

Diseño de un prototipo modular diferenciado para monitoreo de niveles contaminantes medioambientales bajo la implementación de sensores inalámbricos y tecnología IoT

Oscar Hernando Agudelo Méndez

Jesús David Lozano Bernal

Asesor

Gilma Paola Andrade Trujillo

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, tecnología e Ingeniería ECBTI

Ingeniería Electrónica – Ingeniería de telecomunicaciones

2025

Agradecimientos

El presente proyecto aplicado que constituye opción de trabajo de grado para los estudiantes mencionados en la portada, se trabajó dentro de ejercicios propios del Semillero de Instrumentación y Control de la ciudad de Neiva SICON, y recibió beneficios económicos de la convocatoria 11 en la cual fue presentado en el año 2023. Se resalta el apoyo infinito del Ingeniero Pedro Torres en el desarrollo del mismo.

Gilma Paola Andrade

Asesora proyecto.

Resumen

Las actividades humanas se desarrollan en diferentes ambientes los cuales han sido manipulados industrialmente para satisfacer las necesidades puntuales de las personas, lamentablemente estas acciones han arrastrado daños de contaminación al entorno. Hoy en día se sabe que el interés por determinar las causas de los problemas medioambientales es un tema prioritario para la comunidad científica y gubernamental, y es así como desarrollos tecnológicos se posicionan con fuerza para analizar variables medioambientales y activar la conciencia colectiva por la protección del planeta.

La presente propuesta busca diseñar un prototipo modular que analice las condiciones de variables ambientales en el agua y aire, dirigidas a determinar el estado de contaminación de dichos elementos. El prototipo realizara la recolección de información bajo el intercambio de sensores que se alternaran tipo modular dentro del equipo según la necesidad puntal; cada sensor en el sistema se configura para responder a un componente específico, es así como se tendrá la cantidad de sensores igual al número de variables que se desean monitorear. La implementación de sensores inalámbricos permite que la información se obtenga de manera sencilla y precisa, y de la misma forma se procese para obtener resultados fiables que den paso a toma de decisiones frente a determinadas circunstancias. Finalmente, mediante tecnología IoT, los datos recolectados podrán analizarse y visualizarse de manera cuantitativa y cualitativa. Determinar de manera particular el nivel de contaminación en el entorno en el que una persona se desenvuelve constituye el primer paso para gestar acciones de cambio en pro de la preservación del medio ambiente.

Palabras Clave: tecnología, sensores, variables, prototipos, contaminación.

Abstrac

Human activities take place in different environments which have been industrially manipulated to meet the specific needs of people. Unfortunately, these actions have brought about pollution damage to the environment. Nowadays, it is known that the interest in determining the causes of environmental problems is a priority issue for the scientific and governmental community, and this is how technological developments are strongly positioned to analyze environmental variables and activate collective awareness for the protection of the planet.

This proposal seeks to design a modular prototype that analyzes the conditions of environmental variables in water and air, aimed at determining the pollution status of these elements. The prototype will collect information through the exchange of sensors that will alternate in a modular manner within the equipment according to the specific need; each sensor in the system is configured to respond to a specific component, thus the number of sensors will equal the number of variables to be monitored. The implementation of wireless sensors allows the information to be obtained easily and accurately, and in the same way, processed to obtain reliable results that lead to decision-making in certain circumstances. Finally, through IoT technology, the data collected can be analyzed and visualized both quantitatively and qualitatively. Determining the level of pollution in the environment in which a person operates constitutes the first step in generating change actions in favor of environmental preservation.

Keywords: technology, sensors, variables, prototypes, pollution.

Tabla de Contenido

Introducción	17
Título del Trabajo de Investigación	19
Planteamiento del problema.....	20
Justificación.....	23
Objetivos	27
Objetivo General	27
Objetivos Específicos	27
Marco Teórico.....	28
Estado del Arte.....	28
Marco Teórico Conceptual.....	31
<i>Contaminación Ambiental y Agentes Contaminantes</i>	31
Desplazamiento	31
Dilución.....	32
Acumulación	32
<i>Clasificación de los Contaminantes del Aire</i>	32
Contaminantes primarios.....	32
<i>Sensores Medioambientales</i>	33
<i>Sensor de Temperatura</i>	34
<i>Sensor de Humedad</i>	34
<i>Sensor de Gas</i>	35
Tecnología IOT	35
Protocolos de Comunicaciones de Internet de las Cosas	36

<i>Sigfox</i>	37
<i>Comunicación Celular</i>	37
<i>6LOWPAN</i>	37
<i>Zig Bee. Zig Bee</i>	37
<i>Radio Frequency Identification</i>	38
Marco Legal y Normativo	38
<i>Normativa Ambiental en Colombia</i>	38
Ley 99 de 1993.....	38
Ley 1333 de 2009.....	38
Resolución 2254 de 2017 del IDEAM	39
Resolución 676 de 2022 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	39
Decreto 1594 de 1984	39
<i>Normas Técnicas</i>	39
Normas ICONTEC (NTC).....	39
Normas Internacionales ISO	39
<i>Normativa sobre Tecnologías IoT y Protección de Datos</i>	39
Ley 1581 de 2012 (Ley de Protección de Datos Personales)	39
CONPES 3975 de 2019.....	40
Ley 1341 de 2009 (modificada por la Ley 1978 de 2019).....	40
Marco Tecnológico.....	40
<i>Sensores Ambientales Puntuales</i>	40
<i>Sensores de Material Particulado (PM2.5 y PM10)</i>	40

Tecnología utilizada	40
<i>Sensores de Gases Contaminantes (COVs, NH₃, CO₂)</i>	41
Tecnología utilizada	41
Aplicación.	41
<i>Sensores de Temperatura y Humedad</i>	41
Tecnología utilizada	41
Aplicación	41
<i>Sensores de Oxígeno Disuelto (OD)</i>	41
Tecnología utilizada	41
Aplicación	41
<i>Sensores de PH</i>	42
Tecnología utilizada	42
Aplicación	42
<i>Plataforma de Procesamiento y Control</i>	42
Conectividad Inalámbrica	42
Capacidad de procesamiento	42
<i>Tecnología de Comunicación Inalámbrica (IoT)</i>	42
Wi-Fi	42
LoRa (opcional).....	43
Bluetooth	43
<i>Plataforma de Almacenamiento y Análisis de Datos</i>	43
Almacenamiento en la Nube	43
Almacenamiento Local.....	43

<i>Algoritmos de Procesamiento y Análisis de Datos</i>	43
Filtrado de Datos.	43
Reconocimiento de Patrones.	44
<i>Integración Modular y Escalabilidad</i>	44
Marco Contextual	44
<i>Metodología</i>	46
Diseño de la Investigación	46
Manipulación de Variables Independientes.....	46
Observación del Efecto sobre Variables Dependientes.....	47
Control de Condiciones Experimentales	47
Aplicación de la Comparación y Validación.....	47
Iteración y Repetibilidad	48
<i>Enfoque de la Investigación</i>	48
<i>Población</i>	49
<i>Fase 1. Estudios Preliminares</i>	51
Definición de Variables a Analizar	52
Comportamiento Natural de las Variables	52
PM2.5 / PM10	52
Gases Contaminantes	52
<i>Temperatura y humedad relativa</i>	53
<i>Oxígeno Disuelto</i>	53
<i>Temperatura del Agua</i>	53
Criterios para Determinar Contaminación.....	53

Condiciones Climáticas de Referencia.....	55
<i>Calidad del Agua</i>	55
Oxígeno Disuelto (OD).....	55
Temperatura del Agua.....	56
<i>Parámetros de Medición y Métodos Utilizados</i>	56
<i>Principio de medición de Dispersión láser (light scattering)</i>	57
Descripción técnica	57
<i>Principio de Medición, Variación de la Conductividad Eléctrica (SnO₂)</i>	57
Descripción técnica	57
<i>Medición de Parámetros de Calidad del Agua</i>	58
a) pH.....	58
b) Oxígeno Disuelto (OD).....	58
<i>Sensores Seleccionados</i>	60
<i>Sensores Aire</i>	61
El sensor SDS011 de Nova Fitness.....	61
Sensor de Gases.....	62
Sensor de Temperatura y Humedad	63
<i>Sensores Agua</i>	64
Sensor de Temperatura de Agua DS18B20.....	64
Sensor de Oxígeno Disuelto SEN0237-A (DFRobot).....	65
Sensor de pH Analógico (DFRobot)	66
<i>Materialización del Prototipo</i>	67
Prueba y Reconocimiento Operativo de Sensores.....	67

Ejercicio de Monitoreo y Validación de Rangos	69
Análisis de Laboratorio y Establecimiento de Estándares	69
Diseño Electrónico de los Módulos de Sensado	70
Diseño de la Tarjeta de Procesamiento y Control	72
Diseño del Sistema de Abastecimiento de Energía.....	77
<i>Fase 3 Sistema de Adquisición y Procesamiento de Datos.....</i>	<i>78</i>
Nodo Agua	79
Sensor de Oxígeno Disuelto.....	79
Sensor DS18B20.....	79
Sensor de pH.....	79
Sensor de Turbidez.....	79
Sensor de Conductividad.....	79
Módulo GPS Neo 6.....	79
Radio EBYTE LORA.....	79
Gateway.....	79
Tecnología Utilizada	80
<i>Implementación Arduino Uno.....</i>	<i>84</i>
Lectura de sensores ambientales	84
Configuración del Hardware	85
<i>Fase 4 Transmisión de la Información.....</i>	<i>116</i>
Tecnología Lora (Modulo sx1278).....	117
<i>Protocolo de Red Lorawan</i>	<i>117</i>
Estructura de la Red	119

Topología	119
Prototipo Dispositivos	119
Arquitectura del Sistema de Transmisión	121
<i>Nodos remotos sensores.</i>	121
<i>Módulo LoRa</i>	121
<i>Gateway ESP32 + LoRa</i>	121
<i>Enlace Hacia la Nube o Servidor</i>	122
<i>Funcionamiento General del Sistema</i>	122
b) Transmisión LoRa.....	122
c) Recepción y decodificación en el Gateway	122
d) Procesamiento y retransmisión Wi-Fi. El ESP32 del Gateway	123
e) Visualización y Análisis.....	123
f) Ventajas Funcionales del Sistema	123
<i>Fase 5 Visualización y Disposición de la Información</i>	124
Flujo General de la Información	124
Almacenamiento y Gestión de Datos	126
Análisis de Resultados	133
Pruebas Experimentales.....	133
<i>Análisis de Resultados</i>	138
<i>Interpretación</i>	138
Promedio de Diferencias (Mean)	138
Dispersión (Std)	138
Distribución.....	139

Conclusiones	141
Referencias Bibliográficas.....	143
Apéndices	146

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Criterios de Contaminación Material Particulado</i>	54
Tabla 2 <i>Gases Contaminantes y Efectos</i>	54
Tabla 3 <i>Clasificación de la Calidad del Agua</i>	55
Tabla 4 <i>Estado del Agua Según el Oxígeno Disuelto</i>	56
Tabla 5 <i>Sensores Seleccionados</i>	60
Tabla 6 <i>Bandas de Frecuencias en Lorawan</i>	118
Tabla 7 <i>Componentes del Gateway</i>	123
Tabla 8 <i>Datos Experimentales Obtenidos</i>	133
Tabla 9 <i>Resultados Puntuales</i>	138

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Ámbitos de Aplicación de los Sensores Ambientales</i>	33
Figura 2 <i>Departamento del Huila</i>	45
Figura 3 <i>Arquitectura del Sistema</i>	50
Figura 4 <i>Fases de Desarrollo de la Propuesta</i>	51
Figura 5 <i>Sensor de Material Particulado NOVA FITNESS SDS011</i>	61
Figura 6 <i>Sensor de Gases MQ-135</i>	62
Figura 7 <i>Sensor de Temperatura y Humedad DHT22(AM2302)</i>	63
Figura 8 <i>Sensor de Temperatura de Agua DSI8B20</i>	64
Figura 9 <i>Sensor de Oxígeno Disuelto SEN0237-A (DFRobot)</i>	65
Figura 10 <i>Sensor de pH Analógico (DFRobot)</i>	66
Figura 11 <i>Pruebas de Laboratorio</i>	68
Figura 12 <i>Ensamble Elementos</i>	68
Figura 13 <i>Cajas de Soporte</i>	70
Figura 14 <i>Planos Diseño Cajas</i>	71
Figura 15 <i>Posicionamiento Elementos Dentro de la Caja de Soporte</i>	71
Figura 16 <i>Diagramas PCB Lado Dispositivos</i>	72
Figura 17 <i>Diagramas PCB Lado Conexiones</i>	73
Figura 18 <i>Placa Sensores Agua</i>	73
Figura 19 <i>Placa Sensores Aire</i>	74
Figura 20 <i>Tarjeta Sensores Agua</i>	74
Figura 21 <i>Tarjeta Sensores Agua Vista Superior</i>	75

Figura 22 <i>Módulo Sensores Agua</i>	75
Figura 23 <i>Tarjeta Sensores Aire Vista Superior</i>	76
Figura 24 <i>Tarjeta Sensores Aire</i>	76
Figura 25 <i>Dispositivo Terminado</i>	77
Figura 26 <i>Módulo Gateway</i>	80
Figura 27 <i>Arquitectura de la Red de Comunicaciones Basada en LORA</i>	82
Figura 28 <i>Infraestructura Nodo Aire</i>	82
Figura 29 <i>Infraestructura Nodo Agua</i>	83
Figura 30 <i>Infraestructura Gateway</i>	83
Figura 31 <i>Topología Estrella</i>	118
Figura 32 <i>Presentación de la Información</i>	128
Figura 33 <i>Código App</i>	131
Figura 34 <i>Interfaz Visual de la App</i>	131
Figura 35 <i>Visualización de Datos en la App</i>	132
Figura 36 <i>Icono de la App</i>	132
Figura 37 <i>Estación del Sistema en Fontibón</i>	136
Figura 38 <i>Comparación de Datos de Registro</i>	137

Lista de Apéndices

Apéndice A <i>Medidor Analógico de Conductividad Eléctrica Gravity</i>	150
Apéndice B <i>Kid de Medidor de Ph Analogico Gravity V2 SKU SEN0161V2</i>	151
Apéndice C <i>Sensor Analógico de Oxígeno Disuelto Gravity SKU SEN0237</i>	152
Apéndice D <i>Sensor de Turbidez SKU SEN0189</i>	153

Introducción

El crecimiento urbano, industrial y agrícola ha intensificado la presión sobre los ecosistemas, generando un aumento progresivo de contaminantes en el aire, el agua y el suelo. Esta situación representa una amenaza directa para la salud humana, la biodiversidad y el equilibrio ecológico. En este contexto, el monitoreo ambiental continuo y en tiempo real se ha convertido en una necesidad prioritaria para las entidades gubernamentales, instituciones académicas y empresas comprometidas con la sostenibilidad y la mitigación del impacto ambiental.

En los últimos años, el desarrollo tecnológico ha permitido la integración de sensores inalámbricos y plataformas de Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) en sistemas de monitoreo ambiental, ofreciendo soluciones eficientes, escalables y de bajo costo. Estas tecnologías posibilitan la recolección, transmisión y análisis de datos en tiempo real, lo que facilita la toma de decisiones informadas y oportunas frente a eventos de contaminación o alteraciones significativas en la calidad ambiental.

Sin embargo, muchos de los sistemas existentes presentan limitaciones en cuanto a su adaptabilidad a diferentes contextos geográficos, económicos y funcionales, así como en su capacidad para integrar múltiples variables ambientales en un solo dispositivo. Por ello, se hace necesaria la creación de soluciones más flexibles y modulares que puedan ser personalizadas de acuerdo con las necesidades específicas del entorno y del usuario final.

En este marco, el presente proyecto tiene como objetivo diseñar un prototipo modular diferenciado para el monitoreo de niveles contaminantes medioambientales, basado en la implementación de sensores inalámbricos y tecnología IoT. Este sistema permitirá medir en tiempo real variables críticas como material particulado, compuestos orgánicos volátiles (COVs),

monóxido de carbono, temperatura, humedad relativa, así como parámetros de calidad del agua como pH, oxígeno disuelto, turbidez, temperatura y conductividad. La modularidad del diseño facilitará su adaptación a distintos escenarios de uso, promoviendo su aplicabilidad en zonas urbanas, rurales e industriales, con un enfoque de sostenibilidad, eficiencia energética y bajo costo.

Título del Trabajo de Investigación

Diseño de un prototipo modular diferenciado para monitoreo de niveles contaminantes medioambientales bajo la implementación de sensores inalámbricos y tecnología IOT

Planteamiento del Problema

La evolución industrial, el desarrollo tecnológico y la actitud social de excesivo consumo ha traído consigo daños colaterales para el estado natural del planeta. Los impactos negativos medioambientales parten del mal uso de los recursos naturales y de la baja protección para con estos; la emisión de gases, el descontrolado uso de fungicidas, abonos y químicos, las concentraciones de gases invernadero, incluso los cambios meteorológicos provocan contaminación.

El agua y el aire pueden ser contaminados en diferentes procesos cuando sustancias nocivas están en contacto con ellas. Son muchas las fuentes contaminantes, entre ellas: los vehículos de combustión, los procesos de generación de energía, la incineración de residuos, los procesos de transformación inmersos dentro de las industrias de todo tipo, etc. Es de conocimiento general que una cadena interminable de estos desechos atmosféricos cae en forma de lluvia contaminando el agua y el suelo de los ecosistemas de nuestro planeta, en unos sectores de manera más determinante que en otros. Lastimosamente la contaminación ambiental tiene su origen en actividades humanas, situaciones que lo perjudican en temas de salud y supervivencia.

La organización mundial de la salud en su página institucional tiene un capítulo especial dirigido a la contaminación atmosférica, en el mismo manifiesta: “Los aparatos domésticos de combustión, los vehículos de motor, las instalaciones industriales y los incendios forestales son fuentes habituales de contaminación de aire”. Además, resalta que “Los contaminantes más preocupantes para la salud pública son las partículas en suspensión, el monóxido de carbono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre”. Estos elementos altamente nocivos provocan enfermedades de tipo respiratorio siendo un índice de alta mortalidad en el planeta.

“La contaminación del aire (ambiente exterior) en las ciudades y las zonas rurales crea partículas finas que causan accidentes cerebrovasculares, cardiopatías, cáncer de pulmón y enfermedades respiratorias agudas y crónicas”.

Esta problemática es una realidad constante y afecta a todos los habitantes del planeta, por ello la mayoría de los gobiernos y sus entes administrativos invitan a poner en marcha acciones que concienticen sobre la situación, para que se desarrollen estrategias que mitiguen esta problemática. Muchas empresas y/o usuarios particulares carecen de tecnología que les permita cuantificar las condiciones ambientales de un sector y obtener información de este tipo, quizás por el alto costo o por la ausencia de recursos tecnológicos.

Todo empieza desde pequeñas acciones, tanto la contaminación como la solución; de manera doméstica en los hogares y sitios de trabajo casi siempre no hay cuidado para el manejo de basuras ni para la implementación adecuada de artefactos que pueden resultar contaminantes, incluso los vehículos automotores no cuentan con la revisión adecuada de emisión de gases. Igualmente, en las zonas rurales no hay un proceso adecuado para proteger las fuentes hídricas o para la eliminación adecuada de residuos puntuales.

Parte de la problemática se puede enfocar en que la sociedad necesita información local sobre el estado del medio ambiente que le circunda, y que el deseo de cuantificar o analizar esta condición por un usuario determinado es compleja dado los temas tecnológicos y los costos que en ocasiones no son alcanzables. Esta razón hace que el ciudadano común no pueda tener acceso a este tipo de información del medio que le rodea.

Dentro de la conciencia colectiva que por la protección del medio ambiente se está promulgando a nivel mundial y en consecuencia por determinar los agentes que más contaminan el medio, surge la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo se puede medir la calidad del ambiente en función de sus propiedades naturales y agentes contaminantes bajo la implementación de tecnología de punta que permita el análisis de sus condiciones particulares?

Iniciar con tener una concepción cuantitativa y cualitativa de los contaminantes del lugar puede ser el comienzo de acciones correctivas, y para tal fin la implementación de sensores medioambientales y tecnología IoT es la solución.

Justificación

Es directriz mundial velar por el bienestar del medio ambiente y en función de ello por controlar las acciones contaminantes que de manera particular cada ser humano genera y que contribuyen negativamente a su deterioro. El medio ambiente interviene de manera directa con nuestra salud y bienestar, por ello es imperativo ejecutar planes de recuperación y protección. La Organización Mundial de la Salud resalta en su página web: “La calidad del aire está estrechamente relacionada con el clima del planeta y los ecosistemas de todo el mundo. Muchas de las fuentes de contaminación atmosférica (por ejemplo, la quema de combustibles fósiles) emiten también gases de efecto invernadero. Por consiguiente, las políticas orientadas a reducir la contaminación del aire son una estrategia beneficiosa para el clima y la salud, pues reducen la carga de morbilidad y ayudan a mitigar el cambio climático a corto y largo plazo”.

En la actualidad se gestan políticas y se redireccionan inversiones económicas que respaldan el desarrollo de propuestas tecnológicas en pro de esta tarea global de recuperación y preservación.

La presente propuesta se justifica inicialmente desde el interés de aportar desde la educación herramientas y metodologías tecnológicas que contribuyan a la conciencia de preservación del medio ambiente, y a la necesidad de adecuar procedimientos ingenieriles de alcance inmediato, que desde una gestión educativa contribuyan a esta tarea universal.

Por otro lado, tecnológicamente hablando, la implementación de sensores ambientales está en auge; estos dispositivos han experimentado un gran desarrollo gracias a capacidades como precisión, fiabilidad, bajo consumo energético, tamaño y forma. Prototipos que se diseñan bajo la implementación de sensores inalámbricos como el expuesto en la presente propuesta

ofrecen grandes posibilidades en eficacia operativa y reducción de costos, sin dejar de lado su gran funcionalidad para proteger la salud de la humanidad y la seguridad del planeta.

¿Por qué implementar tecnología de redes de sensores ambientales?

El “prototipo modular diferenciado para monitoreo de niveles contaminantes medioambientales bajo la implementación de sensores inalámbricos y tecnología IoT”, busca adecuar tecnología de punta bajo el uso de sensores especializados en analizar variables medioambientales y transmitirlos de manera integral con un sistema de comunicación apoyado en tecnología IoT que permita el análisis de datos recopilados y su uso posterior.

