

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
SEDE ESMERALDAS



CARRERA:

INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN

PREVIO AL GRADO ACADÉMICO DE INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN

TEMA DE INVESTIGACIÓN:

SISTEMA DE MONITOREO CONTINUO DE FACTORES
AMBIENTALES CAUSANTES DE ALERGIAS RESPIRATORIAS
MEDIANTE REDES DE ÁREA AMPLIA DE BAJA POTENCIA
(LPWAN)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

REDES Y COMUNICACIONES

AUTOR:

TONY RICARDO PLAZA VIVAR

ASESOR:

PHD. PABLO PICO VALENCIA

ESMERALDAS, 2023

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Trabajo de tesis aprobado luego de haber dado cumplimiento a los requisitos exigidos por el Reglamento de Grado de la PUCESE previa la obtención del título de INGENIERO EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN.

.....
PhD. Pablo Pico Valencia

Tutor de Tesis

.....
Mgt. Manuel Nevárez Toledo

Lector 1

.....
Mgt. Homero Velastegui Izurieta

Lector 2

.....
Mgt. Xavier Quiñonez Ku

Coordinador del Área Industria, Tecnología y Comunicación

AUTORÍA

Yo, TONY RICARDO PLAZA VIVAR portador de la cédula de identidad No. 0803751437 declaro que los resultados obtenidos en la investigación que presento como informe final, previo a la obtención del título de “Ingeniero en Tecnologías de la Información” son absolutamente originales, auténticos y personales.

En tal virtud, declaro que el contenido, las conclusiones y los efectos legales y académicos que se desprenden del trabajo propuesto de investigación y luego de la redacción de este documento son y serán de mi sola, exclusiva responsabilidad legal y académica.

.....

Tony Ricardo Plaza Vivar

C.I. 0803751437

CERTIFICACIÓN

PhD. Pablo Pico Valencia, docente investigador de la PUCE-Sede Esmeraldas, certifica que: El trabajo de integración curricular realizado por TONY RICARDO PLAZA VIVAR, bajo el título “SISTEMA DE MONITOREO CONTINUO DE FACTORES AMBIENTALES CAUSANTES DE ALERGIAS RESPIRATORIAS MEDIANTE REDES DE ÁREA AMPLIA DE BAJA POTENCIA (LPWAN)”, reúne los requisitos de calidad, originalidad y presentación exigibles a una investigación científica y que han sido incorporadas al documento final las sugerencias realizadas, en consecuencia, está en condiciones de ser sometido a la valoración del Tribunal encargado de juzgarla.

Y para que conste a los efectos oportunos, firma la presente en Esmeraldas, febrero de 2023.

PhD. Pablo Pico Valencia
Asesor

DEDICATORIA

La presente investigación se la dedico con mucho amor a mis padres que siempre me apoyaron en el transcurso de este logro y me ayudaron a enfrentar las dificultades presentadas en el camino.

También le dedico esta investigación a mis hermanos que me brindaron apoyo incondicional desde la distancia con palabras de motivación y amparo durante este proceso.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero darle gracias a Dios por permitirme disfrutar de este logro al lado de mis padres y brindarme la salud y sabiduría, permitiéndome ejercer esta carrera que tanto me apasiona.

A mis padres Milagros Vivar López y Tony Plaza Racines por sus enseñanzas y valores, que me permitieron ser la persona que soy hoy en día. Gracias por apoyarme siempre, este logro no solo es mío también es de ustedes.

A mis hermanos Rubén Motato, Manny Motato, Antonella Plaza y Lissett Plaza, ustedes me apoyaron siempre desde la distancia y han sido un pilar muy importante en mi vida, este logro es para ustedes.

A mi tía Jackeline Plaza porque si no fuera por ella no hubiera tomado la decisión de volver a mi ciudad e inscribirme en esta universidad. También agradecerle porque ha estado pendiente de mí durante toda mi carrera universitaria, ha sido como una segunda madre en ésta, mi segunda casa Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Esmeraldas.

A mis profesores que me apoyaron con mi formación profesional, les quedo totalmente agradecido por la paciencia y la dedicación en su profesión. Gracias por los conocimientos impartidos durante mi carrera universitaria.

Mis más sinceras gratitudes, mil gracias a ustedes.

ÍNDICE DE CONTENIDO

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN	II
AUTORÍA	III
CERTIFICACIÓN	IV
DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTO	VI
Índice de Figuras.....	IX
RESUMEN	XI
ABSTRACT.....	XII
INTRODUCCIÓN	1
Descripción del problema	1
Justificación.....	2
Objetivos	3
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	4
1.1. Bases conceptuales.....	4
1.1.1. Alergias respiratorias y factores ambientales	4
1.1.2. Internet de las Cosas (IoT).....	5
1.1.3. Redes de Área Amplia y de Baja Potencia (LPWAN)	8
1.2. Antecedentes	11
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA	13
2.1. Delimitación espacio/temporal del estudio	13
2.2. Tipo de investigación	13
2.3. Métodos de investigación.....	14
2.4. Población y muestra	15
2.5. Técnicas de investigación	15
2.6. Operacionalización de variables	15
2.7. Técnicas de procesamiento de datos	17
2.8. Materiales empleados.....	17
CAPÍTULO III: RESULTADOS.....	19
3.1. Análisis de requerimientos	19
3.1.1. Requisitos funcionales.....	19
3.1.2. Requisitos no funcionales.....	20
3.1.3. Casos de uso	20

3.1.4. Funcionalidades de los nodos	22
3.2. Arquitectura del sistema.....	23
3.2.1. Capa de percepción.....	24
3.2.2. Capa de red	25
3.2.3. Capa de aplicación.....	26
3.3. Prototipo	28
3.3.1. Diagrama de circuitos y conexiones.....	28
3.3.2. Comunicación LoRa	31
3.3.3. Capa de aplicación.....	32
3.4. Evaluación y análisis de resultados	34
3.4.1. Escenarios	34
3.4.2. Calidad de datos	37
3.4.3. Calidad y velocidad de comunicación	38
CAPITULO IV: DISCUSIÓN	39
CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	41
5.1. Conclusiones	41
5.2. Recomendaciones.....	42
REFERENCIAS.....	43
ANEXOS	45

