS::DATA pmsData;
  #define PMS_RX_PIN 16
  #define PMS_TX_PIN 17
#endif
// configuracion de red wifi y thinkspeak
#define IOT_ENABLED   // sirve para inicializar la conexion con servidor

const char* ssid = "Wokwi-GUEST"; //nombre de la red del simulador
const char* password = "";  // lo dejamos sin contraseña
const char* mqtt_server = "mqtt3.thingspeak.com"; //server por defeault
de programa
const int mqtt_port = 1883; // puerto por default
const char* mqtt_client_id = "PCUVBxgQKgADOTkUEAwjGjs"; // client id lo
da el programa cuando se crea un proyecto
const char* mqtt_user = "PCUVBxgQKgADOTkUEAwjGjs"; // usuario lo da el
programa cuando se crea el proyecto
const char* mqtt_pass = "zCEzKCV3pjBvIdCitRSAJaio"; // lo da el programa
junto con el client id y usuario
const char* channel_id = "3286637"; // ide del canal creado

unsigned long lastPub = 0; // declaracion variable para envio datos a la
nube
const long pubInterval = 20000; // 20 segundos de espera para el envio a
la nube (el minimo de la version gratuita es 15)
// configuracion de datos para los potenciometros
#define SIMULACION   // inicializacion para simulacion (se puede comentar
al momento de tener en fisico el circuito)

#ifdef SIMULACION
  #define PIN_TEMP   34   // Temperatura (-10 a 50°C)
  #define PIN_HUM    35   // Humedad (0 a 100%)
  #define PIN_PRES   32   // Presión (950 a 1050 hPa)
  #define PIN_PM25   33   // PM2.5 (0 a 200 µg/m³)
  #define PIN_PM10   39   // PM10 (0 a 300 µg/m³)
```

```
  #define POT_RANGE(pin, min, max) (min + (analogRead(pin) / 4095.0) *
((max) - (min))) // formula para mapear los valores de potenciometro a
los valores que queremos en los sensores
#endif
// declaracion de variables
// temperatura, humedad y presion se declaran tipo float para poder leer
decimales
// pm25 y pm10 se declaran tipo uint_16t se usa debido a que los valores
de los sensores y se ahorra memoria
float temperatura = 0;
float humedad = 0;
float presion = 0;
uint16_t pm25 = 0;
uint16_t pm10 = 0;

unsigned long lastRead = 0; // guarda la utima lectura de los sensores
const long readInterval = 5000; // 5 segundos
// configuraciones para conexion a wifi y mqtt

// conexion a wifi esp32
void conectarWiFi() {
  Serial.print("Conectando WiFi");
  WiFi.begin(ssid, password);
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }
  Serial.println("\nWiFi conectado");
}
// conexion protocolo mqtt
void conectarMQTT() {
  while (!client.connected()) {
    Serial.print("Conectando MQTT...");
    if (client.connect(mqtt_client_id, mqtt_user, mqtt_pass)) {
      Serial.println("conectado");
    } else {
      Serial.print("falló, rc=");
      Serial.print(client.state());
      Serial.println(" reintento en 5s");
      delay(5000);
    }
  }
}
// condicion de la calidad de aire dependiendo cuantas particulas hay
String calidadAire() {
  int cat25 = (pm25 <= 12) ? 1 : (pm25 <= 35) ? 2 : (pm25 <= 55) ? 3 : 4;
  int cat10 = (pm10 <= 50) ? 1 : (pm10 <= 150) ? 2 : (pm10 <= 250) ? 3 :
4;
  int catFinal = max(cat25, cat10);
  return (catFinal == 1) ? "Bueno" : (catFinal == 2) ? "Moderado" :
(catFinal == 3) ? "Cuidado" : "Peligroso";
}
// lectura de valores en la simulacion
void leerSensores() {
```