Anteriormente el análisis se realizaba bajo tecnologías más dispersas, inexactas, y procedimentales. Hoy en día, los dispositivos de sensores han alcanzado modos de funcionamiento autónomos, eficaces e inteligentes. Características como las que se listan a continuación hacen que la elección de este tipo de elementos sea lo ideal para el propósito del presente proyecto:

- Los costos reducidos de la tecnología a implementar, que permite que los sensores pasen de pertenecer a aplicaciones especializadas y sean más accesibles en aplicaciones domésticas.
- Mayor funcionalidad y versatilidad de los sensores, que facilita su ejercicio en diferentes ámbitos o bajo distintos objetivos de trabajo.
- Adecuada integración con los actuales softwares de análisis de señales de los sensores, tema que le agrega sofisticación y sensibilidad al sistema en general.
- La innovación continua que este tipo de tecnologías desarrolla a nivel comercial en temas de materiales, las técnicas de detección, fabricación y empaquetado, que mejoran la sensibilidad al elemento.

- Miniaturización, dada la creciente tendencia a incluir sistemas microelectromecánicos (MEMS) y, más recientemente, los sistemas nano electromecánicos (NEMS) en dispositivos de detección ha mejorado enormemente la precisión y fiabilidad de los sensores.
- La tecnología de empaquetado que disminuye la incertidumbre en las mediciones, mejorando la reproducibilidad y estabilidad del sensor incluso en aplicaciones intensivas.
- La integración tecnológica que permite el uso de varios sensores en un solo dispositivo para aplicaciones masivas.
- El acoplamiento que se puede realizar entre distintos tipos de sensores, como químicos, físico o biológicos, los cuales se integran para trabajar en un fin común en un mismo sensor. Por ejemplo, para medir acidez.
- La normalización en seguridad que permite en la actualidad que la información recibida de los sensores no sea vulnerada o manipulada por receptores no autorizados.

Por otro lado, La tecnología IoT presenta las siguientes ventajas operativas:

- Versatilidad en tecnologías relacionados a sensores inalámbricas que permiten la instalación y configuración de los dispositivos, así como el acople de estos.
- Reducción de costos en la implementación del sistema en general.
- Facilidad en la conversión y transmisión de la información recolectada gracias a la tecnología IoT implementada y a los sistemas de comunicación que hoy en día existen.
- Análisis práctico de los datos para toma de decisiones, en dispositivos inteligentes, información a la mano.
- El prototipo de monitoreo medioambiental constituirá una herramienta clave para que una empresa o persona desde su ubicación espacial (urbana o rural) pueda determinar el

grado de contaminación bien sea del aire o del agua y frente a ello pueda gestionar medidas correctivas y preventivas.

La presente propuesta permitirá el desarrollo de dos documentos alternos que se presentaran como opciones de trabajo de grado en la modalidad proyecto aplicado, para los programas de Ingeniería Electrónica e Ingeniería de Telecomunicaciones de los estudiantes participantes. Cada uno de ellos desarrollará a profundidad las etapas de diseño modular de los sensores y desarrollo del sistema de comunicaciones respectivamente.

Objetivos

Objetivo General

Diseñar un prototipo modular diferenciado para identificación y análisis de niveles contaminantes en el medio ambiente (agua y aire), bajo la implementación de sensores inalámbricos y tecnología IoT, en locaciones particulares del departamento del Huila.

Objetivos Específicos

Realizar un estudio preliminar en el que se determinen los agentes contaminantes que pueden afectar el agua y aire, identificando el proceso de análisis y medición de estos.

Realizar el diseño electrónico del prototipo modular integrador, definiendo las características operativas de sus elementos electrónicos conformantes.

Seleccionar, probar y parametrizar (pruebas de validación) los sensores medioambientales a implementar en los módulos rotativos del prototipo para la recolección de datos.

Definir el método de análisis, tratamiento y acondicionamiento de los datos obtenidos de los sensores.

Definir el tipo y sistema de comunicación implementado para enlazar sensores y la plataforma IoT, con su respectivo software.

Diseñar la aplicación de apoyo para la visualización y almacenamiento de la información recolectada por los sensores inalámbricos.

Marco Teórico

Estado del Arte

Muchos estudios se han adelantado en pro de proteger uno de los legados que requiere ser vigilado con mayor urgencia: el medio ambiente. La tecnología en manos del ser humano ha desarrollado sistemas que permiten monitorizar y procesar redes sensoriales apoyados redes como internet para llevar un control constante de sucesos y fenómenos.

Un equipo de investigadores del Instituto Politécnico Nacional SEPI, ESIME Azcapotzalco - México en el año 2016, desarrollaron un proyecto denominado: “Sistema sensor para el monitoreo ambiental basado en redes Neuronales”. Este trabajo consistía en:

Desarrollo de un sistema sensor prototipo creado para identificar contaminantes en el ambiente. Este prototipo está conformado con un arreglo de sensores de gas de óxido de estaño SnO₂ utilizados para identificar vapores químicos, una etapa de adquisición de datos implementada con una plataforma ARM (Advanced RISC Machine) de bajo costo (Arduino) y una red neuronal capaz de identificar contaminantes ambientales automáticamente. La red neuronal se utiliza para identificar la composición del contaminante censado. En el sistema de cómputo, la carga computacional intensa se presenta únicamente en el proceso de entrenamiento, una vez que la red neuronal es entrenada, la operación consiste en propagar los datos a través de la red con una carga computacional mucho más ligera. (Rubio, 2019 pp 212).

Básicamente lo que ellos plantearon fue una nariz electrónica que ensayaron sobre un cultivo de tomate desde su maduración hasta la descomposición, con el propósito de que el dispositivo determinara la cantidad de compuestos volátiles durante el almacenamiento del tomate. La efectividad de este proyecto fue de un 100%.

Como una opción de trabajo de grado, en la Universidad Politécnica de Madrid se desarrolló el proyecto aplicado denominado: “Análisis y diseño de un dispositivo de sensores ambientales para su integración con terminales móviles”. El autor refiere:

Para comprobar las principales inquietudes sobre el entorno ambiental y corroborar que existe la necesidad de la elaboración de este tipo de proyectos, se realiza una investigación sobre las diferentes características del medio. Del mismo modo se presenta una revisión de los diferentes sistemas, procedimientos y tecnología de captación de calidad del ambiente. Dado que las características del medio son numerosas, se decide centrar esfuerzos en el aire como propiedad medioambiental a medir. Por eso, el objetivo fundamental del proyecto es ofrecer a la sociedad un dispositivo capaz de notificar la calidad del ambiente en base a alguna de sus características y además que sea integrable con dispositivos móviles. Para el diseño del dispositivo se realizan diversas pruebas preliminares. Acto seguido se diseñan los bloques funcionales del sistema que quedan implementados en esquemáticos. Tras el posicionamiento de los componentes elegidos, fabricación y montaje del dispositivo, se procede con las pruebas y la validación de sus propiedades. (Artés, 2016 pg 5).

En Polonia se desarrolló la “Aplicación de sensores ambientales para la conservación preventiva de bienes culturales en el Palacio Real Museo de Wilanów”. Esta propuesta desarrolló una técnica para determinar la aparición de nuevos contaminantes y su emisión a la atmosfera en busca de la conservación preventiva de los bienes culturales de la localidad. Se analizaron parámetros ambientales como la temperatura, y la acidez ambiental. Se diseñaron, sintetizaron e instalaron sensores químicos de respuesta óptica para evaluar las variables ya mencionadas y así identificar cuales incurrirían en un deterioro progresivo. El objetivo era

facilitarles a los responsables de la conservación de los elementos procedimiento y materiales para garantizar la condición óptima de los inmuebles y demás.

A nivel local en el norte de Colombia investigadores de la Universidad de Málaga y la Universidad de la Guajira han desarrollado un sistema móvil de sensores inalámbricos y nodo móvil para recoger datos ambientales con el que poder cubrir muchas más zonas de una ciudad frente a los nodos fijos. El proyecto denominado: “Integración de un Nodo Móvil en una Red Híbrida de Sensores Inalámbricos para Entornos Urbanos” hace posible la recolección de datos en tiempo real sobre diferentes parámetros ambientales, como humedad, temperatura o la presencia de determinados gases en una zona concreta.

“Los robots, o en general los vehículos inteligentes, requieren grandes cantidades de datos para adaptar su comportamiento al entorno y conseguir sus objetivos. Cuando sus misiones tienen lugar en grandes áreas, el uso de información adicional a la recopilada por los sensores a bordo ofrece con frecuencia una solución más eficiente del problema. La aparición de los sistemas ciberfísicos y la computación en la nube permite este enfoque, pero la integración de la información sensorial y su disponibilidad efectiva para los robots o vehículos es un desafío”. (Socarras, 2019 pp 5).

Son muchas las apuestas que alrededor del mundo se desarrollan en torno a la protección medioambiental desde la implicación electrónica y la utilización de elementos digitales, con el fin de procurar acciones que protejan y preserven las condiciones naturales del entorno. De la misma forma, la presente propuesta apoyada en investigaciones y desarrollos previos busca poner al alcance de la región tecnología de verificación y análisis medioambientales.

Marco Teórico Conceptual

Contaminación Ambiental y Agentes Contaminantes

la explotación de los recursos naturales, la tala de árboles, el desarrollo urbanístico, las industrias de la región, los incendios forestales por el cambio climático o por descuido humano son fenómenos inevitables que sucedan pero que están afectando la ecología de nuestro municipio o de área natural. La contaminación atmosférica es la alteración de la atmosfera por la adición de gases, o partículas sólidas o liquidas en suspensión. Los principales mecanismos de contaminación atmosférica son los procesos industriales que implican combustión, tanto en industrias como en vehículos, cuando frenan el desgaste de la llanta con el pavimento que generan dióxido y monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y azufre, entre otros contaminantes.

En Colombia el contaminante de mayor preocupación, dada su concentración es el PM10, ya que en muchas ocasiones sobrepasa el límite máximo permisible establecido por la norma y la comprobada afectación a la salud de la población expuesta, en especial de los grupos sensibles, entre los que se encuentran personas con problemas respiratorios como el asma o el enfisema; las mujeres embarazadas; personas que desarrollan sus actividades al aire libre; niños menores de 14 años cuyos pulmones todavía se están desarrollando; adultos mayores cuyos sistemas inmunológicos son más débiles y personas que se ejercitan frecuentemente al aire libre. Una vez en la atmósfera los contaminantes sufren una serie de fenómenos como:

Desplazamiento. Por acción de las Corrientes de aire en la atmósfera, teniendo en cuenta la vida media del contaminante, estos pueden recorrer grandes distancias más allá del foco emisor.

Dilución. En la atmósfera los contaminantes encuentran un espacio abierto en el que se difunden y expanden, disminuyendo la concentración inicial en la que se encontraban en el foco emisor.

Acumulación. Aquellos contaminantes con baja capacidad de reacción pueden acumularse en la atmósfera aumentando su concentración de forma progresiva.

Transformación. Con el paso del tiempo y el efecto combinado de los factores meteorológicos, los contaminantes emitidos se transforman. En muchas ocasiones esta transformación supone una degradación de la contaminante, propia de la capacidad de asimilación del medio. En otras ocasiones esta transformación supone la generación de otros contaminantes denominados contaminantes secundarios. (Tales como el ozono y los ácidos sulfúrico y nítrico, que dan lugar a la "lluvia ácida").

Clasificación de los Contaminantes del Aire

Contaminantes primarios. Son aquellas sustancias que son emitidas directamente a la atmósfera desde los focos contaminantes, su naturaleza física y su composición química es muy variada, se pueden agrupar de acuerdo a su característica más común, tal como su estado físico (partículas y metales), o elemento químico común (contaminantes gaseosos).

Contaminantes secundarios. Son los que no se emiten directamente a la atmósfera, sino que se producen como consecuencia de las transformaciones y reacciones químicas y fotoquímicas, que sufren los contaminantes primarios. Los principales problemas que generan los contaminantes secundarios son la contaminación fotoquímica, acidificación del medio y disminución del espesor de la capa de ozono. La contaminación fotoquímica es consecuencia de la oxidación de compuestos; los óxidos de azufre y de nitrógeno se transforman en ácidos. Sustancias como los CFCs (clorofluorocarbonos) son una familia de compuestos formados por

átomos de Carbono, Flúor y Cloro), el dióxido de carbono y el metano, son las que se encargan de neutralizar el ozono (O₃) provocando la disminución de la protección contra los rayos ultravioletas del sol, que no pueden ser absorbidos y llegan hasta los seres humanos.

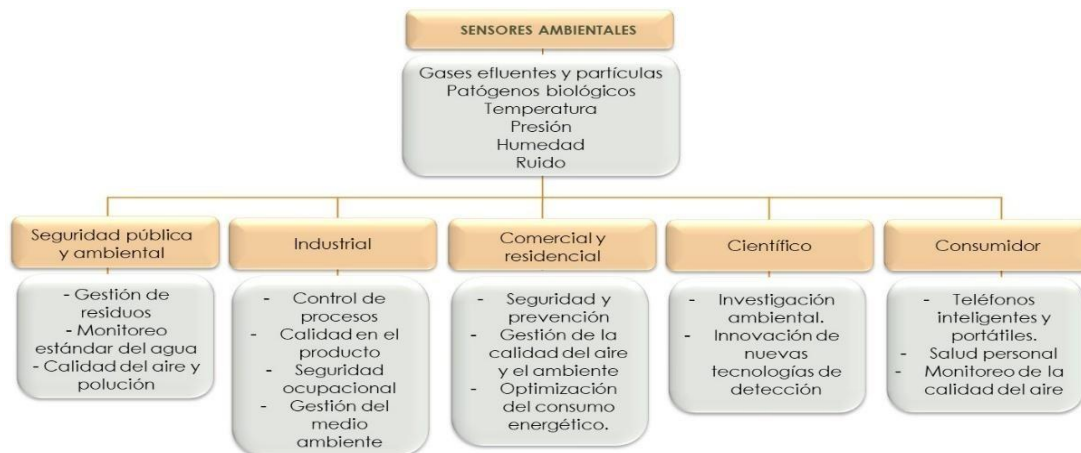
Sensores Medioambientales

Los sensores ambientales se utilizan en diferentes ámbitos según la figura 2, y se implementan esencialmente para medir:

- Concentraciones de metales (plomo, hierro, magnesio, etc.)
- Sustancias radioactivas (radio, uranio, etc.)
- Gases (CO₂, NO₂, ozono, CO, etc.)
- Compuestos orgánicos (benceno, metano)
- Patógenos biológicos (algas, bacterias, etc.)
- Medición de presión, humedad y temperatura.

Figura 1

Ámbitos de Aplicación de los Sensores Ambientales



Nota. Sensores Ambientales. Tomada de. <https://www.arrow.com/es-mx/research-and-events/articles/developments-in-environmental-sensors>

En la actualidad el seguimiento y vigilancias de las variables ambientales se ha convertido en una de las más grandes prioridades en el mundo, esto debido a los múltiples cambios climáticos que nuestro planeta viene presentando. Convirtiendo así, sus mediciones y almacenamiento de datos en una necesidad mundial.

Para el monitoreo de las variables ambientales existen hoy en día diferentes sensores que se encargan de transformar variables físicas como la temperatura, humedad, calidad del aire (entre otras) en señales eléctricas, permitiendo realizar un procesamiento y extracción de características que permitan tener un mayor control sobre la variable censada.

Sensor de Temperatura

Los sensores de temperatura son componentes electrónicos que detectan alteraciones en la temperatura ya sea del aire o del agua y convirtiéndola en señales eléctricas. Dicha señal puede enviarse directamente o mediante el cambio de la resistencia. También se denominan termo sensores y se compone principalmente en tres partes (elemento sensor, material conductor y cable de conexión).

En la actualidad hay muchas formas de medir la temperatura con todo tipo de sensores de diversas naturalezas. La ingeniería de control de procesos ha inventado, perfeccionado e innovado a la hora de disponer de sensores que les ayuden a controlar los cambios de temperatura en procesos industriales. (Bausá, 2020 pp 5).

Sensor de Humedad

Este sensor es capaz de medir la humedad relativa, que representa la relación porcentual entre la cantidad de vapor de agua real que contiene el aire y la que necesitaría contener para saturarse a idéntica temperatura. Regularmente entrega una señal de salida resistiva. También se

caracterizan por presentar una excelente calidad y una respuesta rápida en las medidas. Puede medir la humedad entre el rango 20% – aprox. 95%.

Sensor de Gas

Se usan en la determinación de la concentración de oxígeno (O₂) y para gases tóxicos como el monóxido de carbono (CO), sulfuro de hidrógeno (H₂S), cloro (Cl₂), óxidos de nitrógeno (NO, NO₂ ó NO_x), entre otros. Este tipo de sensores funciona al reaccionar con el compuesto que se desea determinar (en este caso gas) produciendo una señal eléctrica proporcional a la concentración de gas. En general, estos tipos de detectores son muy sensibles y emiten señales de advertencia a través de corrientes eléctricas. Estos sensores tienen dos electrodos divididos por una capa de electrolitos, la cual puede ser líquida, sólida o en forma de gel. Cuando el gas entra en el sensor a través de una membrana y la tensión de polarización está aplicada a los electrodos, se presenta una reacción de reducción-oxidación que genera una corriente eléctrica directamente proporcional a la concentración de gas.

Los sensores químicos se presentan como una herramienta de alta utilidad en el diseño de sistemas de control y monitoreo, ya que pueden ser colocados en el sitio donde se está produciendo la contaminación generando lecturas a tiempo real permitiendo de esta manera una evaluación inmediata de la problemática existente [9]. Los sensores químicos basados en transductores piezoeléctricos, electroquímicos y ópticos que se describen a continuación, permiten interesantes arreglos analíticos para el desarrollo de soluciones efectivas en el ámbito de la ingeniería ambiental. (Escalona, 2012 pp 74).

Tecnología IOT

Actualmente, han surgido una diversidad de plataformas en respuesta al rápido incremento de dispositivos inalámbricos aplicados a la medición y automatización de procesos

industriales y residenciales. Las plataformas IoT permiten el registro de datos adquiridos por sensores, el enrutamiento de datos en tiempo real y el control remoto de dispositivos. Además, proveen una interfaz como punto de acceso a sus recursos a través de protocolos de Internet; que permiten interactuar con lenguajes de alto nivel como LabView, Matlab y Python, para realizar procesamiento de datos y accionar remotamente un dispositivo (Wong & Kerkez, 2016). Debido a que usan distintas estrategias y protocolos de aplicación como Hipertext Transfer Protocol (HTTP) y Message Queue Telemetry Transport (MQTT), el prototipo se ha evaluado en tres plataformas IoT: Ubidots (UBIDOTS, 2014), Phant (PHANT, 2015) y ThingSpeak (c, 2016).

De acuerdo Kumar & Smys (2018), el internet de las cosas es un nuevo concepto del internet basado en que los objetos del mundo real están conectados al internet, estos objetos son adecuadamente identificados, son accesibles, y su estatus es conocido, de esta manera la nueva promesa del internet de las cosas es que la tecnología permitirá que las cosas respondan dinámicamente a como nosotros queremos que lo hagan; así, el paradigma cambia de conectarse a cualquier hora, desde cualquier parte por cualquier usuario a conectarse a cualquier hora, desde cualquier parte por cualquier cosa. Al conectarse las cosas al internet se crea un alto tráfico y se genera una gran cantidad de datos; los estándares de arquitectura y protocolos para el internet de las cosas abordan factores cruciales como confiabilidad, calidad del servicio, confidencialidad, integridad, entre otros.

Protocolos de Comunicaciones de Internet de las Cosas

Actualmente las cosas se conectan a internet a través de diferentes protocolos de red, este hecho puede conducir a tareas adicionales cuando se trabajan con diferentes tipos de protocolos en un proyecto, a continuación, se describen los conceptos generales de los diferentes protocolos de acuerdo con Goswami et al. (2019).

Sigfox

Esta tecnología es utilizada para comunicación inalámbrica de objetos de bajo rango como sensores y aplicaciones maquina a máquina, el rango de transmisión de datos es de hasta 50Km, este protocolo está diseñado para transmitir pequeñas cantidades de datos entre dispositivos que pueden estar alimentados por baterías.

Comunicación Celular

La comunicación celular es la mejor opción para aplicaciones que requieran un alto rendimiento de manejo de datos y recursos operando a grandes distancias, aprovecha los recursos de las redes celulares 4G, estos protocolos no son aptos para redes locales, sin embargo, están disponibles en los dispositivos móviles celulares.

6LOWPAN

Es un protocolo de comunicación usado en dispositivos IoT en el cual dos dispositivos son conectados directamente a sus IP sin la intervención de puertas de enlace (Gateway) y proxies; este protocolo fue diseñado por el Internet Engineering Task Force, es usado para conectar dispositivos inalámbricos de baja potencia en redes usando IPv6, este protocolo combina las capas de red y la subcapa de control de acceso a medios (MAC) del modelo OSI (Open Systems Interconnection Model).

Zig Bee. Zig Bee

Fue desarrollado por la alianza Zigbee y está basado en un estándar de baja frecuencia, es un protocolo de alto nivel y soporta la mayoría de los tipos de topologías, el costo de crear una red personal para grandes distancias es bajo.

Radio Frequency Identification

(RFID) tiene un transpondedor de frecuencia llamado RFID tag (etiqueta), y un RFID lector, el RFID tag tiene información única del dispositivo, hay dos clases de etiquetas, pasivas y activas, los sistemas con etiquetas activas utilizan frecuencias más altas y son sistemas más costosos, mientras que los sistemas con etiquetas pasivas usan frecuencias más bajas; la información a transmitir debe ser programada en la etiqueta.

Marco Legal y Normativo

El desarrollo de sistemas de monitoreo ambiental basados en sensores inalámbricos e Internet de las Cosas (IoT) se encuentra enmarcado dentro de un conjunto de disposiciones legales y normativas técnicas que regulan tanto la protección del medio ambiente como el uso responsable de las tecnologías emergentes. Este marco normativo es clave para garantizar que el diseño, implementación y uso del prototipo modular cumpla con los estándares nacionales e internacionales aplicables.

Normativa Ambiental en Colombia

Ley 99 de 1993. Crea el Ministerio del Medio Ambiente y organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA). Esta ley establece los principios de la gestión ambiental en Colombia y otorga competencias a las autoridades ambientales para el monitoreo, control y prevención de la contaminación.

Ley 1333 de 2009. Por la cual se establece el procedimiento sancionatorio ambiental. Esta norma refuerza la vigilancia ambiental y promueve el uso de mecanismos tecnológicos para detectar infracciones ambientales.

Resolución 2254 de 2017 del IDEAM. Establece el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de Material Particulado (PM10 y PM2.5), incluyendo especificaciones técnicas para los equipos de medición y su instalación, operación y mantenimiento.

Resolución 676 de 2022 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Define los niveles permisibles de calidad del aire ambiente y las obligaciones en cuanto a su monitoreo.

Decreto 1594 de 1984. Reglamenta el uso de aguas y vertimientos, estableciendo los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos aceptables en cuerpos de agua. Es relevante para los sensores del prototipo que miden pH, oxígeno disuelto, turbidez y conductividad.