Índice de Figuras

Figura 1 Arquitectura de IoT [16].....	6
Figura 2 Principales sensores empleados en la agricultura [17].	7
Figura 3 Tecnologías de redes de comunicación usadas en aplicación agrícolas [17].	8
Figura 4 a) Topología estrella b) topología en malla [20].	9
Figura 5 Arquitectura de red LPWAN [21].	9
Figura 6 Delimitación espacial de la zona de monitoreo.	13
Figura 7 Caso de uso administrador TTN.....	21
Figura 8 Caso de uso administrador ThingSpeak.	21
Figura 9 Caso de uso usuarios ThingSpeak.	22
Figura 10 Diagrama de secuencia del sistema.	23
Figura 11 Arquitectura del sistema propuesto.	24
Figura 12 Diagrama de la base de datos.	27
Figura 13 Diagrama del circuito de nodo final.	28
Figura 14 Pines módulo de LoRa RFM95.	30
Figura 15 Nodo final en funcionamiento.....	31
Figura 16 Prototipado de baja fidelidad ThingSpeak del dashboard grupal.....	32
Figura 17 Prototipado de baja fidelidad ThingSpeak del dashboard individual.....	33
Figura 18 Prototipado de alta fidelidad ThingSpeak del dashboard grupal.....	33
Figura 19 Prototipado de alta fidelidad ThingSpeak del dashboard individual.....	34
Figura 20 Escenario plástico quemado dashboard.....	35
Figura 21 Habitación punta A.....	35
Figura 22 Escenarios con clima lluvioso TTN.	36
Figura 23 Oficina PUCESE punto B	36
Figura 24 Resultados TTN punto A.....	37
Figura 25 Resultados TTN punto B.....	38

Índice de tablas

Tabla 1 Carga de enfermedades respiratorias por país en América [12].	5
Tabla 2 estándares de largo y corto alcance [15].	6
Tabla 3 Cuadro de comparación sistemas LPWAN [22].	10
Tabla 4 Variables en indicadores sujetos a investigación.	16
Tabla 5 Información Arduino Mega [31].	17
Tabla 6 Información módulo de LoRa RFM95 adafuit [32].	17
Tabla 7 Información sensor DHT22.	18
Tabla 8 Información sensor de CO2 MG-811.	18
Tabla 9 Información sensor de material particulado gP2Y1026AU0F.	18

RESUMEN

La presente investigación describe un sistema de monitoreo continuo de la calidad del aire mediante una red LoRa. Este sistema mide parámetros de humedad, temperatura, CO₂ y material particulado en base a los sensores DHT22, MG-811 y GP2Y1026AU0F. Los datos capturados por los nodos finales son enviados mediante la red LoRa al *gateway* ubicado en la “Plaza Cívica Nelson Estupiñán Bass” proporcionado por el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Esmeraldas (GAD Esmeraldas). Dicho nodo se encarga de enviarlo por Internet a The Things Network (TTN) donde estos datos son procesados y descifrados. Para crear los nodos finales se utilizó como microcontrolador Arduino Mega 2560 y un módulo de LoRa RFM95. Estos encriptan la información como medida seguridad con un algoritmo de encriptación denominado AES (estándar de cifrado avanzado). En este proyecto se instalaron dos nodos finales en dos puntos de la ciudad de Esmeraldas, punto A (Juan Montalvo Esmeraldas centro, latitud: 0.969468 y longitud: -79.6547) y Punto B (PUCESE, latitud: 0.969965 y longitud: -79.6565). Después del procesamiento de los datos se procede a enviar la información a *ThingSpeak* donde se visualizan tablas de monitoreo de los datos enviados los cuales se almacenan en una base de datos MySQL. En esta investigación se experimentó en dos escenarios para observar cómo reacciona el sistema ante la quema de plástico y a clima lluvioso. Se concluyó que uno de los factores principales para que se obtenga una óptima comunicación es la altitud. El nodo final del punto B que se encontraba con mayor altura a 31,53 metros sobre el nivel del mar tuvo mejor calidad en la comunicación en relación con los otros nodos. Esto se da porque al estar a una mayor altura se evitó así varias interferencias físicas como casas, edificios y autos. Finalmente, LoRa aportó significativamente en el desarrollo del sistema de monitoreo y el alcance de dicho estándar de comunicación inalámbrico aporta en la implementación de sistemas de monitoreo que favorezcan al desarrollo de Esmeraldas como futura ciudad inteligente.

Palabras claves: LoRa, LPWAN, monitoreo, calidad del aire, The Things Network, ThingSpeak.

ABSTRACT

This research describes a continuous air quality monitoring system using a LoRa network. This system measures humidity, temperature, CO₂ and particulate matter parameters based on DHT22, MG-811 and GP2Y1026AU0F sensors. The data captured by the final nodes are sent through the LoRa network to the gateway located in the "Plaza Cívica Nelson Estupiñán Bass" provided by the Autonomous Decentralized Municipal Government of Cantón Esmeraldas (GAD Esmeraldas). This node is responsible for sending it over the Internet to The Things Network (TTN) where this data is processed and decrypted. To create the final nodes, an Arduino Mega 2560 microcontroller and a LoRa RFM95 module were used. These encrypt the information as a security measure with an encryption algorithm called AES (advanced encryption standard). In this project two final nodes were installed in two points of the city of Esmeraldas, point A (Juan Montalvo Esmeraldas center, latitude: 0.969468 and longitude: -79.6547) and Point B (PUCESE, latitude: 0.969965 and longitude: -79.6565). After processing the data, the information is sent to ThingSpeak where monitoring tables of the sent data are displayed and stored in a MySQL database. In this research, two scenarios were experimented to observe how the system reacts to plastic burning and rainy weather. It was concluded that one of the main factors for optimal communication is altitude. The final node at point B, which was at the highest altitude of 31.53 meters above sea level, had better communication quality than the other nodes. This is because being at a higher altitude avoided several physical interferences such as houses, buildings and cars. Finally, LoRa contributed significantly to the development of the monitoring system and the scope of this wireless communication standard contributes to the implementation of monitoring systems that favor the development of Esmeraldas as a future smart city.

Keywords: LoRa, LPWAN, monitoring, air quality, The Things Network, ThingSpeak

INTRODUCCIÓN

Descripción del problema

En la actualidad el Internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés) promete cambios significativos en sectores como la salud, transporte, arquitectura, agricultura y las ciudades inteligentes. Ayuda a que la sociedad desarrolle muchas tareas cotidianas de manera automática, confortable y precisa. El IoT es un tema relativamente nuevo. De allí que muchos investigadores y desarrolladores especializados en este campo trabajan arduamente para automatizar los procesos que son un problema en la sociedad actual.

En el área de la salud, con la llegada de dispositivos wearables y biosensores portátiles en miniatura y los avances en la investigación de las técnicas de Big Data para la manipulación eficaz de grandes conjuntos de datos multi escala, multimodales, distribuidos y heterogéneos ha dado lugar a la creación de nuevas oportunidades en los servicios sanitarios personalizados [1]. El IoT se ha aplicado en sistemas de monitorización para el control de la salud rentable e inalámbrico [2] instaurando sistemas de salud eficaces que reducen el tiempo de análisis de pacientes aplicando redes IoT que mejoran aspectos de accesibilidad y disponibilidad de los sistemas de monitoreo de la salud, muchos de los cuales ejecutan acciones en tiempo real.

Con el pasar de los años la contaminación ha tenido un impacto grande en la sociedad, siendo un tema muy sonado en medios de comunicación y redes sociales. Muchos estudios clínicos, epidemiológicos y experimentales han demostrado que existe una compleja interacción entre la contaminación ambiental y las reacciones inflamatorias alérgicas causadas por granos de polen [3], contaminantes industriales (CO₂, NO₂, SO₂) [4] y materiales particulados [5] que se propagan en el ambiente.