```
  #ifdef SIMULACION
    temperatura = POT_RANGE(PIN_TEMP, -10.0, 50.0);
    humedad     = POT_RANGE(PIN_HUM, 0.0, 100.0);
    presion     = POT_RANGE(PIN_PRES, 950.0, 1050.0);
    pm25        = (uint16_t)POT_RANGE(PIN_PM25, 0.0, 200.0);
    pm10        = (uint16_t)POT_RANGE(PIN_PM10, 0.0, 300.0);
  #else
    temperatura = bme.readTemperature();
    humedad     = bme.readHumidity();
    presion     = bme.readPressure() / 100.0;
    if (pms.readUntil(pmsData)) {
      pm25 = pmsData.PM_AE_UG_2_5;
      pm10 = pmsData.PM_AE_UG_10_0;
    }
  #endif
  // Corrección por alta humedad
  if (humedad >= 75.0) {
    float factor = 1.0 - (humedad - 75.0) * 0.016;
    if (factor < 0.6) factor = 0.6;
    pm25 = (uint16_t)(pm25 * factor);
    pm10 = (uint16_t)(pm10 * factor);
    Serial.print("Alta humedad ("); Serial.print(humedad);
    Serial.print("%) - Factor: "); Serial.println(factor);
  }

  Serial.printf("T:%.1f°C H:%.0f%% P:%.0fhPa PM2.5:%d PM10:%d\n",
                temperatura, humedad, presion, pm25, pm10);
}
// mensajes en pantalla LCD
// se muestran en pantalla las variables humedad, temperatura, presion,
pm2.5 y pm10 y el valor de calidad de aire
void mostrarLCD() {
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.printf("T:%.1fC   H:%.0f%%   P:%.0fhPa",   temperatura,   humedad,
presion);
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.printf("PM2.5:%d ug/m3", pm25);
  lcd.setCursor(0, 2);
  lcd.printf("PM10:%d ug/m3", pm10);
  lcd.setCursor(0, 3);
  lcd.print("Aire: " + calidadAire()); // dependiendo cuantas particulas
haya mostrara mensaje de bueno, malo, peligro
  if (humedad >= 75.0) {
    lcd.setCursor(15, 3);
    lcd.print("*"); // se mostrara asterisco en la pantalla cuando se
haya corregido valor por humedad
  }
}
// envio de datos de los sensores a thingspeak
void publicarMQTT() {
  String payload = "field1=" + String(temperatura, 1) +
                   "&field2=" + String(humedad, 0) +
                   "&field3=" + String(presion, 0) +
```

```
                  "&field4=" + String(pm25) +
                  "&field5=" + String(pm10);
  String topic = "channels/" + String(channel_id) + "/publish";
  if (client.publish(topic.c_str(), payload.c_str())) {
    Serial.println("Publicado OK");
  } else {
    Serial.println("Fallo publicación");
  }
}
// configuracion para inicializar estacion
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  delay(1000);
  Serial.println("Iniciando estación...");

  // Inicializar LCD
  Wire.begin();
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  lcd.print("Cargando");
  delay(2000);
  // Inicializacion sensores fisicos
  #ifndef SIMULACION
    if (!bme.begin(0x76)) {
      lcd.clear();
      lcd.print("Error BME280");
      while (1);
    }
    Serial2.begin(9600, SERIAL_8N1, PMS_RX_PIN, PMS_TX_PIN);
    pms.passiveMode();
  #endif
  // Conecciòn a servidor
  #ifdef IOT_ENABLED
    conectarWiFi();
    client.setServer(mqtt_server, mqtt_port);
    conectarMQTT();
  #endif

  lcd.clear();
  lcd.print("Estacion lista");
  delay(2000);
  lcd.clear();

  leerSensores();
  mostrarLCD();
}
// envio de datos a la nube
void loop() {
  #ifdef IOT_ENABLED
    if (!client.connected()) {
      conectarMQTT();
    }
    client.loop();
  #endif
```

```
  if (millis() - lastRead >= readInterval) {
    lastRead = millis();
    leerSensores();
    mostrarLCD();

    #ifdef IOT_ENABLED
      if (millis() - lastPub >= pubInterval) {
        lastPub = millis();
        publicarMQTT();
      }
    #endif
  }
  delay(10);
}
```