Normas Técnicas

Normas ICONTEC (NTC). Colombia cuenta con múltiples normas técnicas que regulan los procedimientos de medición y calibración de sensores ambientales, así como las especificaciones para equipos electrónicos y dispositivos de transmisión de datos. Algunas aplicables son:

- *NTC 6011.* Requisitos generales de estaciones para monitoreo de calidad del aire.
- *NTC 5663.* Métodos de ensayo para parámetros de calidad del agua.

Normas Internacionales ISO

- *ISO 14001.* Sistema de gestión ambiental.
- *ISO 37120.* Indicadores para servicios urbanos e infraestructura que promueven ciudades sostenibles e inteligentes.

Normativa sobre Tecnologías IoT y Protección de Datos

Ley 1581 de 2012 (Ley de Protección de Datos Personales). Establece principios y disposiciones generales para la recolección, almacenamiento y uso de información personal.

Aunque los datos recolectados por sensores ambientales no son personales, es importante considerar esta ley si el sistema almacena información georreferenciada o asociada a terceros.

CONPES 3975 de 2019. Política Nacional para la Transformación Digital e Inteligencia Artificial, que promueve el uso de tecnologías como IoT en sectores estratégicos, incluyendo el medio ambiente.

Ley 1341 de 2009 (modificada por la Ley 1978 de 2019). Regula el uso de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) en Colombia, estableciendo el marco para su aplicación con fines sociales y ambientales.

Marco Tecnológico

El marco tecnológico de este proyecto se fundamenta en el uso de tecnologías avanzadas de sensores, procesamiento de datos, comunicación inalámbrica e integración de sistemas IoT (Internet de las Cosas). Estas tecnologías permiten monitorear, procesar y analizar variables ambientales en tiempo real, con el fin de detectar la presencia de contaminantes y generar alertas tempranas. La siguiente sección explora las principales tecnologías involucradas, su aplicación y el rol fundamental que juegan en la viabilidad del proyecto.

Sensores Ambientales Puntuales

Los sensores son dispositivos clave para la adquisición de datos en cualquier sistema de monitoreo. Son responsables de medir las variables del entorno que indican la calidad del aire y del agua. En este proyecto, los sensores seleccionados son fundamentales para garantizar la precisión y la fiabilidad de las mediciones.

Sensores de Material Particulado (PM2.5 y PM10)

Tecnología utilizada. Dispersión óptica o láser (Light Scattering).

Aplicación. Estos sensores permiten medir la concentración de partículas suspendidas en el aire, las cuales son un indicador clave de la contaminación atmosférica. Las partículas finas (PM_{2.5}) tienen un impacto directo en la salud humana, ya que pueden penetrar profundamente en los pulmones y el sistema circulatorio.

Sensores de Gases Contaminantes (COVs, NH₃, CO₂)

Tecnología utilizada. Sensores electroquímicos y resistivos.

Aplicación. La medición de gases como los compuestos orgánicos volátiles (COVs), amoníaco (NH₃) y dióxido de carbono (CO₂) es esencial para monitorear la calidad del aire y detectar fuentes de contaminación industrial o doméstica. Estos sensores permiten la detección temprana de condiciones de riesgo.

Sensores de Temperatura y Humedad

Tecnología utilizada. Sensores capacitivos y resistivos.

Aplicación. La temperatura y la humedad son variables críticas en los estudios medioambientales. La humedad relativa del aire afecta la dispersión de contaminantes y la estabilidad de los ecosistemas. Además, estos parámetros son fundamentales para el control de sistemas de ventilación, calefacción o refrigeración en procesos industriales.

Sensores de Oxígeno Disuelto (OD)

Tecnología utilizada. Celdas galvánicas o amperométricas.

Aplicación. En sistemas acuáticos, la medición del oxígeno disuelto es crucial para evaluar la calidad del agua. Los niveles de oxígeno disuelto son indicadores del bienestar de los ecosistemas acuáticos y de la presencia de organismos vivos, siendo esenciales para la gestión de recursos hídricos.

Sensores de PH

Tecnología utilizada. Potenciometría.

Aplicación. El pH del agua es un parámetro fundamental en el monitoreo ambiental, ya que afecta la solubilidad de contaminantes y la vida acuática. Un pH fuera de los valores normales puede indicar contaminación o alteración del entorno acuático.

Plataforma de Procesamiento y Control

La plataforma de procesamiento del sistema es el corazón del monitoreo, pues se encarga de adquirir, procesar y transmitir los datos obtenidos por los sensores. Esta plataforma debe ser capaz de realizar múltiples tareas de forma eficiente y con bajo consumo energético. En el caso de este proyecto, se utiliza un microcontrolador ESP32, que se caracteriza por:

Conectividad Inalámbrica. Incluye Wi-Fi y Bluetooth, lo que permite la transmisión de datos a la nube o a dispositivos móviles para análisis en tiempo real.

Capacidad de procesamiento. El ESP32 es capaz de manejar múltiples sensores y realizar el procesamiento de señales en tiempo real, facilitando la toma de decisiones locales y la activación de alertas.

Tecnología de Comunicación Inalámbrica (IoT)

Las tecnologías de comunicación inalámbrica son esenciales para la transmisión de datos en sistemas IoT. Estas permiten que los dispositivos estén conectados a redes locales o a la nube, facilitando el acceso remoto a los datos. En este proyecto, se consideran las siguientes tecnologías:

Wi-Fi. Se utiliza para transmitir los datos de los sensores a plataformas en la nube o servidores remotos, permitiendo la visualización en tiempo real y la gestión remota del sistema.

LoRa (opcional). En entornos rurales o alejados, donde la cobertura Wi-Fi no es adecuada, LoRa se presenta como una opción ideal para comunicación a largas distancias con bajo consumo energético.

Bluetooth. Para el monitoreo cercano y la interacción directa con dispositivos móviles o aplicaciones locales.

Plataforma de Almacenamiento y Análisis de Datos

La recopilación, almacenamiento y análisis de los datos es un componente fundamental del sistema de monitoreo. La plataforma IoT utilizada en este proyecto permite:

Almacenamiento en la Nube. Plataformas como ThingSpeak, Ubidots, o Node-RED permiten almacenar grandes volúmenes de datos históricos, facilitando la generación de gráficos y la visualización en tiempo real. Estas plataformas son capaces de recibir datos a través de HTTP o MQTT y realizar análisis básicos de los mismos.

Almacenamiento Local. Se utiliza una tarjeta microSD o memoria EEPROM para almacenar datos localmente, asegurando que, en caso de pérdida de conectividad, los datos no se pierdan y puedan ser enviados posteriormente.

Algoritmos de Procesamiento y Análisis de Datos

El procesamiento de los datos recolectados por los sensores es una de las tareas más importantes del sistema, ya que permite tomar decisiones basadas en datos y detectar patrones de contaminación. Los algoritmos utilizados en este proyecto incluyen:

Filtrado de Datos. Técnicas de suavizado de señales como filtros de Kalman o media móvil para reducir el ruido.

Reconocimiento de Patrones. El sistema implementará algoritmos simples de clasificación o lógica de decisión para identificar cuándo los parámetros alcanzan niveles peligrosos o fuera de lo normal, activando alertas locales o remotas.

Generación de Alertas. Cuando los valores de los sensores superan umbrales predefinidos, el sistema enviará alertas a los operadores o usuarios a través de la plataforma en la nube o mediante mensajes de texto (SMS, notificaciones push).

Integración Modular y Escalabilidad

El diseño del sistema es modular, lo que permite agregar o reemplazar sensores sin rediseñar el sistema completo. Esta modularidad facilita el mantenimiento, la expansión de la funcionalidad del sistema y la adaptación a diferentes escenarios o tipos de contaminación.

Marco Contextual

Los lugares elegidos para la realización de las pruebas corresponden a zonas rurales del norte del departamento del Huila, específicamente zonas aledañas a la capital del mismo.

El departamento del Huila se halla localizado en la zona Sur-occidental del país, cuenta con un área aproximada de 19.890 km², lo acompañan las cordilleras Central y Oriental, desde el Macizo Colombiano hasta su mayor estrechamiento en el extremo Norte, entre el río Cabrera y la Cordillera Oriental. Geográficamente limita por el Norte con los departamentos del Tolima y Cundinamarca, por el Este con Meta y Caquetá, por el Sur con Caquetá y Cauca, y por el Oeste con Cauca y Tolima.

Metodología

Diseño de la Investigación. El diseño de la investigación es experimental. Este tipo de diseño permite observar el comportamiento natural de las variables, dando pie a la consecución de información relevante para toma de decisiones. Establece cómo van a ser medidas, definidas, y analizadas las variables. Es experimental porque con la realización de la presente propuesta se busca:

- Reconocer el comportamiento de las variables medioambientales en su entorno natural, identificando los agentes contaminantes de agua y aire y la forma de cuantificarlos y/o analizarlos.
- Analizar el comportamiento y estructura de los sensores, de manera que bajo el ejercicio de prueba y error se puedan calibrar y relacionar de manera directa con el fenómeno a medir.
- Acondicionamiento de la información, lo que involucra análisis y tratamiento respectivo de los datos obtenidos.
- Transmisión de la información recibida mediante los enlaces de comunicaciones que se establezcan para interpretar y visualizar.

El diseño experimental se caracteriza por manipular intencionalmente una o más variables independientes, observar sus efectos en una o más variables dependientes y controlar el entorno para establecer relaciones causa-efecto. En este proyecto, se cumplen estos criterios.

Manipulación de Variables Independientes. El proyecto implica intervenir activamente en las condiciones bajo las cuales se recopilan los datos ambientales:

- Se seleccionan y calibran sensores específicos (temperatura, humedad, pH, oxígeno disuelto, COVs, partículas PM).

- Se exponen estos sensores a diferentes ambientes controlados y contaminados, para observar su comportamiento.

- Se ajustan parámetros como tiempo de muestreo, distancia entre nodos, o condiciones climáticas simuladas.

Observación del Efecto sobre Variables Dependientes. Se monitorean los valores censados por cada sensor (como cambios en la concentración de gases, niveles de oxígeno, pH del agua):

- Se analiza cómo varían estas mediciones ante condiciones cambiantes del entorno o ante la introducción deliberada de un contaminante.

- El comportamiento de los sensores permite determinar si la tecnología propuesta es efectiva para detectar alteraciones reales en el medio ambiente.

Control de Condiciones Experimentales. Las pruebas se realizan en ambientes controlados inicialmente (laboratorio), para establecer una línea base y validar el comportamiento de los sensores en condiciones estables. Posteriormente, el prototipo se traslada a entornos reales (campo), donde se identifican las variaciones que surgen y se estudia su robustez. Se controla la energía, la conectividad, la distancia entre módulos y la configuración del software.

Aplicación de la Comparación y Validación. Se comparan los resultados obtenidos por los sensores con valores de referencia o estándares ambientales (normas OMS, EPA, NTC colombianas) y se usan técnicas de validación cruzada para evaluar si el sistema puede distinguir correctamente entre un ambiente contaminado y uno no contaminado.

Iteración y Repetibilidad. El diseño permite la repetición de experimentos con diferentes configuraciones, condiciones o ubicaciones geográficas y cada iteración permite refinar el prototipo, mejorar la sensibilidad de los sensores, ajustar algoritmos de procesamiento o condiciones de operación.

Enfoque de la Investigación

El enfoque es tipo Mixto (cuantitativa y cualitativa). “Los métodos mixtos representan un conjunto de procesos sistemáticos, empíricos y críticos de investigación e implican la recolección y el análisis de datos cuantitativos y cualitativos, así como su integración y discusión conjunta, para realizar inferencias producto de toda la información recabada (metainferencias) y lograr un mayor entendimiento del fenómeno bajo estudio (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2008).

Chen (2006) los define como la integración sistemática de los métodos cuantitativo y cualitativo en un solo estudio con el fin de obtener una “fotografía” más completa del fenómeno, y señala que éstos pueden ser conjuntados de tal manera que las aproximaciones cuantitativa y cualitativa conserven sus estructuras y procedimientos originales (“forma pura de los métodos mixtos”); o bien, que dichos métodos pueden ser adaptados, alterados o sintetizados para efectuar la investigación y lidiar con los costos del estudio (“forma modificada de los métodos mixtos”).

En resumen, los métodos mixtos utilizan evidencia de datos numéricos, verbales, textuales, visuales, simbólicos y de otras clases para entender problemas en las ciencias (Creswell, 2013a y Lieber y Weisner, 2010”).

El presente estudio relaciona análisis cuantitativos y cualitativos que permitirán definir el nivel de los agentes contaminantes en los elementos a referenciar como son aire y agua, llevando a una conclusión cuantificable y descriptiva del entorno analizado.

Por un lado, se emplea un enfoque cuantitativo al recolectar, procesar y analizar datos numéricos provenientes de sensores ambientales (como temperatura, humedad, oxígeno disuelto, niveles de COVs y material particulado), lo cual permite realizar mediciones objetivas, establecer patrones y compararlos con estándares normativos. Por otro lado, el enfoque cualitativo se hace evidente en la interpretación de los resultados en contextos reales, en la valoración del comportamiento del prototipo en diferentes escenarios ambientales, y en la comprensión de la percepción de los usuarios sobre su funcionamiento y aplicabilidad. Esta integración permite no solo validar técnicamente el sistema, sino también entender su impacto práctico y su pertinencia para el monitoreo ambiental en situaciones reales.

Población

El prototipo es portátil, de manera que las medidas de prueba y demás se pueden tomar en distintos puntos según necesidad. Para nuestro caso nos movilizaremos por emplazamientos del departamento del huila, lugar donde están radicados los investigadores.

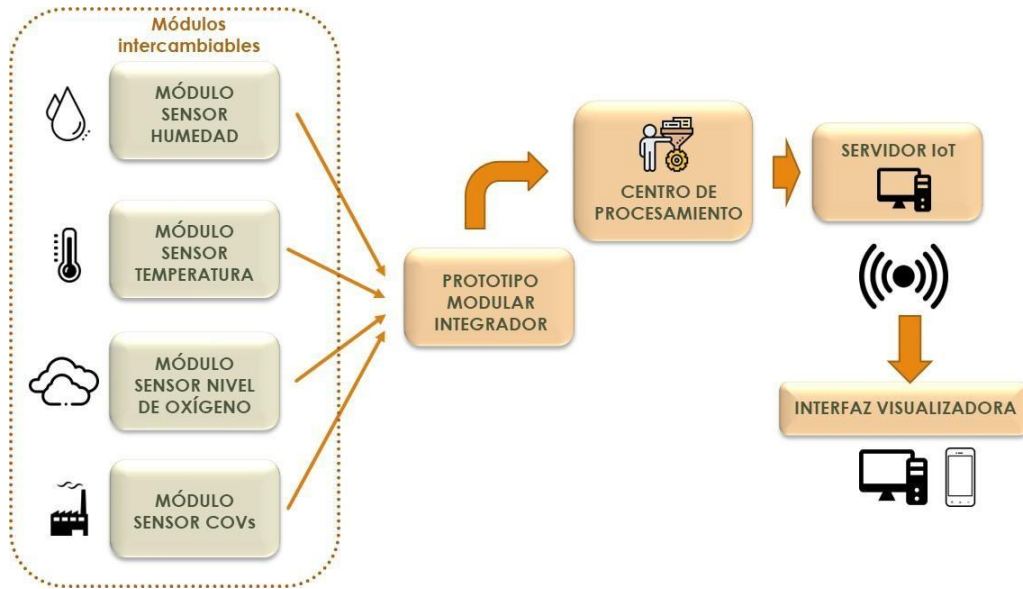
- Desarrollo Ingenieril
- Descripción del Proceso

La propuesta busca diseñar un prototipo modular que permita la medición de variables de humedad, temperatura, nivel de oxígeno y nivel de COVs (compuestos orgánicos volátiles), para determinar niveles de contaminación de un área o locación. Los datos se procesarán, acondicionarán, transmitirán y visualizarán implementando tecnología IoT. (Ver figura 1). El prototipo busca determinar el grado de contaminación de:

- Contaminación del aire en un entorno específico
- Contaminación del agua en un entorno específico

Figura 3

Arquitectura del Sistema



Nota. Módulos intercambiables.

La propuesta de investigación aplicada se desarrolló bajo las siguientes fases:

- Estudios preliminares
- Materialización del prototipo modular
- Sistema de adquisición y procesamiento de datos
- Transmisión de la información
- Visualización y disposición de la información.

Figura 4*Fases de Desarrollo de la Propuesta*

Nota. Propuestas de las fases.

Fase 1. Estudios Preliminares

El desarrollo del prototipo modular para el monitoreo de contaminantes ambientales se basa en la integración de sensores electrónicos capaces de medir parámetros clave de calidad del aire y del agua. Estos sensores, conectados mediante tecnología inalámbrica y gestionados a través de plataformas IoT, permiten la adquisición, transmisión y análisis de datos en tiempo real. Como etapa fundamental en el desarrollo del presente proyecto, se realizaron estudios preliminares orientados a establecer las variables de interés, su comportamiento natural, los métodos de medición, la selección de sensores, y las técnicas de análisis que permitirán

interpretar los datos recolectados mediante la tecnología IoT. A continuación, se describen los aspectos considerados:

Definición de Variables a Analizar. Se identificaron dos grupos de variables clave para el monitoreo ambiental:

- Calidad del aire
- Material particulado (PM2.5 y PM10)
- Gases contaminantes (NH₃, CO₂, NO_x, COVs)
- Temperatura ambiental
- Humedad relativa
- Calidad del agua
- pH
- Temperatura del agua
- Oxígeno disuelto

Estas variables permiten evaluar de manera integral el nivel de alteración ambiental causado por fuentes contaminantes antrópicas o naturales.

Comportamiento Natural de las Variables. El comportamiento esperado de estas variables bajo condiciones normales se describe a continuación:

PM2.5 / PM10. Su concentración suele mantenerse por debajo de 25 µg/m³ (PM2.5) y 50 µg/m³ (PM10) en ambientes limpios. Su incremento se asocia a emisiones vehiculares, quema de residuos o polvo ambiental.

Gases Contaminantes. Presentes en bajas concentraciones en la atmósfera. Un aumento significativo es indicativo de procesos contaminantes. Por ejemplo, CO₂ > 1000 ppm o NH₃ en niveles detectables es señal de contaminación.

Temperatura y Humedad Relativa. Factores naturales que influyen en la dispersión y reactividad de contaminantes atmosféricos, pH del agua: Rango normal de 6.5 a 8.5. Valores extremos pueden indicar vertimientos industriales, contaminación ácida o presencia de materia orgánica descompuesta.

Oxígeno Disuelto. Debería mantenerse por encima de 5 mg/L para garantizar la salud de ecosistemas acuáticos. Niveles menores pueden implicar contaminación orgánica o eutrofización.

Temperatura del Agua. Afecta directamente la solubilidad del oxígeno. Un incremento anormal puede estar relacionado con contaminación térmica.

Criterios para Determinar Contaminación. La determinación de contaminación ambiental se basa en la comparación de las variables medidas con valores de referencia o límites máximos permisibles establecidos por organismos internacionales (como la OMS y la EPA) y entidades nacionales competentes en Colombia (como el IDEAM y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible). A continuación, se describen los criterios establecidos para cada variable, con énfasis en su impacto ambiental y en la salud pública:

- Calidad del Aire
- Material Particulado (PM2.5 y PM10)
- PM2.5 (diámetro aerodinámico $\leq 2.5 \mu\text{m}$). Son partículas finas que penetran profundamente en los pulmones y pueden llegar al torrente sanguíneo.
- PM10 (diámetro $\leq 10 \mu\text{m}$). Partículas respirables que afectan el sistema respiratorio superior.

Tabla 1*Criterios de Contaminación Material Particulado*

Tipo de material particulado	Límite máximo diario	Nivel de riesgo ambiental
PM2.5	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (OMS)	A partir de 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$: riesgo moderado a alto
PM10	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (OMS)	A partir de 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$: afectación respiratoria y ambiental

Nota. Contaminación. Tomado de Fuente: *Criterios de Contaminación (según OMS y Resolución 2254 de 2017 - Colombia)*

Gases Contaminantes (medidos con MQ135). Este sensor puede detectar gases como:

- Amoníaco (NH_3)
- Dióxido de carbono (CO_2)
- Óxidos de nitrógeno (NO_x)
- Compuestos orgánicos volátiles (COVs)

Tabla 2*Gases Contaminantes y Efectos*

Gas	Límite recomendado	Efectos sobre la salud
CO_2	1000 ppm (interiores)	Somnolencia
NH_3	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1h)	Irritación ocular y respiratoria
NO_2	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1h)	Afectación pulmonar aguda
COVs (benceno, formaldehído, etc.)	< 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Potencial carcinógeno, toxicidad crónica

Nota. Valores guía gases contaminantes (según OMS y EPA). Tomado de Fuente OMS.

Condiciones Climáticas de Referencia. Temperatura del aire y humedad relativa no son contaminantes por sí mismas, pero son variables moduladoras. Por ejemplo:

- Altas temperaturas intensifican la formación de ozono troposférico.
- Alta humedad favorece la suspensión prolongada de partículas.
- Bajas temperaturas pueden intensificar inversiones térmicas y acumulación de

contaminantes.

Calidad del Agua. pH del Agua. El pH determina la acidez o alcalinidad del medio acuático. Valores extremos afectan la biodiversidad acuática y favorecen la solubilización de metales pesados.

Tabla 3

Clasificación de la Calidad del Agua

Rango de pH	Clasificación del agua
6.5 – 8.5	Aceptable para consumo y vida acuática
< 6.5 o > 8.5	Riesgo de corrosión o toxicidad
< 5.5 o > 9.5	Condiciones potencialmente letales para fauna acuática

Nota. Clasificación del Agua. Tomado de la Fuente OMS.

Oxígeno Disuelto (OD). El oxígeno disuelto es esencial para la respiración de organismos acuáticos. Su disminución puede indicar:

- Presencia de materia orgánica en descomposición.
- Contaminación por vertimientos industriales o agrícolas.

- Procesos de eutrofización.

Tabla 4

Estado del Agua según el Oxígeno Disuelto

Nivel de OD (mg/L)	Estado del agua
> 5	Buena calidad
3 – 5	Moderada – posible estrés biológico
< 3	Mala – riesgo para organismos acuáticos

Nota. Estado del Agua.

Temperatura del Agua. Un aumento de 2–4 °C sobre lo natural puede reducir la solubilidad de oxígeno y alterar ciclos reproductivos. Se considera una forma de contaminación térmica cuando se supera el rango normal de tolerancia (>30 °C en aguas tropicales dulces).