Las alergias son respuestas de hipersensibilidad que ocurren en algunas personas cuando se exponen a una sustancia extraña llamada alérgeno, la cual es generalmente inofensiva para la mayoría de la población. De las enfermedades alérgicas las más comunes son: el asma, la rinitis alérgica y la dermatitis atópica. Las enfermedades alérgicas afectan aproximadamente entre 15 y 30% de la población mundial y entre 15 y 23% la población infantil [6]. Además, se calcula que la prevalencia de la alergia al polen es de hasta un 40% [7].

La ciudad de Esmeraldas es un área con un índice alto de contaminación al encontrarse cerca de una petrolera llamada EP Petroecuador, siendo ésta la principal causante de la

contaminación del aire, flora y fauna en la ciudad de Esmeraldas y creando un riesgo para la salud de la sociedad que la habita. Sobre este trasfondo, estudios han demostrado que el asma infantil en la ciudad de Esmeraldas es de un 15,9% focalizándose el problema en las áreas cercanas a la Refinería Estatal de Esmeraldas [8].

Justificación

El presente proyecto busca crear un sistema de referencia con tecnología de redes de área amplia y de baja potencia (LPWAN) utilizando Arduino e integrando sensores de humedad, temperatura, CO₂ y polvo. Dicha tecnología permite el monitoreo continuo de la calidad del aire en exteriores e interiores. Este sistema no solo sirve para el monitoreo de la calidad del aire, sino que en proyectos futuros podría ayudar a crear un sistema con big data para llevar a cabo acciones de monitoreo en tiempo real de los contaminantes ambientales en la ciudad de Esmeraldas; siendo este uno de los pasos para una ciudad inteligente.

Este proyecto tiene muchos beneficios para la salud de los ciudadanos que residen en la provincia de Esmeraldas, principalmente los involucrados que tienen problemas respiratorios como: asma, alergia, bronquitis, entre otros, puesto que la contaminación de la ciudad genera muchas de estas patologías. Por otro lado, la humedad tiende a ser acumuladora de bacterias, virus y hongos en el ambiente por la acumulación de moho en esquinas de techos, paredes y ventanas.

La importancia de este proyecto busca conocer todos los factores inherentes que ocasionen los riesgos de la exposición al polvo, polen y humedad (principales elementos causantes de alergias) en la sociedad esmeraldeña. Desde esta perspectiva, se ha visto necesario mejorar las condiciones de salud ambiental y con ellos elevar el nivel de calidad de vida de las personas que habitan la ciudad. Para lograr lo antes expuesto, es imperativo implementar plataformas de monitoreo continuo orientados a conocer los factores de riesgos causados por la contaminación existentes en el ambiente y de esta manera aportar con tecnologías que favorezcan en la preservación de la salud de las personas de las personas alérgicas a condiciones del ambiente.

Objetivos

General

Desarrollar un sistema que monitoree la calidad del aire en interiores y exteriores por medio de una red LPWAN a fin de proveer datos que permita la toma de decisiones para prevenir problemas alérgicos respiratorios.

Específicos

- a) Analizar los factores climatológicos relacionados con las alergias respiratorias.
- b) Formular una arquitectura LPWAN de control de humedad, temperatura, CO2 y material particulado mediante el uso de tecnologías de IoT.
- c) Evaluar los elementos tecnológicos en términos de hardware y software para implementar un sistema de monitoreo continuo de factores ambientales causantes de alergias respiratorias basado en la arquitectura LPWAN.
- d) Evaluar la comunicación y la calidad de los datos proporcionados por los nodos del sistema de monitoreo.

Contribuciones científicas relacionadas

La investigación ha dado como fruto una publicación enviada a un congreso internacional.

Plaza-Vivar, Tony; Pico-Valencia, Pablo; Jiménez, Pedro; Holgado-Terriza, Juan A. (2023). *A Lora-Based Internet Of Things Platform For Monitoring Environmental Factors Causing Respiratory Allergy*. WoRIE'23. 12th Workshop on the Reliability of Intelligent Environments. (Enviado para revisión).

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. Bases conceptuales

En este apartado se describen las bases conceptuales relacionadas con la temática de estudio, estos son, factores ambientales causantes de alergias respiratorias y monitoreo continuo de la calidad del aire. Además, se hace un acercamiento a las tecnologías IoT y LPWAN para la creación de redes de monitoreo ambiental. A partir de las descripciones de estas bases teóricas se pretende que se entiendan los conceptos para la aplicación de un sistema de referencia que monitoree de la calidad del aire en interiores y exteriores por medio de una red IoT compatible con el estándar de comunicación inalámbrica LoRa; es decir tecnologías de redes LPWAN.

1.1.1. Alergias respiratorias y factores ambientales

Las alergias respiratorias se producen en respuesta a los aeroalérgenos (i.e., polen, polvo, CO₂, SO₂), y antígenos transportados por el aire que inducen la producción de anticuerpos IgE (inmunoglobulina E); mismo que es un anticuerpo producido por el sistema inmunitario en respuesta a algún factor o agente que el organismo percibe como una amenaza [9]. El sistema inmunológico los reconoce como extraños desencadenando así la respuesta inflamatoria en individuos sensibles a ellos [10].

Una información importante para tener en cuenta es cómo reacciona el cuerpo con el contacto del aire contaminado sobre las vías respiratorias y cómo se desarrolla la hipersensibilidad tipo 1. Cuando alguien tiene este tipo de hipersensibilidad, significa que han estado expuestos a un antígeno que se une a una proteína llamada IgE, que se encuentra en la superficie de ciertos tipos de células sanguíneas como mastocitos y basófilos. Esta unión provoca la liberación de sustancias químicas almacenadas en estas células, lo que se conoce como desgranulación. Como resultado de esto, se liberan sustancias químicas llamadas mediadores vasoactivos e inflamatorios (como histaminas, factores quimiotácticos, leucotrienos y factor activador de plaquetas), que causan una serie de efectos en el cuerpo, como la dilatación de los vasos sanguíneos, aumento de la permeabilidad capilar, aumento de la secreción de las glándulas, contracción del músculo liso y la acumulación de células inflamatorias, especialmente eosinófilos, en el tejido afectado, lo que provoca los síntomas de la reacción [11].

El material particulado (PM) representa un gran riesgo para la salud humana, debido a que puede penetrar en las zonas más sensibles del sistema respiratorio. Estas partículas pueden ser primarias, emitidas directamente por la combustión del petróleo o gas natural en la generación de energía eléctrica, calefacción doméstica o motores diésel, o secundarias, resultantes de reacciones químicas entre gases como SO₂, NO_x, NH₃ o compuestos orgánicos volátiles no metánicos (NHVOC). Las partículas primarias y secundarias del PM pueden penetrar profundamente en los pulmones y causar una serie de problemas respiratorios y cardiovasculares graves [11]. A continuación, se presenta en la tabla 1 un resumen de la tasa de mortalidad causada por enfermedades respiratorias en la región de las Américas desde los 2000 hasta el 2019. Esta tasa se mide por cada 100000 habitantes.