Parámetros de Medición y Métodos Utilizados

La medición precisa de variables ambientales es esencial para la caracterización, evaluación y control de los niveles de contaminación. En este proyecto, se contemplan métodos de medición basados en las propiedades físicas, químicas y eléctricas de las sustancias presentes en el aire y en el agua. A continuación, se describen los parámetros seleccionados y los principios de funcionamiento empleados en su cuantificación:

- Medición de Parámetros de Calidad del Aire
- Material Particulado (PM2.5 y PM10)
- Sensor empleado. SDS011 – Nova Fitness

Principio de medición de Dispersión láser (light scattering)

Descripción técnica. El sensor genera un haz láser que incide sobre las partículas en suspensión. La luz dispersada es recogida por un fotodiodo que traduce la intensidad del haz reflejado en una concentración numérica de partículas, expresada en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Parámetros medidos:

- PM2.5 y PM10
- Rango operativo: 0 – 999.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- Resolución: 0.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- Método: Óptico, tiempo real, bajo consumo.
- Gases Contaminantes (NH_3 , CO_2 , NO_x , COVs)
- Sensor empleado. MQ135

Principio de Medición, Variación de la Conductividad Eléctrica (SnO_2)

Descripción técnica. El sensor MQ135 detecta cambios en la resistencia eléctrica de su elemento sensible al exponerse a gases contaminantes. Esta variación se traduce en una señal analógica proporcional a la concentración de gases en el ambiente. Parámetros Medidos.

- Amoníaco (NH_3)
- Dióxido de carbono (CO_2)
- Óxidos de nitrógeno (NO_x), COVs.
- Rango típico de detección: 10 – 1000 ppm (según gas).
- Método: Electroquímico-resistivo, requiere calibración.
- Temperatura y Humedad del Aire
- Sensor empleado: DHT22

- Principios de medición
- Temperatura: Sensado térmico mediante termistor de alta precisión.
- Humedad: Medición capacitiva, basada en la variación dieléctrica de un polímero absorbente.

- Parámetros medidos: Temperatura: -40 a 80 °C (± 0.5 °C)
- Humedad: 0 – 100 %HR ($\pm 2-5$ %)
- Método: Electrónico digital, bajo costo, respuesta rápida.

Medición de Parámetros de Calidad del Agua

a) pH. Se basa en la diferencia de potencial eléctrico entre un electrodo de referencia y un electrodo de medición en contacto con la solución acuosa. Esta diferencia depende de la concentración de iones H^+ .

- Sensor empleado. Sensor de pH analógico con electrodo de vidrio.
- Principio de Medición. Potenciometría.
- Parámetros medidos
- Escala: 0 a 14 pH
- Precisión: $\pm 0.1-0.3$ unidades de pH
- Método: Electroquímico, requiere calibración periódica con soluciones buffer.

b) Oxígeno Disuelto (OD). El sensor contiene un cátodo y un ánodo inmersos en una solución electrolítica y protegidos por una membrana permeable al oxígeno. El oxígeno que difunde a través de la membrana genera una corriente proporcional a su concentración.

- Parámetros medidos:
- Rango: 0 – 20 mg/L

- Precisión: ± 0.2 mg/L
- Método: Electroquímico, ideal para campo y laboratorio.
- Sensor Empleado. SEN0237-A (DFRobot)
- Principio de Medición. Célula galvánica (principio de voltaje generado por reacciones redox).

c) Temperatura del Agua. Este sensor encapsulado en acero inoxidable mide temperatura mediante la variación de resistencia interna frente a cambios térmicos. Parámetros medidos:

- Rango: -55 a +125 °C
- Precisión: ± 0.5 °C
- Método: Electrónico, protocolo digital 1-Wire.
- Sensor Empleado: DS18B20
- Principio de Medición: Termistor digital de precisión.
- Métodos Comunes de Adquisición de Datos
- Los métodos utilizados para adquirir los datos medidos por los sensores incluyen:

Conversión de señales analógicas a digitales (ADC): Para sensores como MQ135, pH y OD.

- Lectura de Protocolos Digitales (1-Wire, UART, I2C): Para sensores como DS18B20, SDS011 y DHT22.
- Filtrado de Señales. Aplicación de filtros digitales para eliminar ruido de medición.
- Promedio Móvil y Calibración por Software Para garantizar lecturas estables y precisas.

- Almacenamiento Temporal. Uso de buffers locales antes de enviar a la nube (con ESP32).
- Sincronización Temporal. Todas las lecturas se marcan con timestamp para análisis cronológico.

Sensores Seleccionados

Con base en la disponibilidad, compatibilidad y confiabilidad técnica, se seleccionaron los siguientes sensores:

Tabla 5

Sensores Seleccionados

Variable Ambiental	Sensor	Principio de Funcionamiento	Rango Operativo	Método de Medición
Material Particulado (PM2.5 y PM10)	SDS011 (Nova Fitness) Digital.	Dispersión óptica por láser (Light Scattering)	0 – 999.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Óptico, tiempo real
Gases (CO₂, NH₃, NO_x, COVs)	MQ135 Analógico	Cambio de conductividad en óxido metálico (SnO ₂)	10 – 1000 ppm (dependiendo del gas)	Electroquímico-resistivo, salida analógica
Temperatura y Humedad del aire	DHT22 Digital	Termistor + Sensor capacitivo	Temp: -40 a 80 °C; Hum: 0–100 % HR	Electrónico digital, señal de datos serial
Temperatura del agua	DS18B20 Digital	Termistor digital encapsulado en acero	-55 a +125 °C	Digital, protocolo 1-Wire
Oxígeno Disuelto (OD)	SEN0237-A (DFRobot) Analógico	Célula galvánica con membrana permeable	0 – 20 mg/L	Electroquímico, voltaje proporcional

pH del agua	Sensor de pH analógico	Diferencia de potencial entre electrodos (potenciometría)	pH 0 – 14	Electroquímico, requiere soluciones buffer
--------------------	------------------------	-----------------------------------------------------------	-----------	--------------------------------------------

Nota. Sensores Compatibles y Confiables.

Sensores Aire

Figura 5

Sensor de Material Particulado NOVA FITNESS SDS011



Nota. Imagen Sensor Particulado. Fuente. Imagen tomada de

https://www.reichelt.com/fr/fr/shop/produit/capteur_de_poussiere_fine_nova_fitness_adaptateur_usb_inclus-243264

El sensor SDS011 de Nova Fitness. Es un sensor óptico basado en láser capaz de medir partículas en suspensión (PM2.5 y PM10) en el aire. Emplea el principio de dispersión láser para detectar la concentración de partículas finas con alta precisión.

- Rango de medición: 0.0 – 999.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- Precisión: $\pm 15\%$ o $\pm 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- Salida de datos: UART (3.3V) o PWM

- Aplicación: Monitoreo de calidad del aire en entornos urbanos, industriales o agrícolas.

Este sensor es ampliamente utilizado en proyectos de bajo costo y ha demostrado confiabilidad en condiciones de campo, siendo ideal para sistemas IoT de monitoreo ambiental.

Sensor de Gases. MQ-135. El MQ-135 es un sensor electroquímico sensible a diversos gases contaminantes, tales como amoníaco (NH_3), óxidos de nitrógeno (NO_x), alcohol, benceno, humo y dióxido de carbono (CO_2).

- Tensión de funcionamiento: 5V DC
- Tiempo de respuesta: <10 segundos
- Vida útil: ~2 años en condiciones normales
- Aplicación: Detección de contaminación por gases en ambientes cerrados y abiertos.

Aunque no es un sensor de grado industrial, es útil como indicador de tendencias en concentraciones de gases en soluciones IoT de bajo costo.

Figura 6

Sensor de Gases: MQ-135



Nota. Sensor de Gas. Tomado de la Fuente <https://avelectronics.cc/producto/sensor-gas-mq-135/>

Sensor de Temperatura y Humedad. DHT22 (AM2302). El sensor DHT22 es un módulo digital que combina sensores de temperatura y humedad relativa con buena precisión.

- Rango de temperatura: -40 a 80 °C ± 0.5 °C
- Rango de humedad: 0 – 100% RH ± 2 – 5%
- Frecuencia de muestreo: 0.5 Hz (una lectura cada 2 segundos)
- Salida de datos: Digital (protocolo propietario de un solo hilo)
- Es ideal para aplicaciones ambientales donde se requiere una supervisión

constante del microclima.

Figura 7

Sensor de Temperatura y Humedad: DHT22 (AM2302)



Nota. Imagen sensor de temperatura. Fuente tomada de

<https://www.didacticaselctronicas.com/shop/dht22-eco-sensor-de-humedad-y-temperatura-dht22-educativo-39484#attr=>

Sensores Agua

Sensor de Temperatura de Agua DS18B20. El DS18B20 es un sensor de temperatura digital con salida mediante protocolo 1-Wire, ampliamente utilizado en monitoreo ambiental, especialmente en medios líquidos.

Figura 8

Sensor de Temperatura de Agua: DS18B20



Nota. Imagen sensor de temperatura. Tomada de la Fuente

<https://ferretronica.com/products/sensor-temperatura-termocupla-sumergible-ds18b20>

- Rango de temperatura: $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Precisión: $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el rango -10 a $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Dirección única: Cada sensor tiene un ID único para uso en redes con múltiples sensores.
- Por su encapsulado resistente al agua (cuando se usa versión con cubierta de acero inoxidable), es adecuado para mediciones en cuerpos de agua o sistemas hidráulicos.

Sensor de Oxígeno Disuelto SEN0237-A (DFRobot). El SEN0237-A es un sensor electroquímico analógico para medir oxígeno disuelto (OD) en soluciones acuosas, compatible con microcontroladores como Arduino.

- Rango de medición: 0 – 20 mg/L (0 – 100% de saturación)
- Precisión: ± 0.2 mg/L
- Tensión de operación: 5V DC
- Aplicación: Control de calidad del agua en acuicultura, laboratorios, cuerpos de agua superficial, etc. Su diseño compacto y buena precisión lo hacen apto para soluciones IoT de monitoreo hídrico.

Figura 9

Sensor de Oxígeno Disuelto: SEN0237-A (DFRobot)



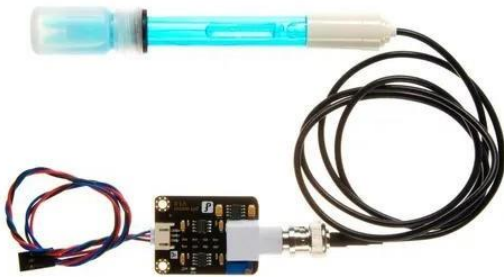
Nota. Imagen sensor de oxígeno. Tomado de la Fuente

<https://mexico.newark.com/dfrobot/sen0237-a/analog-dissolved-oxy-sensor-kit/dp/88AH1499>

Sensor de pH Analógico (DFRobot). El sensor de pH analógico de DFRobot permite medir la acidez o alcalinidad de una solución acuosa, interfaciándose con microcontroladores mediante una salida analógica.

Figura 10

Sensor de pH analógico (DFRobot)



Nota. Imagen sensor analógico. Tomado de la Fuente https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-1117125109-kit-medicion-de-ph-analogo-sen0161-dfrobot-_JM

- Rango de medición: 0 – 14 pH
- Precisión: ± 0.1 pH
- Voltaje de operación: 5V DC
- Incluye: Electrodo, módulo acondicionador de señal y cable BNC
- Es una solución práctica para sistemas de monitoreo de agua en tiempo real, con la ventaja de permitir calibración manual.

- Los sensores de agua necesitan una calibración especial. Para ello remitirse al anexo 1.

Materialización del Prototipo

La fase de materialización corresponde a la etapa donde se implementan los componentes físicos, electrónicos y de software necesarios para consolidar el prototipo funcional del sistema de monitoreo ambiental. Esta etapa se estructura en varias fases secuenciales y complementarias que aseguran la validez técnica del sistema. A continuación, se describen dichas fases:

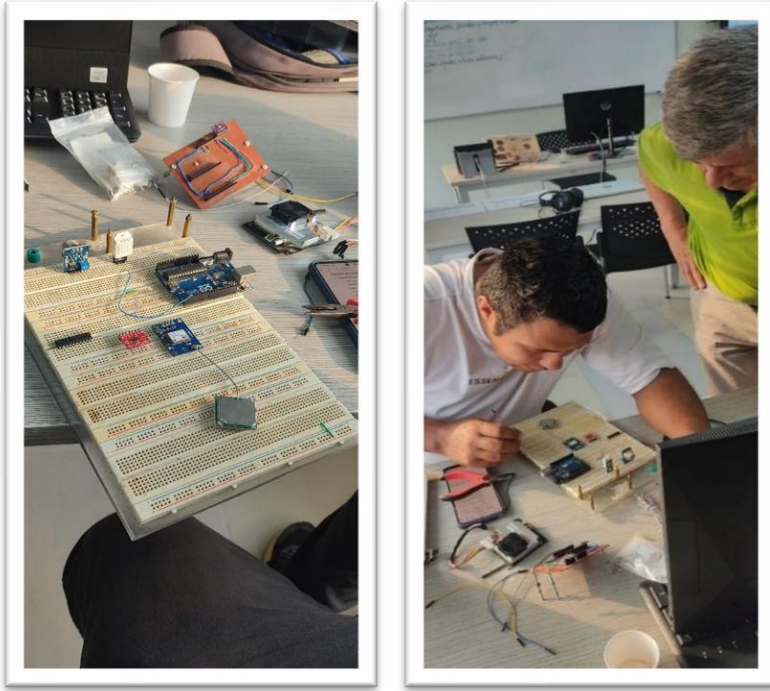
Prueba y Reconocimiento Operativo de Sensores. Se realiza la instalación individual de cada uno de los sensores seleccionados para validar su operatividad básica, compatibilidad con los controladores electrónicos y respuesta en tiempo real. En esta etapa se evalúan los siguientes sensores:

- DHT22: Sensor de temperatura y humedad relativa.
- DS18B20: Sensor de temperatura del agua.
- SEN0237-A: Sensor de oxígeno disuelto.
- MQ135: Sensor de gases (COVs, NH₃, CO₂, entre otros).
- SDS011: Sensor óptico de material particulado.
- Sensor Analógico de pH.

Estas pruebas permiten comprobar la integridad física del sensor, la correcta adquisición de datos por parte del microcontrolador, la calibración básica y el reconocimiento de sus rangos iniciales de funcionamiento.

Figura 11

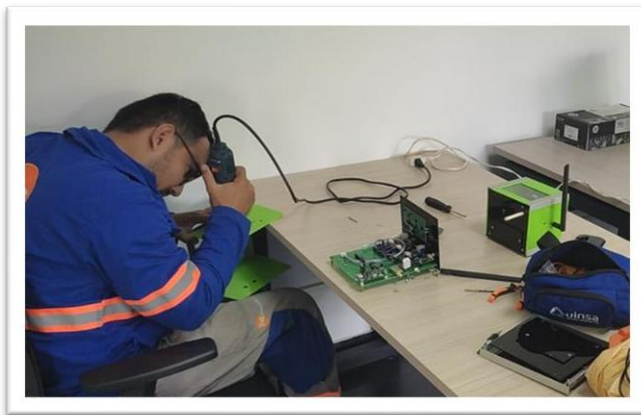
Pruebas de Laboratorio



Nota. Fotografía Pruebas Previas

Figura 12

Ensamble elementos



Nota. Fotografía Ensamble.

Ejercicio de Monitoreo y Validación de Rangos. Se realizan simulaciones de medición con las variables ambientales en entornos naturales o controlados. Este ejercicio permite:

- Confirmar la estabilidad y precisión de las mediciones dentro de los rangos esperados.
- Identificar las condiciones límites de sensibilidad y respuesta.
- Establecer umbrales preliminares de alerta frente a posibles eventos de contaminación o alteración ambiental.
- Realizar pruebas de lectura continua para observar el comportamiento dinámico de cada sensor en condiciones reales.

Análisis de Laboratorio y Establecimiento de Estándares. Se efectúan pruebas en laboratorio o ambientes simulados para observar la respuesta de los sensores bajo condiciones controladas, comparando su comportamiento en dos escenarios:

- Condiciones ambientales normales (aire limpio, agua sin agentes contaminantes).
- Condiciones contaminadas, introduciendo agentes físicos o químicos (por ejemplo, emisiones de gases o sustancias ácidas en agua).

Esto permite:

- Validar el comportamiento del sensor frente a perturbaciones.
- Obtener curvas de respuesta específicas por tipo de sensor.
- Establecer rangos operativos confiables, valores de referencia y márgenes de error.
- Determinar condiciones óptimas de calibración y reconfiguración.

Diseño Electrónico de los Módulos de Sensado. Se diseña la arquitectura electrónica que albergará cada sensor, considerando aspectos como:

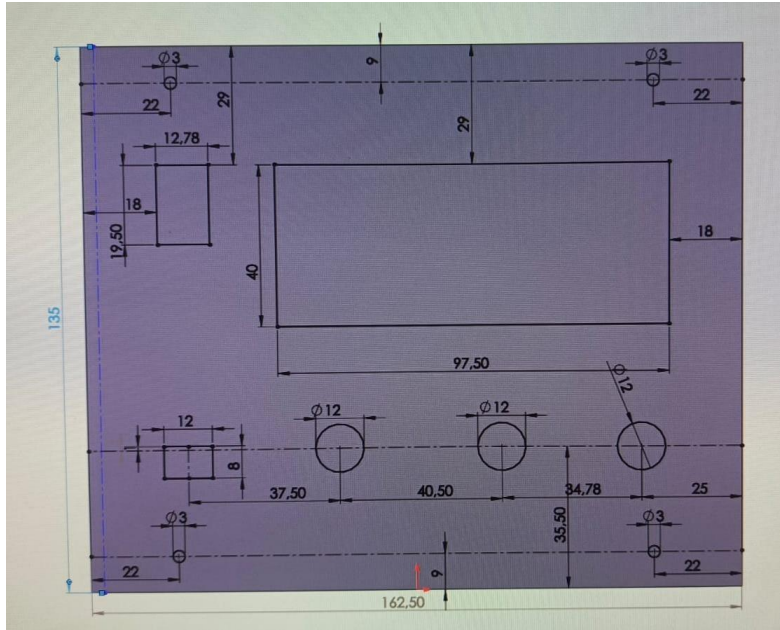
- Encapsulado protector contra polvo y humedad.
- Conectividad por buses digitales o puertos analógicos.
- Interfaz con la tarjeta de procesamiento (pines de entrada/salida, alimentación).
- Disposición modular para permitir mantenimiento o intercambio de sensores.
- Aislamiento eléctrico y térmico si se requiere para ciertos sensores.

Figura 13

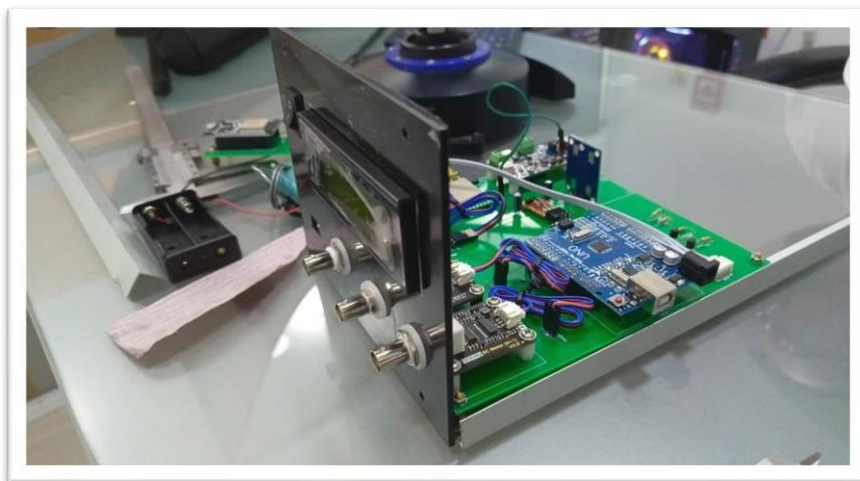
Cajas de soporte



Nota. Fotografía cajas soporte.

Figura 14*Planos Diseño Cajas*

Nota. Planos De Diseño.

Figura 15*Posicionamiento Elementos Dentro de la Caja de Soporte*

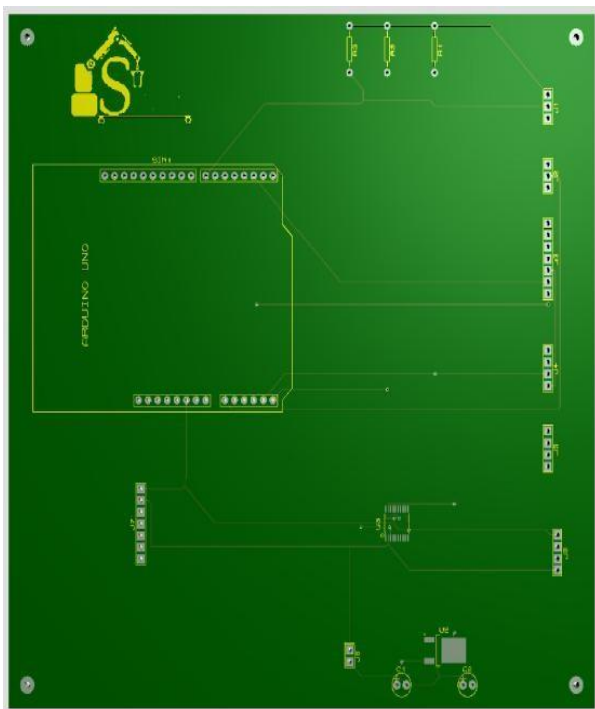
Nota. Fotografía ilustración elementos.

Diseño de la Tarjeta de Procesamiento y Control. Se diseña la tarjeta central del sistema (basada en microcontrolador como ESP32, Arduino Mega o similar), incluyendo:

- Procesamiento de señales provenientes de los sensores.
- Conversión analógica-digital (ADC) para sensores analógicos.
- Comunicación IoT (Wi-Fi, LoRa o Bluetooth).
- Almacenamiento temporal de datos (EEPROM o microSD).
- Algoritmo de detección de patrones e identificación de condiciones de alerta.
- Protección contra sobrecorrientes o fallos de voltaje.