Tabla 1 Carga de enfermedades respiratorias por país en América [12].

Países	Defunciones	AVP (Años de vida perdidos)
Honduras	58.7	1085.7
Argentina	55.5	1023.8
Haití	50.0	1268.5
Bolivia	46.9	795.1
Nicaragua	43.8	681.1
Uruguay	42.4	837.0
Guyana	39.5	895.3
Estados Unidos	39.1	749.3
Brasil	37.0	707.0
Colombia	35.0	514.4
México	30.8	528.6
Canadá	22.4	387.3
Ecuador	20.0	300.7

1.1.2. Internet de las Cosas (IoT)

El Internet de las cosas (IoT) es un paradigma tecnológico que define la dotación de conectividad a Internet a cualquier objeto sobre el que se pueda medir parámetros físicos o cambiar el estado del contexto [13]. Otra definición explica que se puede usar Internet para conectar todo lo que se desee. Esto era impensable hace unas décadas. No obstante, en los últimos diez años los usuarios ya pueden conectar sus dispositivos del hogar a ecosistemas de Internet de las cosas. Sobre este trasfondo, gracias al IoT ya es posible recolectar datos y con ellos poder generar información y conocimiento aplicando analítica de datos e inteligencia artificial. Esto aporta significativamente en la toma de mejores decisiones basada en datos y cada vez menos en la intuición [14].

Un punto importante al crear un sistema IoT es elegir la tecnología que se va a usar dependiendo de las necesidades que el sistema requiera, ahora bien, una de las primeras

cosas a tomar en cuenta es si el sistema es de largo o corto alcance. Para poder facilitar esta elección existen unos estándares de tecnologías IoT más utilizados como se puede apreciar en la tabla 2.

Tabla 2 estándares de largo y corto alcance [15].

Tecnologías	Alcance	Frecuencia	Rango	Velocidad de comunicación	Encriptación
Wi-Fi	Corto	2.4GHz	100m	11Mb/s	WPA/PSK
ZigBee	Corto	2.4GHz	10~20m	20K~250Kb/s	AES-128
Bluetooth	Corto	2.4GHz	1~10m	10Mb/s	PIN code
LoRa	Largo	125KHz	15Km	< 50Kb/s	AES
SigFox	Largo	868/915MHz	13Km	< 100b/s	None

La arquitectura de IoT es un medio muy útil para distinguir las diferentes capas que tiene un sistema (i.e., sensores, protocolos, redes). Como se puede apreciar en la Figura 1, generalmente se trata de tres capas las cuales representan las partes de una arquitectura básica de IoT.

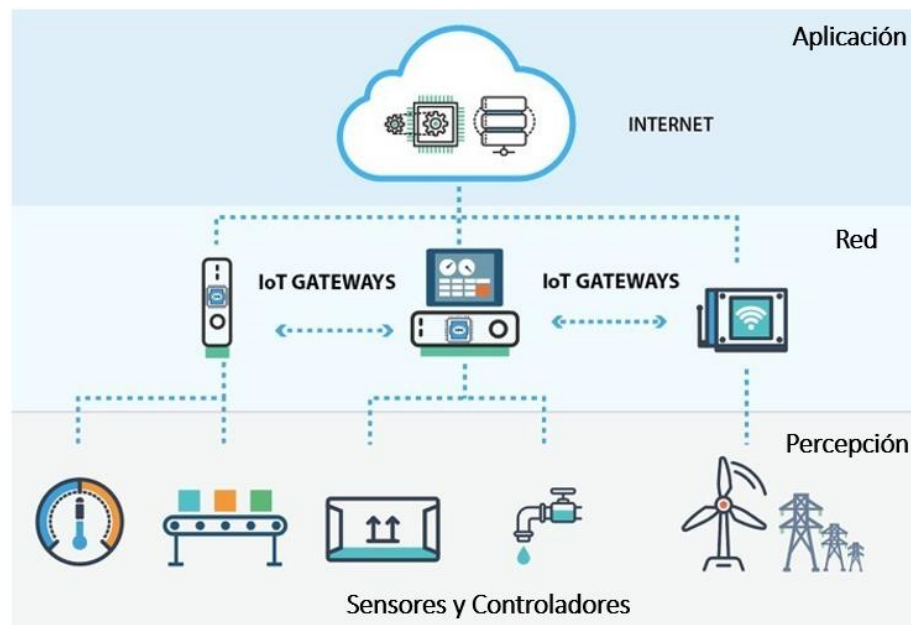


Figura 1 Arquitectura de IoT [16].

Capa de percepción

Esta capa realiza la integración de hardware y software relacionado con IoT como son sensores, actuadores, transceptores, tecnologías de radio frecuencias y diferentes elementos de monitoreo [17].

Los sensores son las herramientas más utilizadas en esta capa y como se tiene conocimiento hay una gran variedad de sensores que detectan y leen diferentes tipos de mediciones. Por eso en la Figura 2 se puede visualizar que los sensores de humedad y temperatura son uno de los sensores más utilizado en aplicaciones de IoT.

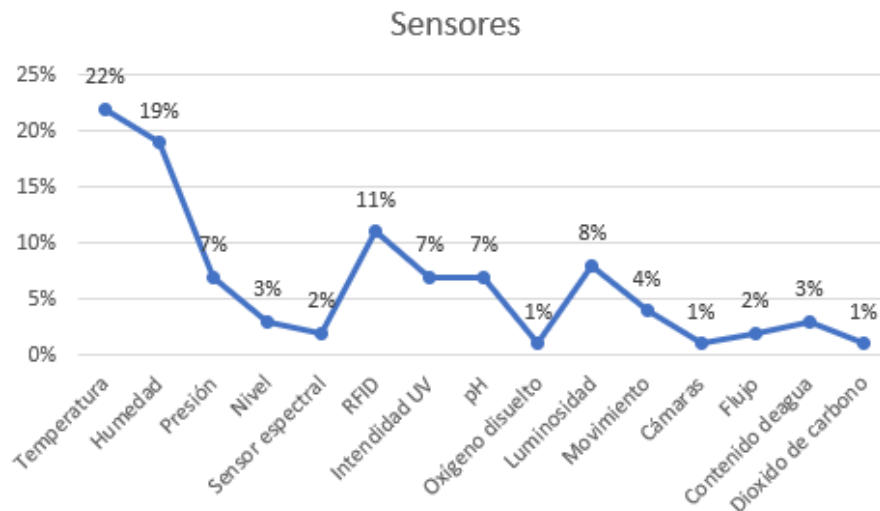


Figura 2 Principales sensores empleados en la agricultura [17].

Capa de red

La capa de red se encarga de transmitir los datos e información obtenidos de la capa de percepción a través de algún protocolo de comunicación, como lo puede ser Wi-Fi, LoRa, ZigBee, entre otros [18].

En esta capa se pueden observar las redes de datos que permiten la comunicación a través de la interacción y la convergencia tecnológica, y que involucran diferentes protocolos y medios de red que se han incorporado gradualmente a las tecnologías de IoT. Por lo tanto, el avance de estas tecnologías ha permitido mejoras en el monitoreo a través de redes inalámbricas y sensores[17]. En la Figura 3, se detallan las tecnologías de comunicación de redes más utilizadas para comunicar diferentes dispositivos bajo el enfoque máquina a máquina (M2M).

Un dato adicional es que cada fabricante tiene sus propios protocolos de comunicación, pero el estándar utilizado por la mayoría de las marcas es el protocolo Message Queue Telemetry Transport (MQTT). Su nombre indica la comunicación publish y subscribe entre máquinas mediante el concepto de las IoT. Este protocolo se enfoca en la comunicación entre sensores facilitando el trabajo y utilizando poco ancho de banda. De esta manera, el coste computacional entre máquinas es mucho más bajo, necesitando así

menos recursos (i.e., CPU, RAM) [19]. Por último, otro de los protocolos más utilizados es el protocolo HTTP el cual es el más usado para la transacción de datos que se hagan sobre la Internet y por tanto considerada pieza fundamental para el transporte de los servicios web en arquitecturas de IoT [19].

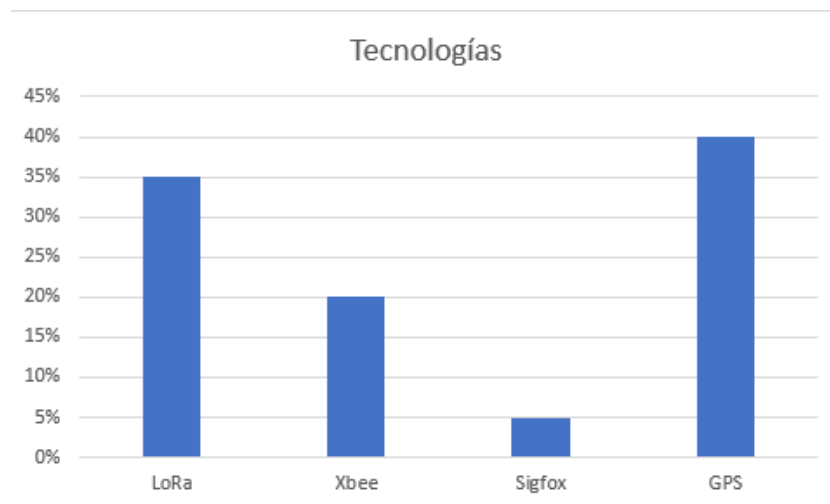


Figura 3 Tecnologías de redes de comunicación usadas en aplicación agrícolas [17].

Capa de aplicación

La última capa de una arquitectura básica de IoT es la capa de aplicación la cual sirve para acercar al usuario final con las aplicaciones de IoT provenientes de diferentes tipos de escenarios: ciudades inteligentes, hospitales inteligentes [18]. Esta capa también es referida como la implementación de los desarrollos IoT mediante sistemas inteligentes que implican algoritmos de Inteligencia Artificial para la toma de decisiones [17].

1.1.3. Redes de Área Amplia y de Baja Potencia (LPWAN)

Las redes LPWAN son una de las tecnologías que se han popularizado en los últimos años puesto que la cantidad de sensores, controladores y dispositivos se ha incrementado considerablemente. Esta tecnología nace por la existencia de las redes celulares inalámbricas como: 2G, 3G y 4G, las cuales están diseñadas en gran medida para la comunicación de voz, datos y video y no para la aplicación de sensores inalámbricos. LPWAN llena esta necesidad de comunicar aplicación de sensores con una buena métrica de rendimiento en un espacio de gran cobertura creando un gran potencial para la aplicación de IoT y comunicación M2M de una manera más económica [20].

La forma más sencilla de topología de red inalámbrica es una red punto a punto en donde los nodos se comunican directamente con un nodo central, esto suele utilizarse más para la aplicación de monitorización remota y para entornos peligrosos donde el tendido de cable está expuesto. Las topologías de conectividad más utilizada para las redes LPWAN se dividen en dos grandes grupos; estrella y malla; como se puede apreciar en la Figura 4. Estas dos topologías son las más destacadas; pero en general la más utilizada es la estrella o estrella sobre estrella ya que permiten un mayor ahorro de energía de la batería y aumenta el alcance de la comunicación [20].

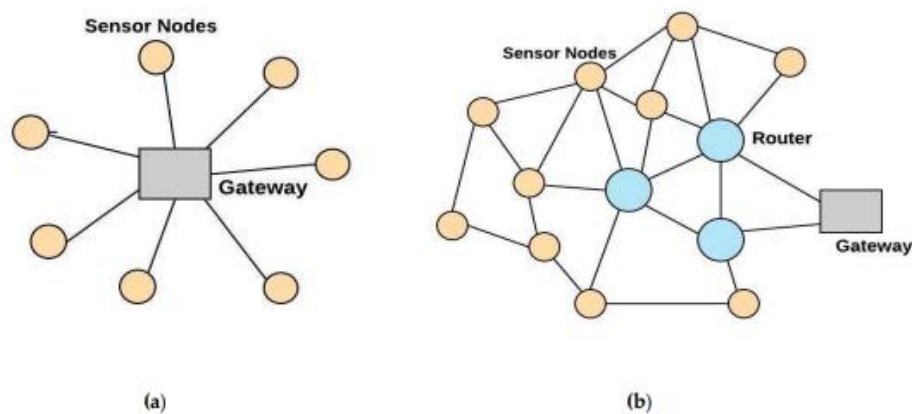


Figura 4 a) Topología estrella b) topología en malla [20].

Como se mencionó anteriormente la arquitectura típica que utiliza LPWAN es una red en estrella como se puede apreciar en la Figura 5. La función básica de este sistema es recoger datos y enviarlos por medio de un *gateway* a un servidor o nube. De tal manera que esta información puede ser manipulada o aplicada con algún propósito específico.

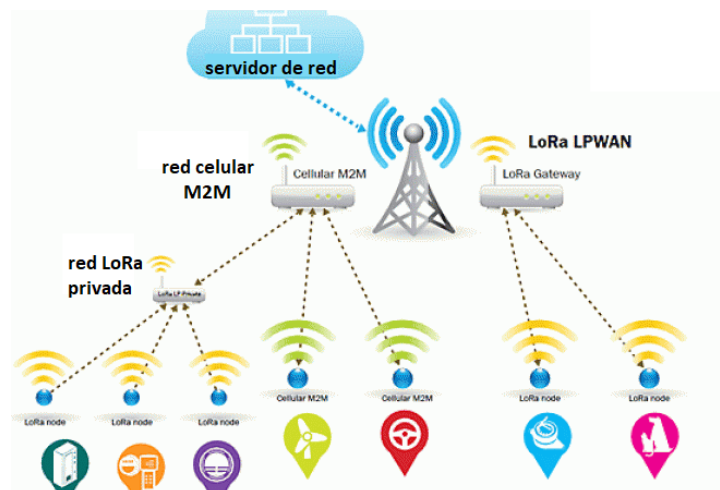


Figura 5 Arquitectura de red LPWAN [21].