Figura 16

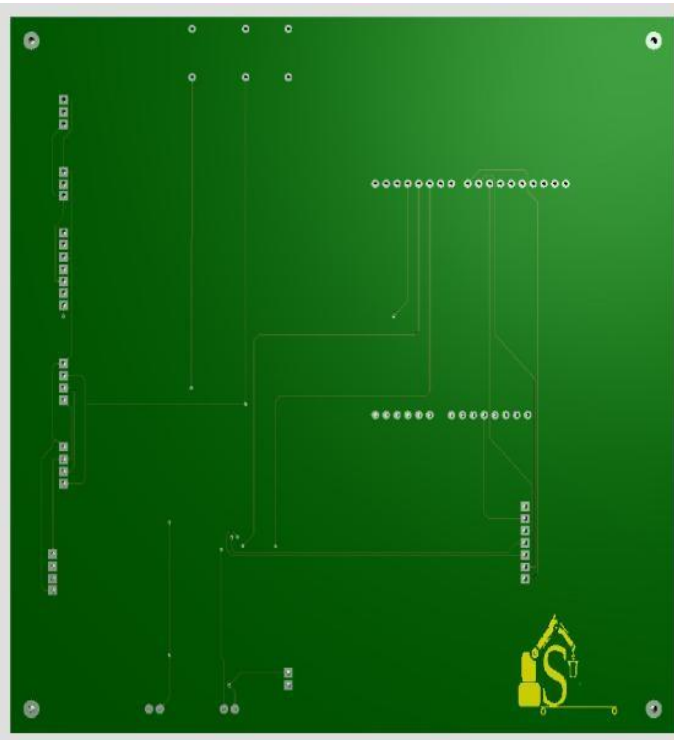
Diagramas PCB lado Dispositivos



Nota. Captura de Diagramas

Figura 17

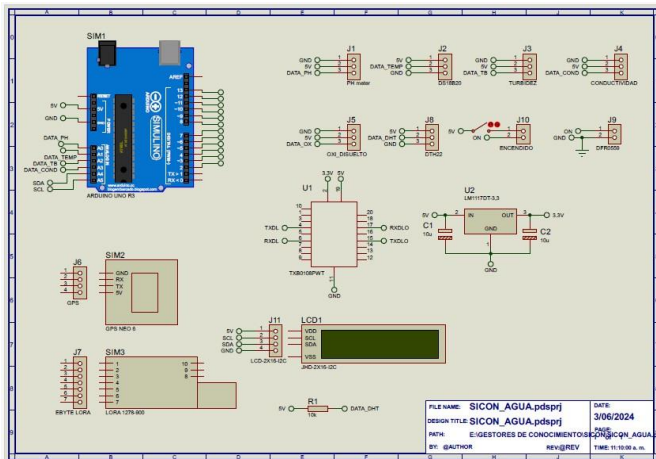
Diagramas PCB Lado Conexiones



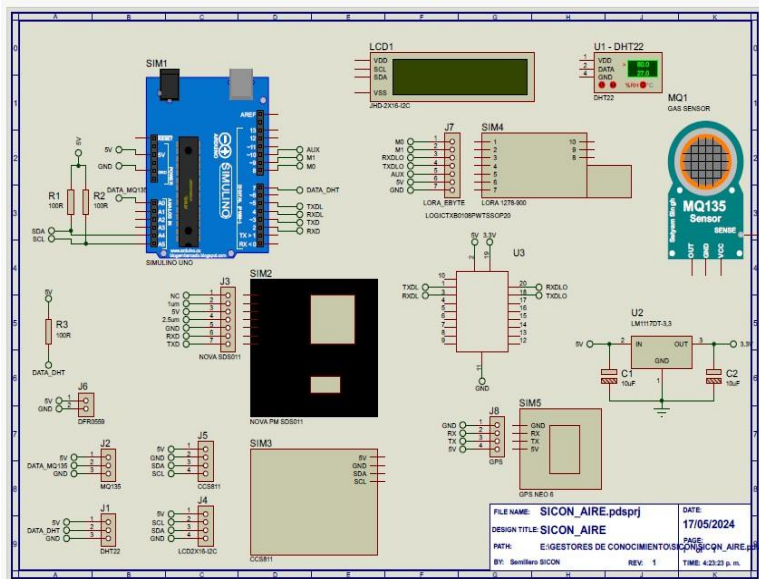
Nota. Captura de diagrama de conexiones.

Figura 18

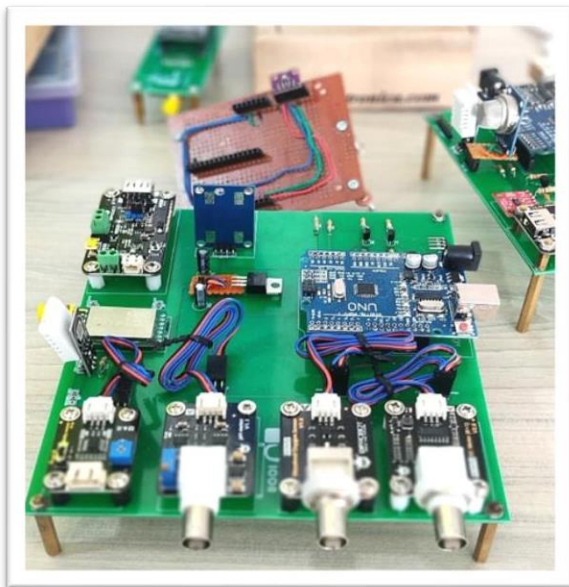
Placa Sensores Agua



Nota. Captura de Placa

Figura 19*Placa Sensores Aire*

Nota. Captura de placa

Figura 20*Tarjeta Sensores Agua*

Nota. Fotografía Tarjeta

Figura 21

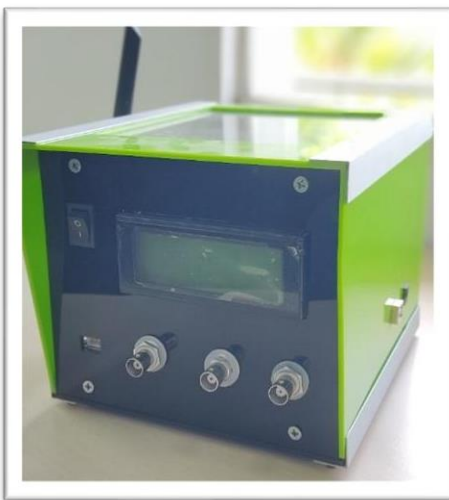
Tarjeta Sensores Agua Vista Superior



Nota. Tarjeta Sensor de Agua.

Figura 22

Módulo Sensores Agua



Nota. Módulo sensores agua.

Figura 23

Tarjeta Sensores Aire Vista Superior



Nota. Tarjeta vista superior.

Figura 24

Tarjeta Sensores Aire



Nota. Tarjeta Sensores Aire.

Diseño del Sistema de Abastecimiento de Energía. Para garantizar la autonomía del prototipo en campo, se diseña el sistema de alimentación energética considerando:

- Fuentes posibles: baterías recargables, sistema solar fotovoltaico, adaptador AC/DC.
- Reguladores de voltaje: para proteger los circuitos de sobrevoltajes o picos.
- Cargas de bajo consumo: elección de componentes eficientes.
- Módulo de carga solar: si se opta por fuente fotovoltaica, se incluye regulador MPPT y batería Li-Ion o LiFePO₄.
- Evaluación de autonomía energética esperada: según frecuencia de muestreo y comunicación.

Figura 25

Dispositivo Terminado



Nota. Dispositivo Final.

Fase 3 Sistema de Adquisición y Procesamiento de Datos

El desarrollo de software de análisis medioambiental es fundamental para comprender, monitorear y mitigar el impacto humano en el entorno natural. Este tipo de software permite la recopilación y el procesamiento eficiente de datos ambientales, como la calidad del aire, y el agua. Los datos obtenidos pueden ofrecer diagnósticos actuales que facilita la toma de decisiones informadas y la creación de estrategias sostenibles, promoviendo un equilibrio entre el desarrollo económico y la preservación del medio ambiente.

- **Arquitectura del Sistema.** El sistema se compone de dos nodos de medición y un Gateway encargado de gestionar la comunicación y transmisión de datos.
- **Nodo Aire.** El Nodo Aire está diseñado para la medición de parámetros que impactan la calidad del aire en diferentes entornos. Los principales componentes de este nodo son:
 - **Sensor Nova SDS011:** Mide la concentración de partículas en el aire (PM2.5 y PM10).
 - **Sensor DHT22:** Permite medir la temperatura y la humedad relativa del ambiente.
 - **Sensor CCS811:** Detecta la concentración de dióxido de carbono (CO2) y compuestos orgánicos volátiles (COVs).
 - **Sensor MQ135:** Capaz de medir una variedad de gases tóxicos, incluyendo el amoníaco, el dióxido de carbono y el alcohol.
 - **Módulo GPS Neo 6:** Proporciona datos de localización geográfica, facilitando el mapeo de los niveles de contaminación en función de la ubicación.
 - **Radio EBYTE LORA:** Asegura la transmisión de datos entre el nodo y el Gateway mediante comunicación inalámbrica de largo alcance (LoRa).

- **Pantalla LCD I2C 20x4:** Permite la visualización de los datos recolectados en tiempo real.

Nodo Agua. El Nodo Agua está diseñado para la medición de parámetros de calidad del agua, con sensores especializados para analizar diversas características físicas y químicas del agua. Los componentes principales incluyen:

Sensor de Oxígeno Disuelto. Evalúa la cantidad de oxígeno presente en el agua, un indicador crucial de la salud del ecosistema acuático.

Sensor DS18B20. Mide la temperatura del agua, lo que permite identificar cambios térmicos que pueden influir en la calidad.

Sensor de pH. Determina la acidez o alcalinidad del agua, una métrica clave para determinar la habitabilidad y la calidad general.

Sensor de Turbidez. Evalúa la cantidad de partículas suspendidas en el agua, lo que permite determinar su claridad.

Sensor de Conductividad. Mide la capacidad del agua para conducir electricidad, proporcionando una indicación de la concentración de iones en la misma.

Módulo GPS Neo 6. Al igual que en el Nodo Aire, este sensor provee información de localización geográfica, facilitando la georreferenciación de los datos.

Radio EBYTE LORA. Permite la transmisión de datos al Gateway utilizando tecnología de largo alcance.

Gateway. El Gateway centraliza la información recolectada por los nodos mediante un microcontrolador ESP32. Este dispositivo actúa como un servidor local que procesa los datos recibidos y, si se requiere, los envía a una plataforma en la nube para su almacenamiento y

análisis posterior. La conexión entre los nodos y el Gateway se realiza a través de comunicación LoRa, asegurando una transmisión de datos eficiente y de bajo consumo energético.

Figura 26

Módulo Gateway



Nota. Tecnología.

Tecnología Utilizada. El prototipo aprovecha múltiples tecnologías para garantizar la eficiencia y precisión del sistema:

- **Sensores IoT:** Estos dispositivos permiten la recolección continua de datos ambientales de manera autónoma y sin intervención humana directa.

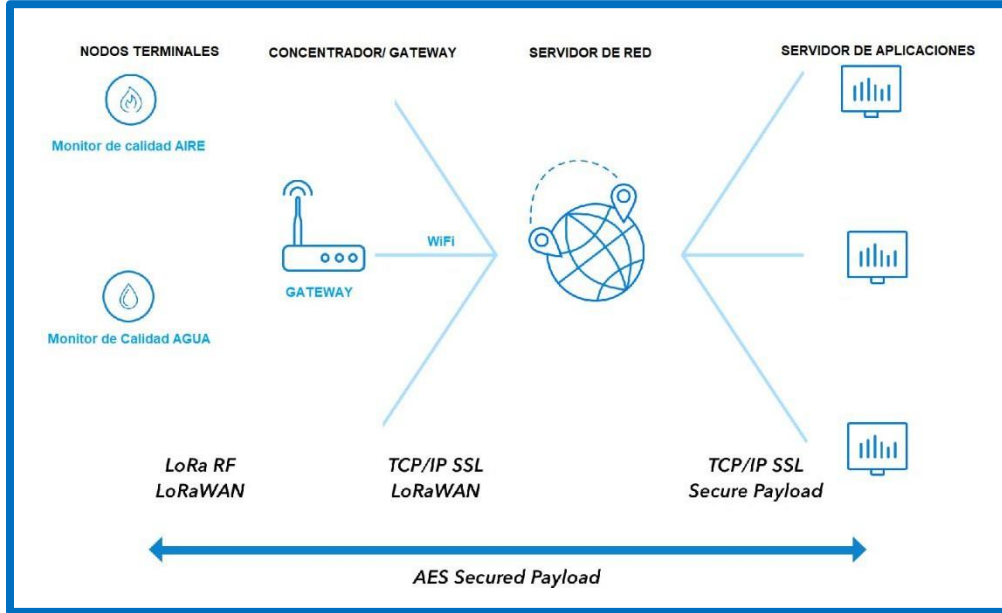
- **Comunicación LoRa:** La tecnología LoRa (Long Range) se utiliza para la transmisión de datos a largas distancias con un bajo consumo de energía, lo que es crucial en aplicaciones de monitoreo remoto.
- **Microcontroladores:** El Arduino Uno en los nodos y el ESP32 en el Gateway ofrecen la capacidad de procesamiento y gestión de datos en el propio sistema, reduciendo la latencia y optimizando la eficiencia operativa.
- **Almacenamiento y procesamiento en la nube:** Los datos recolectados pueden ser almacenados y procesados en servidores remotos para su análisis posterior, lo que permite realizar estudios a largo plazo y tomar decisiones basadas en grandes volúmenes de información.

Aplicaciones y Beneficios. El sistema modular diseñado tiene múltiples aplicaciones en el campo del monitoreo ambiental, tanto en áreas urbanas como rurales. Sus principales beneficios incluyen:

- **Monitoreo en Tiempo Real:** Los datos se transmiten de manera continua, lo que permite a los usuarios reaccionar rápidamente ante condiciones de contaminación que superen los niveles aceptables.
- **Escalabilidad:** Gracias a su diseño modular, el sistema puede ampliarse fácilmente para monitorear más parámetros o cubrir áreas más grandes simplemente agregando más nodos.
- **Portabilidad y Flexibilidad:** Los nodos son compactos y de bajo consumo energético, lo que los hace ideales para proyectos en ubicaciones remotas donde el acceso a la red eléctrica es limitado.
- **Análisis de Datos Georreferenciados:** La inclusión de módulos GPS en los nodos permite la generación de mapas de contaminación, facilitando la identificación de patrones y áreas críticas.

Figura 27

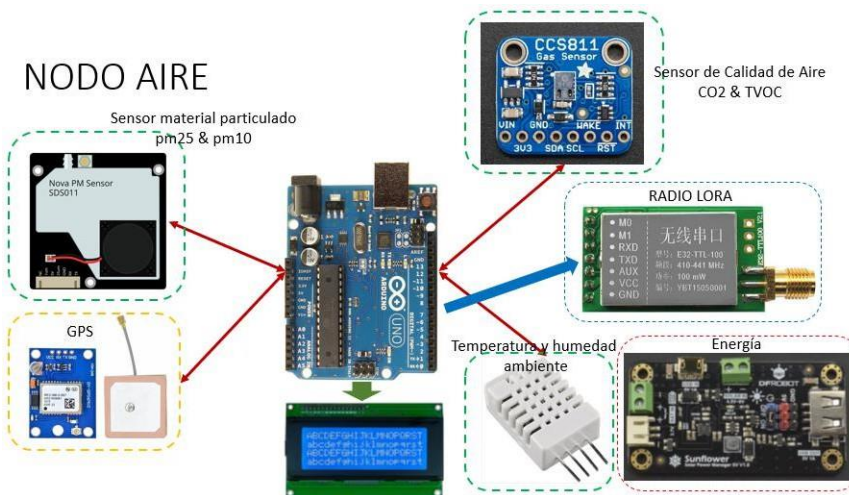
Arquitectura de la Red de Comunicaciones Basada en LORA



Nota. Arquitectura de comunicaciones

Figura 28

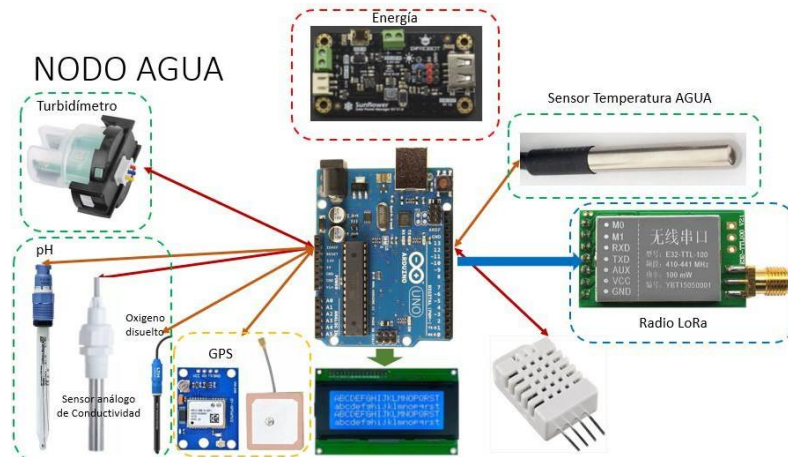
Infraestructura Nodo Aire



Nota. Captura Nodo de aire.

Figura 29

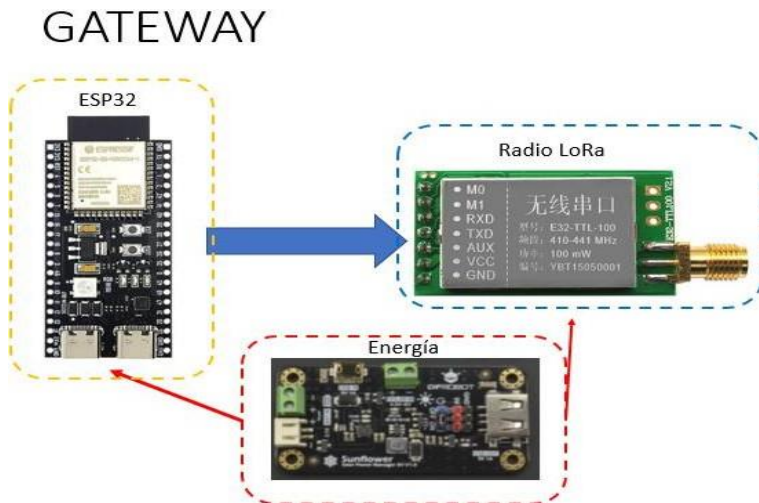
Infraestructura Nodo Agua



Nota. Captura Nodo de agua.

Figura 30

Infraestructura Gateway



Nota. Fotografía GATEWAY

Implementación Arduino Uno

En el contexto del proyecto de monitoreo ambiental con sensores y transmisión LoRa, el Arduino Uno cumple funciones clave como nodo sensor. Su rol específico puede resumirse así:

Lectura de sensores ambientales. El Arduino Uno actúa como unidad de adquisición de datos, recibiendo señales analógicas o digitales de sensores conectados, tales como:

- DHT22 (temperatura y humedad relativa) – lectura digital.
- MQ135 (COVs y gases contaminantes) – lectura analógica.
- SDS011 (partículas PM2.5 y PM10) – lectura digital vía UART.
- Sensor de pH – lectura analógica.
- Sensor de oxígeno disuelto (SEN0237-A) – lectura analógica o UART.
- *Procesamiento Inicial de Datos:* El Arduino realiza operaciones básicas como:
 - Conversión de señales analógicas a digitales.
 - Filtro y acondicionamiento digital de señales.
 - Estandarización o escalado de las lecturas.
 - Comunicación con Módulo LoRa. El Arduino Uno se conecta a un módulo LoRa

(como SX1278 o RFM95) mediante SPI para:

- Empaquetar y transmitir los datos recogidos por los sensores.
- Recibir comandos remotos, si se habilita la comunicación bidireccional.
- Autonomía como Nodo Remoto. Gracias a su bajo consumo y posibilidad de ser

alimentado por batería o panel solar, el Arduino Uno puede ser instalado en campo como nodo autónomo de monitoreo.

- Interacción con RTC y almacenamiento local (opcional)

- Puede conectarse a un módulo RTC (reloj de tiempo real) para registrar hora/fecha exacta de las mediciones.
- Opcionalmente, puede almacenar datos en una tarjeta SD si no hay transmisión en tiempo real.

Ventajas de usar Arduino Uno en este proyecto:

- Facilidad de programación con entorno Arduino IDE.
- Amplia documentación y comunidad de soporte.
- Múltiples pines para conexión simultánea de sensores.
- Estabilidad y confiabilidad en ambientes rurales o abiertos.
- Bajo costo para replicar múltiples nodos.
- Código para la recolección y transmisión de datos ambientales – MÓDULO AIRE

Este código está diseñado para recolectar y transmitir datos ambientales utilizando varios sensores conectados a un Arduino Uno. Los sensores incluyen un DHT22 (temperatura y humedad), un SDS011 (partículas de polvo en suspensión), un CCS811 (CO2 y compuestos orgánicos volátiles - TVOC), un MQ135 (gases), y un módulo GPS Neo 6 para determinar la ubicación geográfica. La transmisión de datos se realiza a través de un módulo LoRa EBYTE. Adicionalmente, el sistema entra en modo de bajo consumo para optimizar el uso de energía utilizando la librería LowPower.

Configuración del Hardware. A continuación, se detallan las conexiones de los diferentes módulos y sensores al Arduino Uno:

- DHT22 (Temperatura y Humedad): Pin de datos conectado al pin D2.
- SDS011 (Sensor de calidad del aire PM2.5 y PM10): Comunicación serial usando los pines D10 (RX) y D11 (TX).

- CCS811 (CO2 y TVOC): Conectado a través del bus I2C (A4 y A5).
- MQ135 (Sensor de gases): Pin de salida analógica conectado al pin A0.
- GPS Neo 6: Comunicación serial en los pines D4 (RX) y D3 (TX).
- LoRa EBYTE (Transmisión de datos): Comunicación serial por software usando los pines D6 (RX) y D7 (TX).
- LCD I2C (Pantalla): Conexión a través de los pines I2C (A4 y A5).

Código

```

/*****
*****
*
*   PROTOTIPO MODULAR DIFERENCIADO PARA MONITOREO
*   DE NIVELES CONTAMINANTES MEDIOAMBIENTALES BAJO LA
*   IMPLEMENTACION DE SENSORES INALAMBRICOS Y TECNOLOGÍA IoT
*
*****
*
*   * FileName:      NODO_AIRE_Ver3
*   * Processor:     ARDUINO UNO
*   * Biblioteca:    7.3.0-atmel3.6.1-arduino7/bin/avr-size
*   * Compiler:      Version: 2.3.3 - Date: 2024-09-25T09:41:18.242Z -
*   * CLI Version:   1.0.4 - Copyright © 2024 Arduino SA

```

* Author: SICON - UNAD

* Description: Prototipo modular diferenciado para monitoreo de niveles

* contaminantes medioambientales en el aire

* Rev. Date Comment

* v3.00 27/09/2024 Creacion y pruebas de transmisión de datos.

***/

/*

/*

* Conexiones del Arduino UNO (Código para el Transmisor)

* Conexiones

* Module Arduino

* DATA_MQ135 A0

* SDA A4

* SCL A5

```

* RX      D2 (Puerto GPS - TX)
* TX      D3 (Puerto GPS - RX)
* DHT22   D11
* M0      D10
* M1      D9
* EBYTE_TX D7 (Puerto TX - EBYTE)
* EBYTE_RX D6 (Puerto RX - EBYTE)
* Aux     D8
* TXD     D5 (Puerto RXD - NOVA SDS011)
* RXD     D4 (Puerto TXD - NOVA SDS011)
*

```

```

*****

```

```

*/

```

```

#include <LowPower.h>

#include <Wire.h>

#include <LiquidCrystal_I2C.h>

#include <SDS011.h>

#include <Adafruit_CCS811.h>

#include <DHT.h>

#include <SoftwareSerial.h>

#include <TinyGPSPlus.h>

```

```
// Definir el tipo de DHT y el pin al que está conectado

#define DHTPIN 2

#define DHTTYPE DHT22

// Inicializar LCD I2C

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4);

// Inicializar SDS011

SoftwareSerial sdsSerial(10, 11); // RX, TX para SDS011

SDS011 sds;

// Inicializar CCS811

Adafruit_CCS811 ccs;

// Inicializar DHT22

DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

// Inicializar GPS

SoftwareSerial gpsSerial(4, 3); // RX, TX para GPS Neo 6

TinyGPSPlus gps;

// Inicializar LoRa EBYTE

#define EBYTE_RX 6
```

```
#define EBYTE_TX 7

SoftwareSerial ssLoRa(EBYTE_RX, EBYTE_TX);

// Inicializar MQ135 (simulado en este caso, ajustar según hardware)

int MQ135Pin = A0;

void setup() {

  // Iniciar LCD

  lcd.init();

  lcd.backlight();

  lcd.setCursor(0, 0);

  lcd.print("Nodo Aire Iniciado");

  // Iniciar Serial

  Serial.begin(9600);

  ssLoRa.begin(9600);

  gpsSerial.begin(9600);

  sdsSerial.begin(9600);

  // Iniciar DHT22

  dht.begin();

  // Iniciar CCS811
```

```
if (!ccs.begin()) {  
    Serial.println("Failed to start CCS811 sensor! Please check your wiring.");  
    while (1);  
}  
  
// Calibración del CCS811 (espera inicial)  
while (!ccs.available());  
  
// Inicializar SDS011  
sds.begin(10, 11); // Pines RX y TX para SoftwareSerial (ajusta si es necesario)  
}  
  
void loop() {  
  
    // Variable para rastrear errores  
    bool errorOccurred = false;  
  
    // Lectura del sensor DHT22 (temperatura y humedad)  
    float t = dht.readTemperature();  
    float h = dht.readHumidity();  
    if (isnan(t) || isnan(h)) {  
        Serial.println("Error leyendo del sensor DHT22");  
        errorOccurred = true;  
    }  
}
```

```
    lcd.clear();

    lcd.setCursor(0, 0);

    lcd.print("Error DHT22");

}

// Lectura del sensor SDS011 (PM2.5 y PM10)

float pm25 = 0, pm10 = 0;

int errorSDS = sds.read(&pm25, &pm10);

if (errorSDS != 0) {

    Serial.println("Error leyendo del sensor SDS011");

    errorOccurred = true;

    lcd.clear();

    lcd.setCursor(0, 0);

    lcd.print("Error SDS011");

}

// Lectura del sensor CCS811 (CO2 y TVOC)

if (!ccs.available()) {

    Serial.println("Error: CCS811 no disponible");

    errorOccurred = true;

}

int co2 = 0, tvoc = 0;

if (ccs.readData()) {
```

```
co2 = ccs.getCO2();  
tvoc = ccs.getTVOC();  
} else {  
    Serial.println("Error leyendo del CCS811");  
    errorOccurred = true;  
}  
  
// Lectura de gases del MQ135  
int mq135Value = analogRead(MQ135Pin);  
if (mq135Value == 0) {  
    Serial.println("Error leyendo MQ135");  
    errorOccurred = true;  
}  
  
// Lectura del GPS  
while (gpsSerial.available() > 0) {  
    gps.encode(gpsSerial.read());  
}  
  
if (gps.charsProcessed() < 10) { // No se reciben suficientes datos GPS  
    Serial.println("Error: No se reciben datos GPS");  
    errorOccurred = true;  
    lcd.clear();
```

```
lcd.setCursor(0, 0);  
lcd.print("Error GPS");  
}  
  
if (!errorOccurred) {  
    // Si no hay errores, continuar con el procesamiento y transmisión de datos  
  
    lcd.clear();  
    lcd.setCursor(0, 0);  
    lcd.print("Temp: ");  
    lcd.print(t);  
    lcd.print("C");  
  
    lcd.setCursor(0, 1);  
    lcd.print("Hum: ");  
    lcd.print(h);  
    lcd.print("%");  
  
    lcd.setCursor(0, 2);  
    lcd.print("CO2: ");  
    lcd.print(co2);  
    lcd.print("ppm");  
  
    lcd.setCursor(0, 3);
```

```

lcd.print("PM2.5: ");

lcd.print(pm25);

lcd.print("ug/m3");

// Enviar datos por LoRa si todo está bien

String dataToSend = "NODO_AIRE, Temp: " + String(t) + "C, Hum: " + String(h) +
    "%, CO2: " + String(co2) + "ppm, TVOC: " + String(tvoc) +
    "ppb, PM2.5: " + String(pm25) + "ug/m3, PM10: " + String(pm10) +
    "ug/m3, MQ135: " + String(mq135Value);

if (gps.location.isValid()) {
    dataToSend += ", Lat: " + String(gps.location.lat(), 6) + ", Lon: " +
String(gps.location.lng(), 6);
} else {
    dataToSend += ", GPS No Fix";
}

ssLoRa.print(dataToSend);

Serial.println(dataToSend);

}

// Poner el Arduino en suspensión durante un intervalo de tiempo

// Aquí usamos sleep de 8 segundos repetidamente hasta completar el retraso deseado
for (int i = 0; i < (5000 / 8000); i++) {

```

```

LowPower.powerDown(SLEEP_8S, ADC_OFF, BOD_OFF);
}

```

Código para la Recolección y Transmisión de Datos Ambientales – MÓDULO AGUA

Este código está diseñado para recolectar y transmitir datos ambientales utilizando varios sensores conectados a un Arduino Uno. Los sensores incluyen un DHT22 (temperatura y humedad), un DS18B20 (temperatura en líquidos), sensores para turbidez, pH metro, conductividad y oxígeno disuelto), y un módulo GPS Neo 6 para determinar la ubicación geográfica. La transmisión de datos se realiza a través de un módulo LoRa EBYTE. Adicionalmente, el sistema entra en modo de bajo consumo para optimizar el uso de energía utilizando la librería LowPower.

Código

```

/*****
*****
*
*   PROTOTIPO MODULAR DIFERENCIADO PARA MONITOREO
*   DE NIVELES CONTAMINANTES MEDIOAMBIENTALES BAJO LA
*   IMPLEMENTACION DE SENSORES INALAMBRICOS Y TECNOLOGÍA IoT
*
*****
*****
*
*   FileName:    NODO_AGUA_Ver3

```

```

* Processor:   ARDUINO UNO
* Biblioteca:  7.3.0-atmel3.6.1-arduino7/bin/avr-size
* Compiler:    Version: 2.3.3 - Date: 2024-09-25T09:41:18.242Z -
* CLI Version:  1.0.4 - Copyright © 2024 Arduino SA
* Author:      SICON - UNAD
* Description: Prototipo modular diferenciado para monitoreo de niveles
*              contaminantes medioambientales en el agua

```

```

*****

```

```

***

```

```

* Rev.    Date    Comment
* v3.00   27/09/2024  Creacion y pruebas de transmisión de datos.

```

```

*****

```

```

***/

```

```

/*

```

```

*****

```

```

*           Conexiones del Arduino UNO (Código para el Transmisor)

```

```

*****

```

```

****

```

```

* Conexiones del Arduino UNO (Código para el Transmisor)

```

*

* Conexiones

* Module Arduino

* DATA_PH A0

* DATA_TEMP A1

* DATA_TB A2

* DATA_COND A3

* SDA A4

* SCL A5

* DATA_OXI D10

* DATA_DHT D9

* AUX D8

* RXDL D7 (Puerto RXDLO - EBYTE)

* TXDL D6 (Puerto TXDLO - EBYTE)

* M1 D5

* M0 D4

* TX D3 (Puerto GPS - RX)

* RX D2 (Puerto GPS - TX)

* TX D1 (Comunicación serial)

* RX D0 (Comunicación serial)

*****/

#include <LowPower.h>

```
#include <Wire.h>

#include <LiquidCrystal_I2C.h>

#include <OneWire.h>

#include <DallasTemperature.h>

#include <DHT.h>

#include <TinyGPSPlus.h>

#include <SoftwareSerial.h>

// Pines

#define DHTPIN 9    // Pin de datos del DHT22

#define DHTTYPE DHT22 // Tipo de sensor DHT

#define PH_PIN A0    // Pin del pHmetro

#define TURB_PIN A2 // Pin del sensor de turbidez

#define OXYGEN_PIN 10 // Pin del sensor de oxígeno disuelto

#define ONE_WIRE_BUS A1 // Pin para el DS18B20

#define RXPin 2    // Pin RX para GPS Neo 6

#define TXPin 3    // Pin TX para GPS Neo 6

// Pines EBYTE LoRa

#define EBYTE_RX 6 // Pin RX para EBYTE LoRa

#define EBYTE_TX 7 // Pin TX para EBYTE LoRa

#define AUX_PIN 8 // Pin AUX del EBYTE LoRa (opcional)
```

```
#define M0_PIN 4    // Pin M0 del EBYTE (modo de operación)
#define M1_PIN 5    // Pin M1 del EBYTE (modo de operación)

// Crear instancias

DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);

DallasTemperature sensors(&oneWire);

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4); // Dirección I2C del LCD

TinyGPSPlus gps; // Instancia GPS

SoftwareSerial ssGPS(RXPin, TXPin); // Serial para GPS

SoftwareSerial ssLoRa(EBYTE_RX, EBYTE_TX); // Serial para EBYTE LoRa

void setup() {

    // Inicializar pantalla LCD

    lcd.init();

    lcd.backlight();

    // Inicializar DHT22

    dht.begin();

    // Inicializar DS18B20

    sensors.begin();
```

```
// Inicializar GPS Neo 6

ssGPS.begin(9600); // Velocidad estándar de comunicación GPS

// Inicializar EBYTE LoRa

ssLoRa.begin(9600); // Velocidad estándar de EBYTE

pinMode(M0_PIN, OUTPUT);

pinMode(M1_PIN, OUTPUT);

pinMode(AUX_PIN, INPUT);

// Configurar EBYTE en modo normal (M0 = 0, M1 = 0)

digitalWrite(M0_PIN, LOW);

digitalWrite(M1_PIN, LOW);

lcd.setCursor(0, 0);

lcd.print("Nodo_Agua Inicializando");

delay(2000);

}

void loop() {

// Leer datos de los sensores

float hum = dht.readHumidity();

float temp = dht.readTemperature();
```

```
sensors.requestTemperatures();

float waterTemp = sensors.getTempCByIndex(0);

float pHValue = analogRead(PH_PIN) * (5.0 / 1023.0); // Ajustar según calibración

float turbidityValue = analogRead(TURB_PIN) * (5.0 / 1023.0); // Ajustar según
calibración

float oxygenValue = analogRead(OXYGEN_PIN) * (5.0 / 1023.0); // Ajustar según
calibración

// Leer datos del GPS

while (ssGPS.available() > 0) {
    gps.encode(ssGPS.read());
}

float latitude = 0.0, longitude = 0.0;

if (gps.location.isValid()) {
    latitude = gps.location.lat();
    longitude = gps.location.lng();
}

// Mostrar en LCD

lcd.clear();

lcd.setCursor(0, 0);

lcd.print("Temp:");
```

```
lcd.print(temp);

lcd.print("C Hum:");

lcd.print(hum);

lcd.setCursor(0, 1);

lcd.print("pH:");

lcd.print(pHValue);

lcd.setCursor(0, 2);

lcd.print("Turb:");

lcd.print(turbidityValue);

lcd.setCursor(0, 3);

lcd.print("O2:");

lcd.print(oxygenValue);

lcd.setCursor(10, 3);

lcd.print("TAgua:");

lcd.print(waterTemp);

// Enviar datos por EBYTE LoRa

String dataToSend = "Temp: " + String(temp) + "C, Hum: " + String(hum) +
    "%, pH: " + String(pHValue) +
    ", Turb: " + String(turbidityValue) +
    ", O2: " + String(oxygenValue) +
    ", TAgua: " + String(waterTemp);
```

```
// Aquí añadimos la etiqueta "NODO_AGUA" antes del mensaje
dataToSend = "NODO_AGUA, " + dataToSend;

if (gps.location.isValid()) {
    dataToSend += ", Lat: " + String(latitude, 6) + ", Lon: " + String(longitude, 6);
} else {
    dataToSend += ", GPS No Fix";
}

// Enviar datos al módulo LoRa
ssLoRa.print(dataToSend);
Serial.println(dataToSend);

// Poner el Arduino en suspensión durante un intervalo de tiempo
// Aquí usamos sleep de 8 segundos repetidamente hasta completar el retraso deseado
for (int i = 0; i < (5000 / 8000); i++) {
    LowPower.powerDown(SLEEP_8S, ADC_OFF, BOD_OFF);
}
}
```

Código para la Recolección y Transmisión de Datos Ambientales – NODO GATEWAY

Para generar el arreglo con las variables leídas desde cada nodo (NODO_AIRE y NODO_AGUA), podemos descomponer los datos recibidos y asignar cada valor a las variables correspondientes. Usaremos delimitadores como comas o algún otro carácter para identificar cada variable en la cadena de datos recibidos. A continuación, se muestra el código para extraer y procesar los datos de cada nodo:

Código

```

/*****
*****
*
*   PROTOTIPO MODULAR DIFERENCIADO PARA MONITOREO
*   DE NIVELES CONTAMINANTES MEDIOAMBIENTALES BAJO LA
*   IMPLEMENTACION DE SENSORES INALAMBRICOS Y TECNOLOGÍA IoT
*
*****
*
* FileName:    GATEWAY_EBYTEVer2.ino
* Processor:   ESP32 - DEVKIT V1
* Biblioteca:  7.3.0-atmel3.6.1-arduino7/bin/avr-size
* Compiler:    Version: 2.3.3 - Date: 2024-09-25T09:41:18.242Z -
* CLI Version: 1.0.4 - Copyright © 2024 Arduino SA
* Author:      SICON - UNAD
* Description: Prototipo modular diferenciado para monitoreo de niveles

```



```
HardwareSerial SerialLoRa(1);
```

```
// Variables de red WiFi y ThingSpeak
```

```
const char* ssid = "Pedro Torres Silva"; // Cambia por tu SSID
```

```
const char* password = "Konan2022"; // Cambia por tu contraseña
```

```
String server = "http://api.thingspeak.com";
```

```
String apiKeyAire = "FZ0ZICF7PXEUAUQO"; // Cambia por tu clave API del canal 1
```

(Nodo Aire)

```
String apiKeyAgua = "GFF2Y80D4VIXX84S"; // Cambia por tu clave API del canal 2
```

(Nodo Agua)

```
String apiKeyGPS = "6CCA79W0CNE8TQ52"; // Cambia por tu clave API del canal 3
```

(GPS)

```
// Declarar variables para los datos de cada nodo
```

```
// Aire
```

```
float Temp;
```

```
float Hum;
```

```
float co2;
```

```
float tvoc;
```

```
float pm25;
```

```
float pm10;
```

```
float mq135Value;
```

```
// Agua

float hum;

float temp;

float waterTemp;

float pHValue;

float turbidityValue;

float oxygenValue;

// GPS

float latAire;

float lonAire;

float latAgua;

float lonAgua;

void setup() {

  // Inicializar comunicación serie para el monitor

  Serial.begin(115200);

  // Inicializar WiFi

  WiFi.begin(ssid, password);

  Serial.println("Conectando a WiFi...");

  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {

    delay(1000);
```

```
    Serial.print(".");  
}  
Serial.println("Conectado a WiFi");  
  
// Inicializar HardwareSerial para el EBYTE LoRa  
SerialLoRa.begin(9600, SERIAL_8N1, EBYTE_RX, EBYTE_TX);  
  
pinMode(M0_PIN, OUTPUT);  
pinMode(M1_PIN, OUTPUT);  
pinMode(AUX_PIN, INPUT);  
digitalWrite(M0_PIN, LOW);  
digitalWrite(M1_PIN, LOW);  
  
Serial.println("Gateway ESP32 Listo para recibir datos de NODO_AIRE y  
NODO_AGUA...");  
}  
  
void loop() {  
    if (SerialLoRa.available()) {  
        String receivedData = "";  
  
        while (SerialLoRa.available()) {  
            char incomingByte = SerialLoRa.read();  
            receivedData += incomingByte;  
        }  
    }  
}
```

```
}

Serial.println("Datos recibidos:");

Serial.println(receivedData);

if (receivedData.startsWith("NODO_AIRE")) {

  Serial.println("Procesando datos de NODO_AIRE...");

  procesarDatosAire(receivedData.substring(10));

  enviarDatosThingSpeakAire();

  enviarDatosGPS(latAire, lonAire);

} else if (receivedData.startsWith("NODO_AGUA")) {

  Serial.println("Procesando datos de NODO_AGUA...");

  procesarDatosAgua(receivedData.substring(10));

  enviarDatosThingSpeakAgua();

  enviarDatosGPS(latAgua, lonAgua);

} else {

  Serial.println("Origen desconocido");

}

}

delay(1000);

}
```

```
// Procesar datos del NODO_AIRE (incluyendo GPS)

void procesarDatosAire(String data) {

    int index = 0;

    Temp = data.substring(index, data.indexOf(',', index)).toFloat();
    index = data.indexOf(',', index) + 1;

    Hum = data.substring(index, data.indexOf(',', index)).toFloat();
    index = data.indexOf(',', index) + 1;

    co2 = data.substring(index, data.indexOf(',', index)).toFloat();
    index = data.indexOf(',', index) + 1;

    tvoc = data.substring(index, data.indexOf(',', index)).toFloat();
    index = data.indexOf(',', index) + 1;

    pm25 = data.substring(index, data.indexOf(',', index)).toFloat();
    index = data.indexOf(',', index) + 1;

    pm10 = data.substring(index, data.indexOf(',', index)).toFloat();
    index = data.indexOf(',', index) + 1;

    mq135Value = data.substring(index, data.indexOf(',', index)).toFloat();
    index = data.indexOf(',', index) + 1;

    // Extraer latitud y longitud del GPS

    latAire = data.substring(index, data.indexOf(',', index)).toFloat();
    index = data.indexOf(',', index) + 1;

    lonAire = data.substring(index).toFloat();
```

```
// Imprimir los datos

Serial.println("Temperatura Aire: " + String(Temp));

Serial.println("Humedad Aire: " + String(Hum));

Serial.println("CO2: " + String(co2));

Serial.println("TVOC: " + String(tvoc));

Serial.println("PM2.5: " + String(pm25));

Serial.println("PM10: " + String(pm10));

Serial.println("MQ135: " + String(mq135Value));

Serial.println("Latitud Aire: " + String(latAire));

Serial.println("Longitud Aire: " + String(lonAire));

}

// Procesar datos del NODO_AGUA (incluyendo GPS)

void procesarDatosAgua(String data) {

    int index = 0;

    hum = data.substring(index, data.indexOf(',', index)).toFloat();

    index = data.indexOf(',', index) + 1;

    temp = data.substring(index, data.indexOf(',', index)).toFloat();

    index = data.indexOf(',', index) + 1;

    waterTemp = data.substring(index, data.indexOf(',', index)).toFloat();

    index = data.indexOf(',', index) + 1;
```

```
pHValue = data.substring(index, data.indexOf(',', index)).toFloat();  
  
index = data.indexOf(',', index) + 1;  
  
turbidityValue = data.substring(index, data.indexOf(',', index)).toFloat();  
  
index = data.indexOf(',', index) + 1;  
  
oxygenValue = data.substring(index, data.indexOf(',', index)).toFloat();  
  
index = data.indexOf(',', index) + 1;  
  
  
// Extraer latitud y longitud del GPS  
  
latAgua = data.substring(index, data.indexOf(',', index)).toFloat();  
  
index = data.indexOf(',', index) + 1;  
  
lonAgua = data.substring(index).toFloat();  
  
  
// Imprimir los datos  
  
Serial.println("Humedad Agua: " + String(hum));  
  
Serial.println("Temperatura Nodo: " + String(temp));  
  
Serial.println("Temperatura Agua: " + String(waterTemp));  
  
Serial.println("pH: " + String(pHValue));  
  
Serial.println("Turbidez: " + String(turbidityValue));  
  
Serial.println("Oxígeno disuelto: " + String(oxygenValue));  
  
Serial.println("Latitud Agua: " + String(latAgua));  
  
Serial.println("Longitud Agua: " + String(lonAgua));  
  
}
```

```
// Enviar datos de NODO_AIRE a ThingSpeak (Canal 1)

void enviarDatosThingSpeakAire() {

  if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {

    HTTPClient http;

    String url = server + "/update?api_key=" + apiKeyAire +

      "&field1=" + String(Temp) +

      "&field2=" + String(Hum) +

      "&field3=" + String(co2) +

      "&field4=" + String(tvoc) +

      "&field5=" + String(pm25) +

      "&field6=" + String(pm10) +

      "&field7=" + String(mq135Value);

    http.begin(url);

    int httpResponseCode = http.GET();

    if (httpResponseCode > 0) {

      Serial.println("Datos enviados a ThingSpeak (NODO_AIRE)");

    } else {

      Serial.println("Error al enviar datos (NODO_AIRE): " + String(httpResponseCode));

    }

    http.end();

  }

}
```

```

// Enviar datos de NODO_AGUA a ThingSpeak (Canal 2)

void enviarDatosThingSpeakAgua() {

  if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {

    HTTPClient http;

    String url = server + "/update?api_key=" + apiKeyAgua +

      "&field1=" + String(hum) +

      "&field2=" + String(temp) +

      "&field3=" + String(waterTemp) +

      "&field4=" + String(pHValue) +

      "&field5=" + String(turbidityValue) +

      "&field6=" + String(oxygenValue);

    http.begin(url);

    int httpResponseCode = http.GET();

    if (httpResponseCode > 0) {

      Serial.println("Datos enviados a ThingSpeak (NODO_AGUA)");

    } else {

      Serial.println("Error al enviar datos (NODO_AGUA): " +

String(httpResponseCode));

    }

    http.end();

  }

}

```

```

// Enviar datos GPS a ThingSpeak (Canal 3)

void enviarDatosGPS(float lat, float lon) {

if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {

    HTTPClient http;

    String url = server + "/update?api_key=" + apiKeyGPS +

        "&field1=" + String(lat) +

        "&field2=" + String(lon);

    http.begin(url);

    int httpResponseCode = http.GET();

    if (httpResponseCode > 0) {

        Serial.println("Datos GPS enviados a ThingSpeak");

    } else {

        Serial.println("Error al enviar datos GPS: " + String(httpResponseCode));

    }

    http.end();

}

}

```

Fase 4 Transmisión de la Información

La etapa de transmisión de la información tiene como objetivo principal garantizar que los datos capturados por los sensores en campo sean enviados de forma segura, eficiente y de largo alcance a una unidad central de procesamiento. Para ello, se implementa una red inalámbrica de baja potencia y largo alcance utilizando la tecnología LoRa (Long Range). Esta

tecnología es ideal para aplicaciones IoT en zonas rurales o con cobertura limitada de Wi-Fi o redes móviles, como es el caso del monitoreo ambiental descentralizado.