Estándares

Existen diferentes estándares de comunicación que permiten implementar redes LPWAN, entre estos están: LoRa, SigFox, LTE-M1, EC-GSM. En la tabla 3 se resume los principales aspectos que diferencia a cada uno de ellos.

Tabla 3 Cuadro de comparación sistemas LPWAN [22].

Estándar	Poder de Transmisión	Tiempo de vida Batería	Velocidad comunicación	Latencia	Rango	Topología	Sensores
SigFox	14dBm	5 años	100b/s	10s	Rural: 50Km urbano: 10Km	Estrella	50mil
LoRa	15dBm	10 años	50Kb/s	10s	Rural: 15Km urbano: 5Km	Estrella	40mil
LTE-M1	20dBm	10 años	1Mb/s	150ms	Rural: 15Km	Estrella	20mil
EC-GSM	33dBm	10 años	10Kb/s	None	Rural: 15Km	Estrella	50mil

LoRa

Algunas LPWAN utilizan el protocolo de Largo Alcance (LoRa por sus siglas en inglés) y son denominadas LoRaWAN, de hecho, este protocolo es uno de los más famosos para las arquitecturas de red LPWAN.

La alianza LoRa desarrolló el protocolo LoRa de código abierto para establecer una red de área amplia y de bajo consumo en el mercado de IoT, con el fin de permitir la comunicación entre dispositivos M2M y operadores de redes inalámbricas que utilizan el espectro sin licencia. Este protocolo utiliza el procesador de señales digitales SX1301, fabricado por Semtech, y define la capa física del modelo OSI, incluyendo la modulación inalámbrica necesaria para establecer comunicaciones de larga distancia entre dispositivos IoT [23].

LoRaWAN es un protocolo y una arquitectura de red de área amplia para las comunicaciones IoT de largo alcance que hace uso de las modulaciones de radio LoRa y la modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK). La topología en estrella de una red LoRaWAN se basa en la comunicación de pasarela a nodo final, como el esquema GSM de estación móvil a estación base. Como sugiere esta topología, las pasarelas y los nodos finales de una red LoRaWAN no son capaces de comunicarse de igual a igual [24].

1.2. Antecedentes

Para la recopilación de los antecedentes se utilizaron las fuentes de información: Google Académico e IEEE Xplore y en ellos se aplicó la siguiente cadena de búsqueda: (“monitoring”) AND (“air”) AND (“quality”) AND (“respiratory”) AND (“allergy”) AND (“lora”). Se encontraron 5 artículos relacionados.

En Sérgio Ivan Lopes y otros [25] se planteó una propuesta que tuvo como objetivo especificar los procesos de diseño y desarrollo de un dispositivo IoT Edge basado en LoRa para el monitoreo de la calidad del aire en el aula, y mediante el uso de componentes comerciales de bajo costo. Se utilizó la tecnología LoRa y sensores DHT22m y SGP30 para la recolección de datos como son: humedad, temperatura y PM. Los resultados y conclusiones obtenidos en esta investigación fueron los siguientes: la media de 48 h obtenida para PM1.0 fue de unos 15µg/m³; para PM2.5 y PM10, los valores alcanzaron en ambos aproximadamente 20µg/m³, estando dentro de los límites reglamentarios.

De igual manera Gonzales Leni y Sánchez Hernán [26], presentan una investigación con el objetivo de construir un prototipo que se encargue del monitoreo de la calidad del aire (ICA) en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez Chiapas, mediante el análisis de temperatura y humedad. El problema se enfoca en atender a la necesidad de información respecto a la situación de la calidad de aire ya que debido a los grandes aumentos de la contaminación se ve notoriamente adulterado con sustancias nocivas que afectan al organismo humano.

El sistema utiliza herramientas computacionales, de diseño CAD, plataformas IoT, metal-mecánica, electrónicas, eléctricas y un dispositivo Arduino. Los datos son subidos a la plataforma ThingSpeak y la monitorización se lleva a cabo en tiempo real mediante una aplicación denominada Pocket IoT la cual se encuentra en la tienda de Google Play. Es importante considerar que se empleó un sensor DHT22 para medir la temperatura y humedad. Este sistema monitoreó en tiempo real un punto estratégico de la ciudad actualizando datos aproximadamente cada 18 segundos. Los resultados y conclusiones fueron que la ciudad tiene altos niveles de contaminación en el año en que se recopiló la información. La calidad de aire muestra valores altos durante el día y durante la noche y arroja valores muy por debajo de lo anterior ya que las actividades humanas durante estas horas son casi nulas.

Asimismo, Wen-Tsai Sung y Sung-Jung Hsiao [27] propone la construcción de un sistema de monitorización de la calidad del aire interior para explorar cómo las personas pueden vivir en un entorno con una buena calidad de aire. En esta investigación se combinó la placa Arduino Uno y los módulos de transmisión inalámbrica Wi-Fi ESP8266

y sensores de CO₂. De igual manera se utilizó la herramienta Microsoft Excel para el procesamiento de datos y el lenguaje C# para la programación del sistema. Se demostró que la calidad del aire exterior fue la que más afectó a la calidad del aire interior, es decir, la calidad del aire interior mejoró siempre que la puerta y la ventana se abrieran durante un corto periodo de tiempo bajo cualquier control; mientras que la concentración de CO₂ aumentaba si la puerta y la ventana se cerraban durante mucho tiempo.

Además, Sujuan Liu y otros [28] plantea como objetivo construir un sistema de monitoreo de la calidad del aire en tiempo real y de baja potencia basado en LoRa. Este sistema integra un microcontrolador de un solo chip, varios sensores de contaminación del aire (NO₂, SO₂, O₃, CO, PM₁, PM₁₀, PM_{2.5}), módem de largo alcance (LoRa), una parte de batería fotovoltaica solar y una interfaz gráfica de usuario (GUI) a partir de la cual se aplica el monitoreo. Los resultados de esta investigación fueron que este sistema tiene una gran ventaja en lo que conlleva a largas distancias y baja potencia en comparación con otras tecnologías inalámbricas. Los resultados experimentales de los cuatro sensores electroquímico utilizados en el proyecto muestran que el sistema puede controlar y medir la concentración de gas y de PM con precisión.