Tecnología Lora (Modulo sx1278) . Al igual que muchas tecnologías como (wifi, Bluetooth, LTE, SIGFOX O ZIBEGGE) trabaja de forma inalámbrica, diseñado o deal para grandes distancias o redes IOT que emplean sensores como también bajo consumo. emplea una modulación de radiofrecuencia patentada el módulo sx1278 por ejemplo funciona a una frecuencia de 945MHz. Es un módulo hecho de alta calidad. La dimensión es muy pequeña, sólo 17 x 16 mm. La antena es una antena de resorte, proporciona una comunicación de espectro extendido de gama ultra larga y una inmunidad de alta interferencia mientras minimiza el consumo de corriente. El uso de la técnica de modulación patentada LoTaTM de Semtech SX1287 puede lograr una sensibilidad de más de -148dBm.

La alta sensibilidad combinada con el amplificador de potencia integrado de +20 dBm genera un presupuesto de enlace líder en la industria lo que lo hace óptimo para cualquier aplicación que requiera rango o robustez también proporciona ventajas significativas tanto en el bloqueo como en la selectividad respecto a las técnicas de modulación convencionales, resolviendo el compromiso de diseño tradicional entre el alcance, la inmunidad a las interferencias y el consumo de energía. Estos dispositivos también admiten modos de FSK de alto rendimiento (G) para sistemas que incluyen WMBus, IEEE802.15.4g. Temperatura de trabajo: -40- +85 grados.

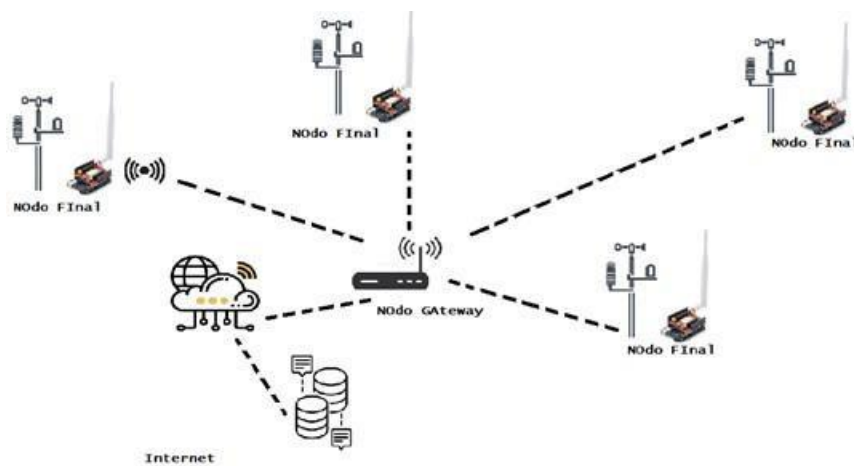
Protocolo de Red Lorawan

Protocolo de red que se basa en lora , esencialmente para redes de bajo costo o potencia y área amplia (LPWAN) en si se enfoca en administrar e interconectar dispositivos lora, ya que

estos solo logran una comunicación punto a punto, el protocolo lorawan nos permitirá interconectar múltiples nodos o sensores manteniendo las ventajas que estos nos presentan frente al uso energético y la mayor ventaja en distancia, sumando conexiones seguras mediante encriptados de extremo a extremo, en si nos permitirá interconectar los diversos nodos con sus respectivos red de sensores, comunicándolo a los Gateway para su comunicación a internet.

Figura 31

Tipología Estrella



Nota. Imagen de captura de tipología

La red Lora alrededor del mundo tiene especificadas bandas de frecuencia dentro las de las más comunes y utilizadas en lorawan son:

Tabla 6

Bandas de Frecuencias en Lorawan

Región	Frecuencia en MHZ
Asia	923 MHZ
Europe, India, Africa	868 MHZ
US, North	915 MHZ

Estructura de la Red. El diseño de nuestra red debe cumplir con algunas características fundamentales siendo esta aplicada al monitoreo o analizar variables ambientales estará repartida inicialmente por un punto o sector, pero no significa que se quede en esta zona determinada, sino que permita seguir escalando o creciendo incorporando cada vez más nodos o sensores estas características se describen como:

- Escalabilidad
- Seguridad de la red
- Disponibilidad

Topología. El conjunto de dispositivos interconectados por diferentes medios de transporte como por cable de fibra, par trenzado, señales inalámbricas o cualquier otro método que permita establecer un camino o comunicación entre los elementos que esta la conforman lo podemos comprender como una red esta se representa por un diagrama o un diseño más conocido como topologías donde se conocen distintas clases permitiendo ventajas como interpretación de los elementos que en esta intervienen o la conforman como inventario u organización. Dentro nuestro prototipo se trabajará sobre una topología en estrella ya que es sobre esta donde trabaja las comunicaciones entre dispositivos LoraWAN, a través de nodos Gateway que nos permite comunicar con múltiples nodos finales. La red lora se caracteriza por conexiones o comunicaciones punto a punto.

Prototipo Dispositivos. Nuestra red está conformada por diversos elementos entre los que encontramos nuestros nodos finales los cuales estarán integrados con los demás instrumentos de medición encargados de captar y procesar la información para estar transmitiendo punto a punto a nuestro nodo central o Gateway.

- Módulo Transceptor RFM95W HopeRF LoRa Ultra Long Range – 915 Mhz
- Módulos de radio LoRa + 20 dBm que tienen una modulación especial de radio

que no es compatible con los RFM69, pero estos pueden ir mucho mucho más lejos. Se puede ir fácilmente a 2 kilómetros en línea de visión utilizando antenas de hilo simple, o hasta 20 km con antenas direccionales y ajustes especiales.

Estos dispositivos también son compatibles con los modos de alto rendimiento (G) FSK para sistemas incluyendo WMBus, IEEE802.15.4g. El RFM96W entrega excepcional ruido de fase, selectividad, linealidad del receptor y IIP3 para el consumo corriente significativamente más bajos que los dispositivos de la competencia. Especificaciones

- LoRaTM Modem.
- 168 dB maximum link budget.
- +20 dBm – 100 mW constant RF output vs. V supply.
- +14 dBm high efficiency PA.
- Velocidad de bits programable hasta 300 kbps.
- Alta Sensibilidad: Bajada hasta -148 dBm.
- Bullet-proof front end: IIP3 = -12.5 dBm.
- Excellent blocking immunity.
- Baja corriente de RX de 10,3 mA, 200 nA registro de retención.
- Sintetizador totalmente integrado con una resolución de 61 Hz.
- FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRaTM and OOK modulation.
- Built-in bit synchronizer for clock recovery.
- Preamble detection.
- 127 dB Dynamic Range RSSI.

- Automatic RF Sense and CAD with ultra-fast AFC.
- Packet engine up to 256 bytes with CRC.
- Built-in temperature sensor and low battery indicator.
- Tamaño de módulo: 16*16mm

Arquitectura del Sistema de Transmisión. La arquitectura del sistema de transmisión de información mediante tecnología LoRa (Long Range) se fundamenta en una red de tipo estrella, donde varios nodos remotos sensores se comunican de forma unidireccional o bidireccional con un nodo central o gateway. Este gateway actúa como punto de recolección y reenvío de los datos hacia una plataforma en la nube o sistema local de almacenamiento y análisis. Componentes de la arquitectura:

Nodos remotos sensores. Cada nodo consiste en un microcontrolador (ESP32, Arduino Pro Mini, etc.) que gestiona la lectura de sensores y controla un módulo LoRa (como RFM95, SX1276 o SX1278). Están equipados con sensores específicos para monitorear variables ambientales: temperatura (DHT22), humedad (DHT22), oxígeno disuelto (SEN0237), pH, COVs (MQ-135) y partículas PM2.5 (SDS011). Cada nodo puede funcionar de manera autónoma, alimentado por baterías recargables o mediante un sistema fotovoltaico, incorporan una antena externa para mejorar la cobertura de señal y ampliar el alcance.

Módulo LoRa. Se basa en una radiofrecuencia sub-GHz (frecuencias comunes: 868 MHz o 915 MHz), con modulación de espectro ensanchado que permite alcanzar largas distancias (hasta 10-15 km en campo abierto). Tiene configuraciones ajustables como Spreading Factor, Bandwidth, Coding Rate, que determinan la tasa de transmisión, alcance y fiabilidad del enlace.

Gateway ESP32 + LoRa. Es el nodo central de la red, donde se recibe la información de todos los nodos remotos. Está compuesto por un ESP32 (que ofrece Wi-Fi y BLE) y un módulo

LoRa SX1276/78, más una antena de alto rendimiento. El ESP32 procesa los datos recibidos y los transmite, mediante Wi-Fi, a una plataforma de visualización o base de datos remota (como ThingSpeak, Ubidots, InfluxDB o un servidor MQTT local). Se puede agregar una pantalla OLED o LCD para monitoreo local en tiempo real.

Enlace Hacia la Nube o Servidor. Puede utilizar protocolos como HTTP, MQTT o WebSockets, dependiendo del modelo de comunicación elegido. Alternativamente, puede enviar datos a una base de datos local o tarjeta SD, si no hay conectividad externa.

Funcionamiento General del Sistema. Captura y empaquetado de datos, cada nodo remoto realiza lo siguiente:

- Inicializa sus sensores y el módulo LoRa.
- Lee periódicamente los datos ambientales según el intervalo programado (por ejemplo, cada 5 o 10 minutos).
- Convierte las lecturas analógicas o digitales en un formato estructurado y compacto, como una cadena JSON, CSV o un paquete binario para optimizar el uso del ancho de banda LoRa.

b) Transmisión LoRa. El paquete de datos se transmite desde el nodo remoto al gateway utilizando el módulo LoRa. El sistema puede configurarse con o sin confirmación (ACK/NACK). Las frecuencias y tiempos de transmisión se calibran para evitar colisiones y respetar las normativas locales del espectro radioeléctrico (duty cycle).

c) Recepción y decodificación en el Gateway. El gateway escucha de forma continua en el canal LoRa configurado. Al recibir un paquete, lo decodifica y verifica su integridad (puede usar CRC, checksum o validaciones internas). Extrae los datos y los organiza por nodo y variable medida.

d) Procesamiento y retransmisión Wi-Fi. El ESP32 del Gateway. utiliza su conexión Wi-Fi integrada para enviar los datos a la nube. Puede hacerlo en tiempo real o cada cierto intervalo. Se pueden emplear plataformas de IoT (ThingSpeak, Ubidots, Node-RED, etc.) para graficar y almacenar los datos.

e) Visualización y Análisis. Una vez en la nube, los datos pueden ser visualizados en dashboards, descargados como reportes, o conectados a algoritmos de análisis de patrones o IA que alerten sobre niveles anormales de contaminación.

f) Ventajas Funcionales del Sistema. Alta escalabilidad, se pueden añadir más nodos fácilmente. Bajo consumo: ideal para zonas rurales sin acceso constante a energía. Largo alcance: hasta 10-15 km en campo abierto, lo cual supera ampliamente tecnologías como Wi-Fi o Sigfox, el sistema puede seguir operando incluso con conexión intermitente a internet, almacenando los datos localmente hasta poder retransmitirlos.

Diseño del Gateway ESP32 + LoRa

Tabla 7

Componentes del Gateway

Componente	Descripción
ESP32	Microcontrolador con conectividad Wi-Fi y BLE
Módulo LoRa (SX1276/SX1278)	Comunicación inalámbrica de largo alcance
Antena LoRa	Mejora de alcance y calidad de la señal
Fuente de alimentación	5V DC, solar o por batería recargable
Puerto serial o USB	Para programación y monitoreo local

Nota. Tabla de componente y descripción

- Flujo de funcionamiento del gateway:
- Inicialización de la comunicación LoRa y Wi-Fi.
- Escucha continua en el canal LoRa definido.
- Recepción de paquetes desde los nodos.
- Verificación de la integridad del paquete.
- Envío del contenido a la nube o almacenamiento local.

La implementación de un sistema de transmisión basado en LoRa y ESP32 permite construir una red robusta, de bajo costo y gran cobertura para la recolección de datos ambientales. Esta arquitectura facilita el monitoreo continuo de variables críticas en tiempo real, aun en áreas con baja infraestructura tecnológica, posicionando al proyecto como una solución escalable y adaptable a diferentes entornos de aplicación.

Fase 5 Visualización y Disposición de la Información

Visualización de datos. En los sistemas IoT enfocados en el monitoreo ambiental, la etapa de visualización de la información es clave para la toma de decisiones, el análisis de tendencias y la generación de alertas ante condiciones anómalas. Para este proyecto, donde múltiples nodos inalámbricos remotos recopilan datos a través de sensores LoRa y los envían a un gateway central ESP32, es indispensable estructurar adecuadamente la recolección, almacenamiento, procesamiento y visualización de los datos en plataformas accesibles y en tiempo real.

Flujo General de la Información. El flujo de información desde la captura hasta la visualización se estructura en cinco etapas principales:

- Captura de datos por sensores (PM, temperatura, humedad, oxígeno, pH, COVs).
- Transmisión vía LoRa hacia el gateway.
- Recepción y decodificación en el gateway ESP32.
- Envío de datos a una plataforma en la nube mediante Wi-Fi (protocolo HTTP o MQTT).
- Visualización estructurada en dashboards dinámicos.
- Estructura de la Visualización de Datos

Interfaz Web / Dashboard IoT. El sistema debe incluir un dashboard centralizado que permita:

- Monitoreo en tiempo real de cada variable ambiental por nodo.
- Gráficas históricas con rangos de tiempo personalizables (día, semana, mes).
- Alertas visuales y sonoras ante valores fuera de umbrales normales.
- Panel de control por nodo, donde se indique:
 - ID del nodo.
 - Último timestamp.
 - Estado del nodo (activo/inactivo).
 - Niveles actuales de cada sensor.

Herramientas Recomendadas

- ThingSpeak (MATLAB integrado, fácil configuración).
- Ubidots (interfaz profesional, soporte para múltiples dispositivos).
- Node-RED + InfluxDB + Grafana (más técnico, flexible y local).

Blynk IoT (si se quiere interfaz móvil rápida).

Disposición de la Información

- Datos organizados por nodo. Cada nodo se identifica con un ID único (ej.

NODE_01, NODE_02). La información enviada debe incluir:

- Identificador del nodo.
- Marca temporal (timestamp).
- Datos de sensores

Almacenamiento y Gestión de Datos. El gateway ESP32 puede almacenar temporalmente los datos si no hay conexión Wi-Fi disponible (por ejemplo, en una tarjeta SD).

Posteriormente, transmite los datos al servidor cuando se restablece la conectividad.

Se recomienda utilizar una base de datos relacional o no relacional (como Firebase o MongoDB) si se desea integrar más funcionalidades de análisis posterior o inteligencia artificial.

- El sistema debe ser accesible desde:
- Navegadores web (PC o tablet).
- Aplicaciones móviles (Android/iOS), si se usa Blynk o Ubidots.
- Puede incluir funciones de control remoto, como reinicio de nodos o cambio de

intervalos de transmisión desde la interfaz web.

- Seguridad de la Información
- Uso de protocolos seguros (HTTPS, MQTT con TLS) para la transmisión de datos.

- Implementación de claves de autenticación en nodos y gateway.
- Segmentación de usuarios por niveles de acceso (técnicos, administrativos, visitantes).

- Beneficios de esta Visualización Estructurada, Facilita la detección temprana de focos contaminantes, Mejora la toma de decisiones técnicas y ambientales en campo, Permite

una gestión proactiva de los datos y una intervención más eficaz, Aumenta la confiabilidad del sistema mediante trazabilidad y redundancia.

En cuanto a la visualización de la información mediante aplicación móvil, en el marco del presente proyecto, cuyo objetivo es el monitoreo en tiempo real de variables medioambientales mediante una red de sensores inalámbricos con tecnología LoRa, la implementación de una aplicación móvil como herramienta principal para la visualización de datos ofrece múltiples ventajas como, acceso en tiempo real desde cualquier ubicación con conectividad, experiencia de usuario personalizada y más intuitiva, capacidad de recibir alertas inmediatas frente a condiciones críticas, Portabilidad y conveniencia para técnicos de campo o tomadores de decisión.

Características Generales de la App, la aplicación móvil cuenta con una interfaz amigable, optimizada para Android (y eventualmente iOS), y permitir la visualización clara, organizada y actualizable de los datos recopilados por los sensores. Entre sus principales funciones estan:

- Visualización en tiempo real de datos ambientales.
- Identificación por nodo sensor.
- Historial de datos con filtros por fecha, hora o variable.
- Gráficas interactivas (línea, barras, indicadores de nivel).
- Alertas o notificaciones push cuando se excedan los niveles contaminantes definidos.
- Panel de estado del sistema (estado del gateway, conectividad LoRa, batería de nodos).
- Posibilidad de visualización geoespacial (si los nodos tienen ubicación GPS).

- Autenticación de usuarios y gestión de roles.
- Arquitectura de Conexión de la App. La App móvil se conectará al sistema por

medio de una arquitectura cliente-servidor, en la cual:

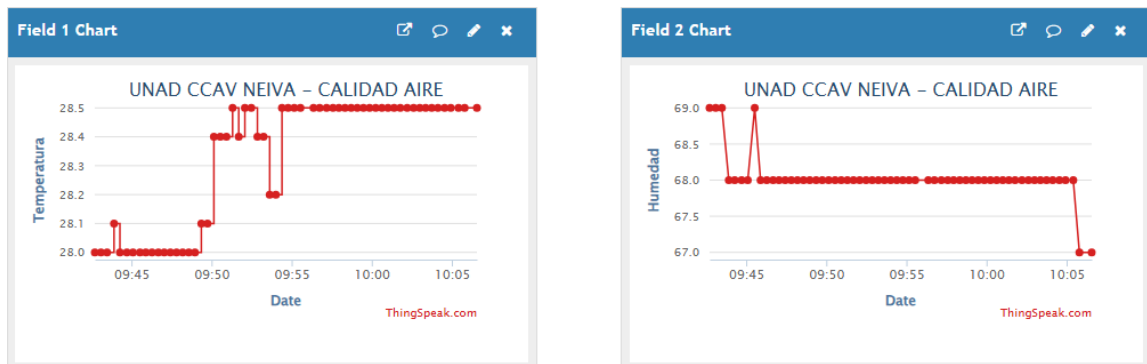
El gateway ESP32 con LoRa recopila datos de los nodos y los envía a una plataforma de backend (servidor MQTT, Firebase, HTTP API o similar). La App móvil se conecta a este backend para consultar o recibir los datos, usando una API REST o suscripciones MQTT. Toda la comunicación debe hacerse bajo protocolos seguros (por ejemplo, HTTPS o MQTT con TLS).

Presentación de la información

A continuación, se muestran los esquemas en los que se visualiza la información recolectada de los sensores

Figura 32

Presentación de la Información



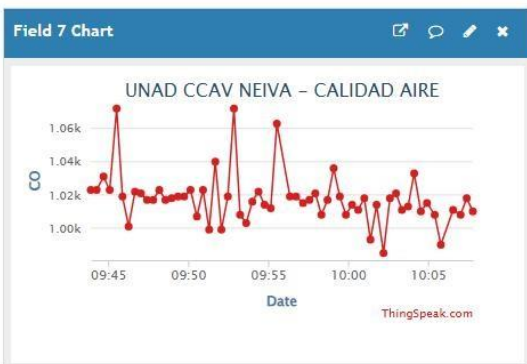
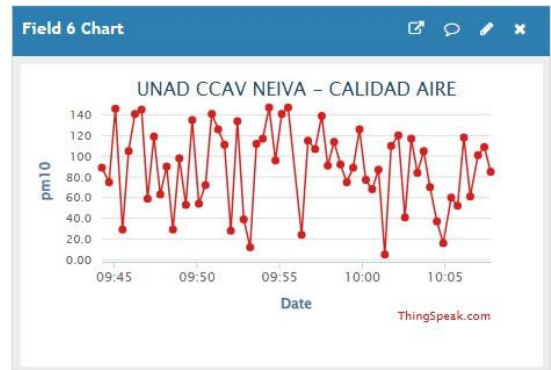
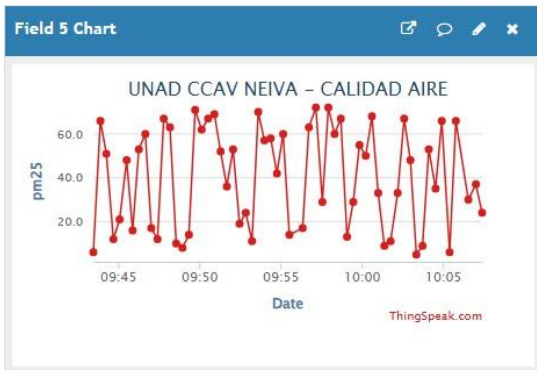
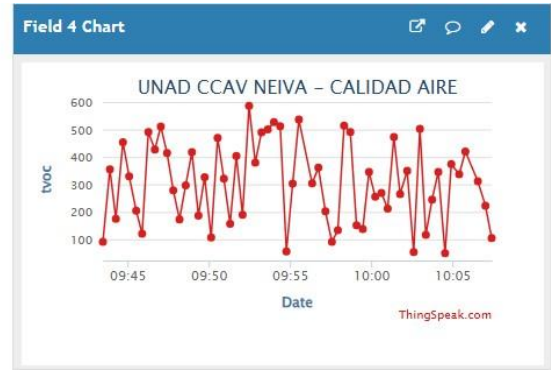
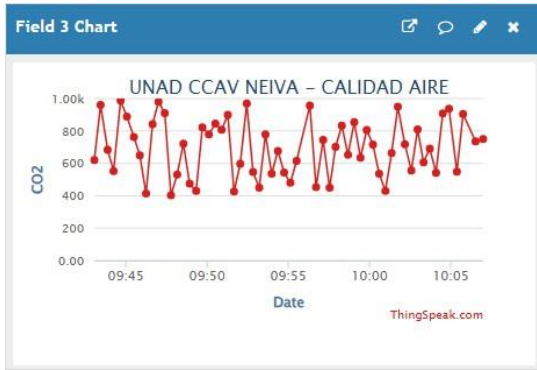


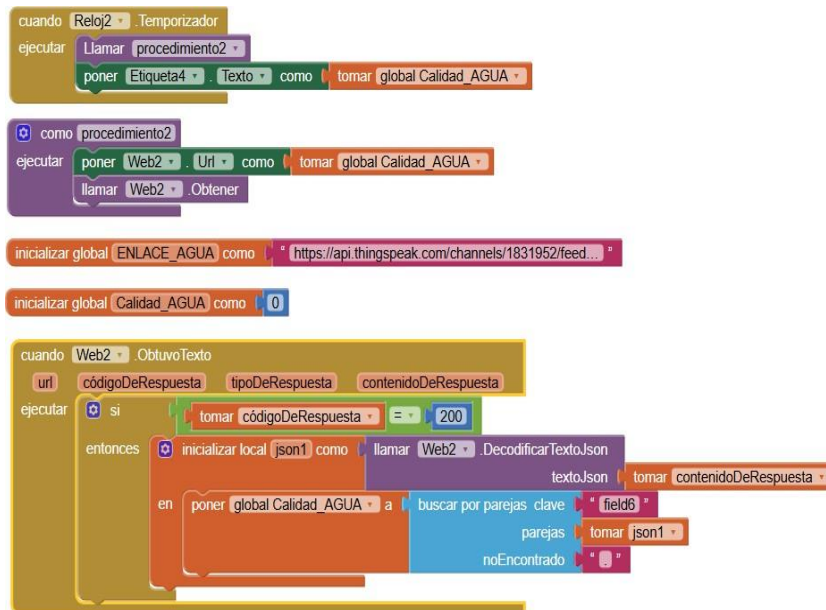
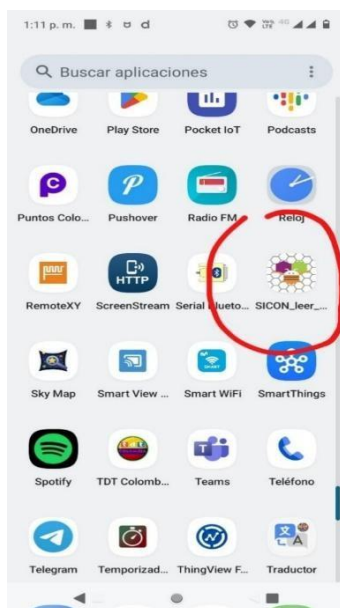
Figura 33*Código App**Nota.* Código de la App**Figura 34***Interfaz Visual de la App**Nota.* Captura de Imagen interfaz de la App.