Por último, Liang-Yu Chen y otros [29] diseñaron un sistema de monitoreo de la calidad del aire basado en LoRa el cual estuvo conectado a un vehículo aéreo no tripulado (Dron). A este sistema se adapta un módulo RN24832 de Microchip que es un módulo LoRa de largo alcance de banda dual sub-GHz. Además, del sensor de PM_{2.5}, implementaron el sensor de Taiwaniot PMS5003T G5T3 que puede detectar PM_{1.0}, PM_{2.5}, temperatura y humedad. Se llegó a la conclusión de que el Dron con el sistema de monitoreo en tiempo real es sencillo de manipular puesto que necesita una mínima intervención humana. El sistema capta la información de los sensores y la envía de manera directa y automática.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

2.1. Delimitación espacio/temporal del estudio

Este proyecto tiene como objetivo monitorear los índices causantes de alergias respiratorias en Esmeraldas-Ecuador. Se abarcaron 2 puntos importantes que delimitaron el proyecto recolectando información durante la segunda semana del mes de febrero de 2023. Estos dos puntos tienen que conectarse con el *gateway* LoRa ubicado en la “Plaza Cívica Nelson Estupiñán Bass”, proporcionado por el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Esmeraldas (GAD Esmeraldas) al cual se conectó el nodo final creado mediante la placa Arduino Mega 2560 y el módulo RFM95 de LoRa.

Los dos puntos se encuentran en la calle Juan Montalvo a unos 0.62 Km del *gateway*, este sería el punto A; mientras que el segundo punto se encuentra en la Pontificia Universidad del Ecuador – Sede Esmeraldas (PUCESE), a unos 0.99 Km del *gateway*, éste sería el punto B. Para ilustrar las zonas y ubicaciones de los nodos se emplea un mapa de Google (Figura 6).

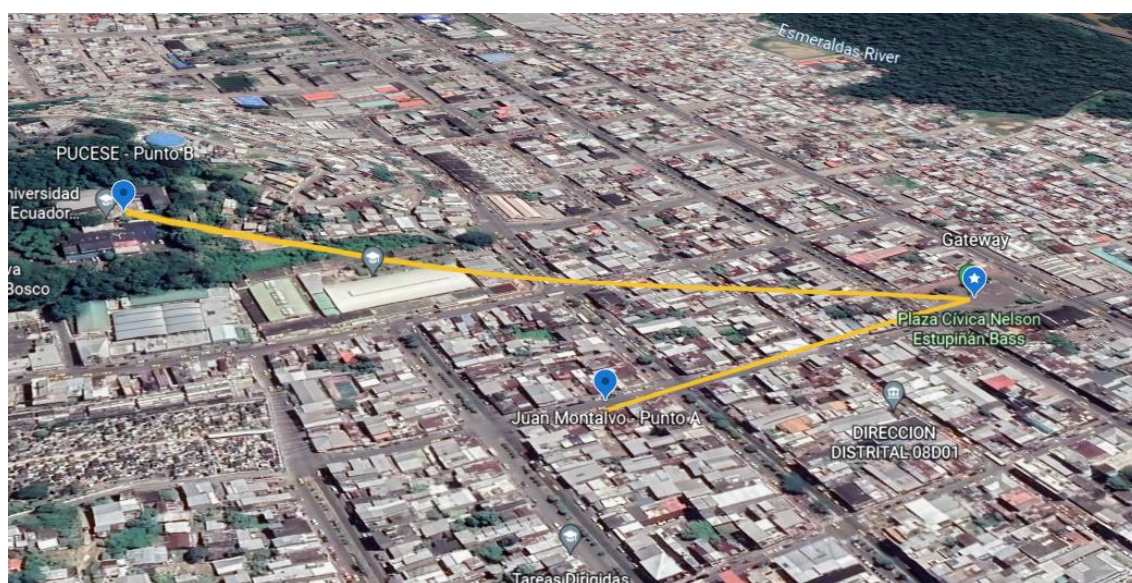


Figura 6 Delimitación espacial de la zona de monitoreo.

2.2. Tipo de investigación

Por la profundidad de la investigación, este es un estudio de tipo descriptivo. La investigación es de este tipo porque se realizó una descripción de los síntomas y los factores causantes de las alergias respiratorias. Esto con el fin de tener un conocimiento clínico más profundo y poder determinar qué elementos son importantes de medir y

monitorear para prevenir este tipo de problemas. Asimismo, se identificaron las tecnologías y sus características técnicas para medir estos factores determinantes.

Por otro lado, de acuerdo con la naturaleza de los datos, la investigación es mixta, esto debido a que tiene un componente cualitativo y otro cuantitativo. El componente cualitativo permitió analizar y describir las características principales de los datos obtenidos de los sensores, microcontroladores, módulo LoRa, la plataforma The Things Network (TTN) y la plataforma ThingSpeak. Por otra parte, el componente cuantitativo se aplicó en la obtención y análisis de los datos como: humedad y temperatura, la cantidad de material particulado [30] en el ambiente y el nivel de CO₂; todos ellos parámetros determinantes en un cuadro alérgico.

Por último, de acuerdo con los medios para obtener los datos, la investigación es de campo, esto debido a que se ubicaron los nodos sensores en el punto A y en el punto B para llevar a cabo el registro de datos en una zona geográfica real como la descrita en la Figura 6.

2.3. Métodos de investigación

En este proyecto se aplicaron dos métodos generales de investigación los cuales son: deductivo e inductivo. El deductivo se aplicó con la finalidad de realizar un análisis lógico sobre la teoría de IoT y aterrizar dicha teoría a la práctica y en un contexto como es el monitoreo de los factores causantes de las alergias respiratorias. Para ello, se tomaron como base los datos de temperatura, humedad, CO₂ y material particulado medidos con tecnologías compatibles con Arduino. Con respecto al método inductivo, este se empleó porque los resultados obtenidos de este proyecto permitieron generar conclusiones en relación al monitoreo de las condiciones que pueden afectar a los cuadros alérgicos respiratorios en las personas.

Finalmente, como método específico se usó el método experimental. Dicho método permitió la manipulación de la variable posición geográfica de los nodos de monitoreo y en base a ello se pudo determinar la calidad de comunicación del nodo ubicado en punto A y en el punto B. Se realizó este análisis, puesto que, las distancias del punto A y el punto B hacia el *gateway* son distintas haciendo que esta variable fuera determinante e influyente en términos de la comunicación inalámbrica entre los nodos finales y el nodo *gateway* de la red.

2.4. Población y muestra

A nivel clínico existe una gran cantidad de factores causantes de las alergias respiratorias, pero para la muestra de este proyecto se eligieron 4 factores específicos, los cuales se consideraron más determinantes en un cuadro clínico los cuales son: humedad, temperatura, CO₂ y material particulado. Por otro lado, se consideró también como muestra 2 puntos del centro de la ciudad de Esmeraldas (Figura 6). Los puntos ilustrados fueron seleccionados de manera estratégica debido a que los nodos se pueden conectar de manera que su funcionamiento puede ser continuo y están protegidos en términos de seguridad física.

2.5. Técnicas de investigación

Las técnicas de investigación que se usaron en este proyecto son: la observación científica, la entrevista y el experimento.