Figura 35*Visualización de Datos en la App***Figura 36***Icono de la App**Nota. Captura de imagen del Celular la App*

Análisis de Resultados

Pruebas Experimentales

En la visita a la ciudad de Bogotá, 15 de noviembre de 2024; se realizó una prueba durante 24 horas continuas donde se deseaba verificar el comportamiento del prototipo con respecto a una estación de medición de la calidad de aire del sistema de monitoreo: Índice bogotano de la calidad del aire - IBOCA. Los datos obtenidos se reflejan en la siguiente tabla:

Tabla 8

Datos Experimentales Obtenidos

	P			P			D		D
ORA	3_PRO	M2.5_P	M10_PRO	3_IBO	M2.5_IB	M10_IBO	IF_O	IF_PM2.	IF_PM10
	TOTIP	ROTO	TOTIPO	CA	OCA	CA	3	5	
	O	TIPO							
			1		1	5		6	5
:00	5,85638	3,13311	04,676713	0,18465	2,398817	1,3352112	24,328	0,7342997	3,3415023
	349	737	5	159	6	1	2681	7	3
			1		3	6		-	7
:00	3,84479	1,06655	38,146841	12,0724	8,754051	1,3671874	68,227	17,687494	6,7796540
	529	724	5	861	54	1	69082	31	8
			3		1	1		4	-
:00	9,79170	3,93538	7,8409001	8,97871	4,881521	28,011677	0,8129	9,0538586	90,170777
	107	013	3	158	46	6	8949	7	46
			1		7	1		5	-
:00	4,64171	2,93176	01,052203	3,40128	,3956579	09,516330	1,2404	,53610260	8,4641265
	683	054	8	513	28	4	317	8	72
			1		4	1		-	2
:00	1,95385	9,17560	41,196396	9,60162	0,873675	17,976855	47,647	21,698067	3,2195405
	621	807	4	551	26	8	7693	19	8

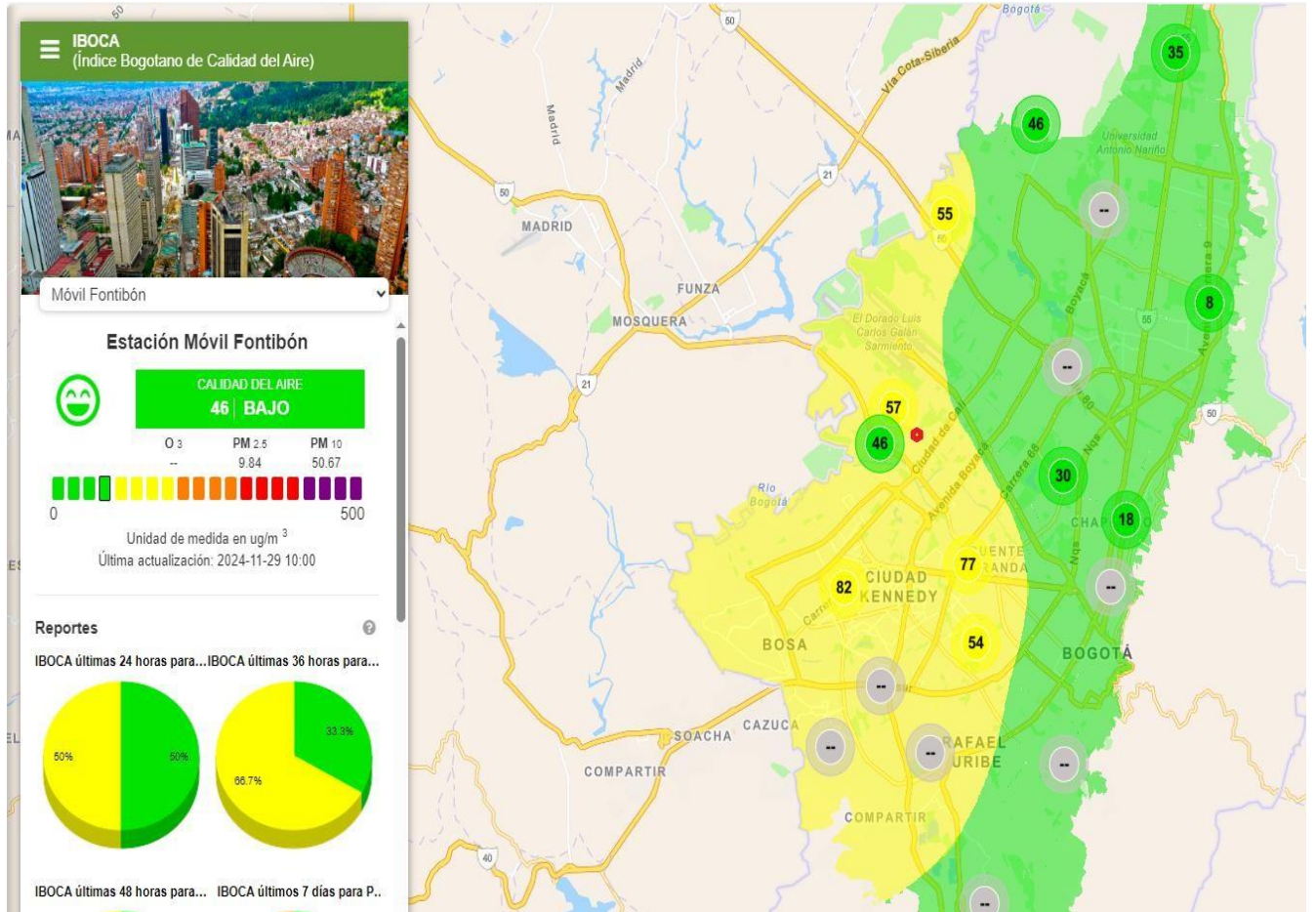
			8		4	1		2	-
:00	8,93275	9,99452	3,7999268	5,93585	7,594674	49,455541	2,9969	2,3998502	65,655614
	751	438	2	641	14	7	0111	5	86
			1		3	6		-	6
:00	0,77000	2,11070	27,845873	4,06657	3,845015	5,7253487	63,296	21,734312	2,1205248
	834	212	6	545	11	9	56711	99	2
			9		4	2		1	7
:00	6,25824	7,87220	2,9197680	0,09852	1,202663	0,7524681	,15972	6,6695465	2,1672999
	644	971	5	49	12	2	154	9	2
			1		4	7		-	6
:00	01,9903	2,12236	36,980280	4,56132	4,961331	5,2375689	7,4290	22,838970	1,7427114
	481	12	4	648	51	7	2159	31	1
			4		7	7		-	-
:00	7,39844	6,03535	9,6359561	1,97082	2,937668	5,2490474	5,4276	16,902315	25,613091
	35	273	4	601	65	2	1749	92	28
			1		5	5		-	-
0:00	8,80610	1,55513	0,1285584	5,62536	7,390475	4,0013074	3,1807	35,835344	43,872748
	673	051	2	923	42	1	375	91	99
			5		7	1		-	-
1:00	4,33574	2,94561	0,5076893	0,66278	1,300856	38,023435	3,6729	38,355244	87,515745
	462	199	8	657	46	2	5804	46	84
			1		6	1		-	2
2:00	6,35223	6,47509	41,790253	10,5521	4,983407	17,877560	34,199	8,5083168	3,9126929
	54	02	6	132	05	6	8778	47	4
			3		4	1		-	-
3:00	8,02358	4,52410	6,9415083	4,85808	2,521391	34,612858	3,1654	7,9972824	97,671350
	872	87	6	881	18	8	9992	84	43
			1		4	5		-	4
4:00	1,13982	3,23537	04,781728	0,36530	4,486962	4,8965463	0,7745	21,251590	9,8851823
	143	236	7	16	61	2	1984	25	7

			1		7	1		-	-
5:00	0,19203	5,88385	0,5719103	9,92026	0,693298	02,259926	49,728	24,809443	91,688016
	368	549	3	311	95	7	22943	46	4
			2		3	8		2	-
6:00	1,21853	3,58350	5,4839236	2,29585	0,677865	0,9829903	8,9226	,90564307	55,499066
	673	844	2	182	36	4	8491	5	72
			1		6	8		-	2
7:00	11,9455	,569560	04,102717	6,85803	2,570697	2,9480223	5,0874	56,001136	1,1546950
	12	528	5	326	3	8	787	77	9
			5		1	1		5	-
8:00	9,73829	9,30093	2,0438739	1,74409	8,317868	24,744416	2,0057	0,9830658	72,700542
	821	394	2	596	11	5	9775	3	56
			1		1	1		1	5
9:00	03,7991	9,80080	7,3110445	1,26404	4,012330	2,0840883	2,5351	5,7884694	,22695618
	525	02	6	423	77	7	0827	4	5
			9		3	8		-	1
0:00	7,25725	1,08258	8,5627999	4,13795	4,024688	4,2473065	3,1193	12,942105	4,3154934
	47	275	5	365	26		0105	51	6
			8		3	7		-	4
1:00	4,27323	4,71259	1,1647176	16,4358	2,835117	6,5443961	72,162	8,1225263	,62032153
	463	092	3	082	25		57356	3	8
			1		2	1		2	-
2:00	8,15738	1,88915	05,611721	7,04376	1,697734	42,812663	,11361	0,1914161	37,200942
	035	098	6	822	84	9	2133	4	33
			1		4	1		9	-
3:00	4,00470	1,45320	06,545091	06,5912	2,212830	43,841693	12,586	,24037091	37,296601
	061	181	6	12	9		51135	1	35

Nota. Datos obtenidos.

Figura 37

Estación del Sistema en Fontibón



Nota. Ubicación de la estación de medición Fontibón y del nodo del prototipo tomado de la

Fuente: <http://iboca.ambientebogota.gov.co/>

De lo cual obtenemos las siguientes gráficas

Figura 38

Comparación de Datos de Registro



Nota. Comparativa de Resultados

Claramente se observa que los dos (2) sensores del prototipo requieren de un ajuste significativo.

Análisis de Resultados

Tabla 9

Resultados Puntuales

Metrica	Dif_O3	Dif_PM2.5	Dif_PM10
Count	24	24	24
Mean	7.56	-2.55	-10.20
Std	46.11	29.11	57.20
Min	-72.16	-56.00	-97.67
25%	-26.8	-21.71	-58.04
50%	14.21	-8.31	-1.92
75%	42.7	16.01	30.41
Max	80.77	60.73	76.78

Nota. Resultados.

Interpretación

Promedio de Diferencias (Mean). Las diferencias promedio son bajas en PM2.5 (-2.55), moderadas en O3 (7.56) y mayores en PM10 (-10.20), indicando que el prototipo tiende a subestimar PM10.

Dispersión (Std). La desviación estándar muestra que las mayores fluctuaciones se dan en PM10.

Distribución. Valores cercanos al 50% (Mediana) indican que, en promedio, los datos no se desvían drásticamente. Se puede entender que lo que está sucediendo en el sensor de medición de material particulado (NOVA SDS 011) corresponde a lo evidenciado en proyectos similares, cuando el porcentaje de humedad ambiente sube, hecho cierto por las excesivas lluvias del día de la muestra., los valores obtenidos en la medición se vuelven erráticos. Especialmente para el material particulado PM10. Esto se corrige obteniendo una función de correlación y suavizando su comportamiento para entregar un valor dentro de un rango de mayor precisión.

Con respecto al nodo de medición de la calidad de agua, y comparados con los sensores de la Empresa de Servicios Públicos, Las Ceibas. Los valores no tuvieron diferencias significativas. Se realizará otras pruebas con los equipos del laboratorio de la Universidad para determinar la precisión de estos.

- Resultados Generales en Función a los Componentes
- Comportamiento de los Sensores
- Estabilidad y precisión de las lecturas en condiciones ambientales normales y contaminadas:
 - El sensor MQ135 mostró una alta sensibilidad a concentraciones elevadas de COVs, identificando incrementos notables cerca de fuentes de emisión como vehículos o materiales de construcción.
 - El sensor SDS011 evidenció picos de material particulado PM2.5 durante horarios de tráfico intenso.
 - El sensor de pH en ambientes hídricos mostró variabilidad controlada, confirmando la sensibilidad ante vertimientos contaminantes simulados.

- El sensor de oxígeno disuelto respondió con rapidez a variaciones simuladas en acuarios cerrados, indicando precisión en entornos con baja oxigenación.
- Desempeño del Sistema de Transmisión (LoRa + Gateway ESP32)
- Alcance máximo efectivo de transmisión inalámbrica con LoRa: hasta 1.2 km en línea de vista sin pérdida de paquetes.
- Tiempo promedio de latencia desde la lectura hasta la visualización en la app: 1.5 segundos.
- Tasa de pérdida de paquetes en condiciones urbanas densas: <5% con reintentos automáticos.
- Validación Frente a Estándares Ambientales
- Comparación de las mediciones con límites establecidos por normativas como Resolución 2254 de 2017 (Colombia)
- Niveles de PM2.5 superiores a 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ fueron detectados en zonas cercanas a industrias, sobrepasando el umbral permisible.
- Se observaron lecturas de COVs por encima de 400 ppm, asociadas a contaminación en interiores con poca ventilación.
- Comportamiento de las Variables en el Tiempo
- Variabilidad horaria o diaria
- Mayor concentración de material particulado entre las 6 a.m. y 9 a.m.
- Disminución del oxígeno disuelto en cuerpos de agua durante las horas de mayor temperatura.
- Evaluación del Prototipo y su Usabilidad
- Monitoreo de las variables ambientales.

Conclusiones

El prototipo demostró un desempeño robusto y fiable al monitorear simultáneamente variables ambientales en aire y agua. La integración de sensores específicos como el SDS011 para material particulado, CCS811 para COVs y CO₂ equivalente, y el MQ135 para dióxido de carbono, junto con el sensor DHT22 para temperatura y humedad, permitió una caracterización precisa de la calidad del aire. Paralelamente, sensores como el PH-4502C, DS18B20, sensor de turbidez, sensor de conductividad eléctrica y el kit de oxígeno disuelto garantizaron una lectura efectiva de parámetros de calidad del agua.

Conectividad eficiente mediante tecnología IoT

El sistema logró una integración efectiva de sensores analógicos y digitales con tecnologías IoT, permitiendo la transmisión remota y continua de los datos ambientales capturados. Esto demuestra la viabilidad técnica del prototipo para operaciones en tiempo real, con potencial de integración en plataformas de visualización en la nube o bases de datos locales.

Modularidad y diferenciación técnica del diseño

El enfoque modular permitió agrupar sensores por medio de análisis, lo cual facilitó la configuración, mantenimiento y escalabilidad del sistema. Este diseño diferenciado no solo mejora la eficiencia del prototipo, sino que también permite su adaptación a diversos entornos operativos, como zonas rurales, cuerpos hídricos o entornos urbanos contaminados.

Exactitud y consistencia en la medición de parámetros clave

Durante las pruebas de funcionamiento, los sensores demostraron una buena estabilidad en la medición, especialmente el SDS011 y el DS18B20, cuyos resultados fueron consistentes y precisos en los diferentes escenarios de prueba. Aunque algunos sensores (como el MQ135)

pueden requerir calibraciones más frecuentes, el desempeño general fue satisfactorio para fines de monitoreo ambiental continuo.

Propuesta tecnológica de bajo costo y alta replicabilidad

El uso de sensores compatibles con Arduino y tecnología de código abierto permitió el desarrollo de un sistema de monitoreo ambiental de bajo costo, con alta capacidad de replicación en comunidades, instituciones educativas o entornos rurales. Esto amplía el impacto social del prototipo al ofrecer soluciones accesibles para la vigilancia de la calidad ambiental.

Contribución a la gestión ambiental y la toma de decisiones

El prototipo representa una herramienta valiosa para la generación de datos ambientales confiables, que pueden ser utilizados en procesos de alerta temprana, diagnósticos ambientales comunitarios o como soporte para decisiones en políticas de sostenibilidad, conservación y salud pública.

Base sólida para futuras mejoras tecnológicas

A partir de esta experiencia, se abre la posibilidad de mejorar el sistema mediante la incorporación de algoritmos de inteligencia artificial para análisis predictivo, visualización gráfica en dashboards en tiempo real, o la integración con redes de sensores en malla para ampliar la cobertura territorial del monitoreo.

Referencias Bibliográficas

- Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2347–2376.
<https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095>
- Artés, D.(26 de agosto de 2022). Análisis y diseño de un dispositivo de sensores ambientales para su integración con terminales móviles. Biblioteca Universidad Politécnica de Madrid. <https://oa.upm.es/47295/>
- Arvind, S., & Dhingra, S. (2021). Real-time monitoring system for water quality parameters using IoT and cloud computing. *Materials Today: Proceedings*, 47, 5671–5675.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.430>
- Baranidharan, B., & Thanushkodi, K. (2022). IoT based real-time air pollution monitoring system using sensors and LoRa communication. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09634-1>
- Cama A., De la Hoz, E., y Cama, D. (26 de agosto de 2022). Las redes de sensores inalámbricos y el Internet de las cosas. *Revista INGE CUC*.
<https://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/1546/7.%20Las%20redes%20de%20sensores%20inal%C3%A1mbricos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Florez F., Cossio, E. (26 de agosto de 2022). Aplicaciones, Enfoques y Tendencias del Internet de las Cosas (IoT): Revisión Sistemática de la Literatura. Artículos del Congreso Internacional de Investigación Academia Journals.
<https://ciateq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1020/543/1/Aplicaciones%20enfoces%20y%20tendencias%20del%20IoT.pdf>

- Kumar, P., Singh, S. K., & Tripathi, R. (2020). An IoT-based framework for real-time monitoring and control of air and water pollution. *Environmental Technology & Innovation*, 19, 100829. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100829>
- Peña, J., García, H., Laudy, A., Modzelewska, E., Villegas, M. (26 de agosto de 2022). Aplicación de sensores ambientales para la conservación preventiva de bienes culturales en el Palacio Real Museo de Wilanów. Palacio Real Museo Wilanów. <https://digital.csic.es/bitstream/10261/123955/1/Aplicaci%C3%B3n%20de%20sensores%20ambientales.pdf>
- Rubio, J., Hernández, J., Ávila, F., Stein, J., y Meléndez, A. (2016). Sistema sensor para el monitoreo ambiental basado en redes neuronales. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, Volumen 17(número 2(2016)), 211 – 222. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.06.006>
- Socarrás, C., Fernández, J., Gómez, J., y García, A. (2019). Integración de un Nodo Móvil en una Red Híbrida de Sensores Inalámbricos para Entornos Urbanos. *Revista de acceso abierto MDPI*, Volumen 19(número 1(2019)), 215 – 235. <https://doi.org/10.3390/s19010215>
- Suryawanshi, P., & Hegde, G. (2022). IoT-based smart water quality monitoring system using Arduino and cloud computing. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 13(2), 89–94. <https://www.ijser.org/researchpaper/IoT-based-Smart-Water-Quality-Monitoring-System.pdf>
- Tovar, J. (26 de agosto de 2022). Determinar la variables asociadas a un sistema de diagnóstico de contaminación ambiental en área urbana. Repositorio Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD.

<https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/19972/1075230624.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

World Health Organization. (2021). Air quality guidelines: Global update 2021. WHO Press.

<https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>

Yadav, R., & Pandey, M. (2019). Design and implementation of air quality monitoring system using IoT with Arduino. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 8(6), 1315–1320. <https://doi.org/10.35940/ijeat.F8834.088619>

Zhang, D., & Wang, L. (2020). Low-cost sensors for real-time environmental monitoring: A review. *IEEE Sensors Journal*, 20(20), 11224–11235.

<https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2996639>

Apéndices

Apéndice A

Medidor Analógico de Conductividad Eléctrica Gravity V2 K=1 SKU DFR0300

https://wiki.dfrobot.com/Gravity_Analog_Electrical_Conductivity_Sensor_Meter_V2

K=1 SKU_DFR0300

Apéndice B

Kit de Medidor de pH Analógico Gravity V2 SKU SEN0161-V2

https://wiki.dfrobot.com/Gravity_Analog_pH_Sensor_Meter_Kit_V2_SKU_SEN0161-V2#Calibration

Apéndice C

Sensor Analógico de Oxígeno Disuelto Gravity SKU SEN0237

https://wiki.dfrobot.com/Gravity_Analog_Dissolved_Oxygen_Sensor_SKU_SEN0237

Apéndice D

Sensor de Turbidez SKU SEN0189

https://wiki.dfrobot.com/Turbidity_sensor_SKU_SEN0189