Como primera técnica de investigación se utilizó la entrevista puesto que esta técnica permitió definir principalmente si los parámetros a medir realmente son un factor determinante para las alergias respiratorias. Esta entrevista se le aplicó a un especialista de la salud quien tiene mucha experiencia con casos de pacientes con alergias respiratorias. El cuestionario de la entrevista se encuentra disponible en el Anexo 1.

La observación científica permitió ver las zonas en las que estaban ubicados los nodos finales y el *gateway* para saber si eran puntos viables y confiables para investigar. Asimismo, se observó cómo funcionan los nodos sensores (o nodos finales) del sistema de monitoreo y los resultados marcados por los mismos de manera que fue posible saber si el sistema funcionaba correctamente.

Por último, se utilizó la técnica de experimento que ayudó a entender cómo es la calidad de comunicación entre los nodos finales y el nodo *gateway* de la plataforma de monitoreo. Esto permitirá evaluar la latencia para comunicarse con la nube y la calidad de los datos enviados. La ficha del experimento se describe en detalle en el Anexo 2.

2.6. Operacionalización de variables

Las variables identificadas para este proyecto fueron minuciosamente pensadas y analizadas para poder identificar de manera más sencilla las necesidades tecnológicas y variables relacionada con el sistema de monitoreo de alergias. Las tres variables identificadas se describen en la tabla 4.

Tabla 4 Variables en indicadores sujetos a investigación.

Variables	Descripción	Dimensiones	Descripción	Indicador	Tipo
Alergias respiratorias	Las alergias respiratorias se producen en respuesta a los aeroalérgenos, antígenos transportados por el aire y crea una reacción en el cuerpo [9].	Factores alérgicos	Son los factores más determinantes causantes de las alergias respiratorias.	Humedad Temperatura CO2 Material Particulado	Cuantitativa Cuantitativa Cuantitativa Cuantitativa
Red de Comunicación LoRa	Es el conjunto de canales existentes en el grupo organizado, por los cuales son transmitidos los mensajes a larga distancia.	Calidad de comunicación	Una comunicación es exitosa cuando el significado del mensaje entendido por el receptor es el mismo que el planeado por el emisor.	Antena Tiempo de respuesta Distancia entre nodos Calidad transmisión de datos/mensajes	Cualitativa Cuantitativa Cuantitativa Cuantitativa
Zona Geográfica	Es una extensión territorial, delimitada en base a una serie de características comunes.	Punto de monitoreo	Estos tres parámetros son la ubicación específica donde se encuentran los puntos a experimentar.	Latitud Longitud Altitud	Cuantitativa Cuantitativa Cuantitativa

2.7. Técnicas de procesamiento de datos

La técnica de procesamiento de datos que se utilizó fue la estadística descriptiva porque se hizo una recolección, almacenamiento y análisis de parámetros como lo son la humedad, temperatura, CO2 y material particulado. En cada uno de ellos se realizó el cálculo de porcentajes y se representaron a través de diagramas de dispersión. Con respecto al monitoreo, la plataforma TTN aportó para realizar el análisis de la calidad de la comunicación en la red LoRa.

2.8. Materiales empleados

Se realizó una elección estratégica de los materiales enfatizando en el buen funcionamiento del sistema de monitoreo de las condiciones de humedad, temperatura, CO2 y material particulado. En las tablas 5-9 se describe el hardware usado.

Tabla 5 Información Arduino Mega [31].

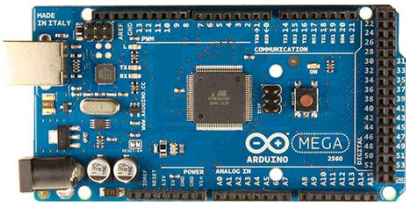
Arduino Mega 2560	
	
Función	Es una placa microcontroladora que permite programar los y conectar los sensores del sistema.
Marca	Arduino
Pines digitales	54
Pines analog	16
Voltaje	5V

Tabla 6 Información módulo de LoRa RFM95 adafruit [32].

Módulo de LoRa RFM95 adafruit	
	
Función	Se encarga de conectar el sistema de sensores hacia el <i>gateway</i> .
Marca	Adafruit
Modulo	LoRa
Alta sensibilidad	-148 dBm
Bullet-proof front-end	IIP3 = -12.5 dBm
Tamaño del módulo	16*16mm

Tabla 7 Información sensor DHT22.

Sensor DHT22	
	
Función	Es el sensor encargado de medir los niveles de humedad y temperatura
Marca	Aosong Electronics
Alimentación	3.3-6V DC
Señal de salida	Señal digital vía single-bus
Rango de operación	humidity 0-100%RH; temperature -40~80Celsius

Tabla 8 Información sensor de CO2 MG-811.

Sensor de CO2 MG-811	
	
Función	Es el sensor encargado de medir CO2 en el ambiente.
Voltaje de calefacción	$6.0 \pm 0.1 \text{ V}$
Resistencia de calefacción	$30.0 \pm 5\% \Omega$
Corriente de calefacción	@200mA
Potencia de calefacción	@1200mW

Tabla 9 Información sensor de material particulado gP2Y1026AU0F.

Sensor gP2Y1026AU0F	
	
Función	Es el sensor encargado de medir los niveles de polvo, polen y material particulado.
colector de voltaje	$5 \pm 0.2 \text{ V}$
Sensibilidad	$0.35 \text{ V} / (0.1 \text{ mg/m}^3)$
Media corriente de alimentación	15 mA

CAPÍTULO III: RESULTADOS

3.1. Análisis de requerimientos

El análisis de requerimientos es un proceso crucial en el desarrollo de todo tipo de sistema informático, incluyendo los sistemas de redes de IoT, como es el caso de esta propuesta, un sistema de monitoreo de sensores compatible con el estándar inalámbrico LoRa. A este nivel es importante la identificación y documentación de los requisitos funcionales y no funcionales del sistema con el objetivo de garantizar que el sistema cumpla con las expectativas y necesidades de los usuarios; en este caso particular de los usuarios finales y del administrador del sistema.

En este apartado se describen los principales actores implicados en el sistema; así como aspectos relacionados en el funcionamiento del mismo. Además, se describe aspectos relacionados con el diseño de los componentes que forman la red de monitoreo de IoT y los resultados de la evaluación de la misma según se detalló en la metodología.

3.1.1. Requisitos funcionales

Los requisitos funcionales son una declaración de cómo debe comportarse el sistema; es decir, éstos definen qué debe hacer el sistema para satisfacer las necesidades o expectativas del usuario. En el caso de un sistema de monitoreo de sensores compatible con LoRa, propuesto en este trabajo, los requisitos funcionales son los siguientes:

A nivel de la capa de percepción

- Los nodos finales deberán capturar datos de humedad, temperatura, CO2 y material particulado.
- Los nodos finales leerán y enviarán los datos del contexto cada 4 minutos.
- Los nodos finales codifican el mensaje a enviar al nodo *gateway*.

A nivel de la capa de comunicación

- El nodo *gateway* recibe los mensajes enviados por los nodos finales.
- El nodo *gateway* envía los datos a la nube.
- El nodo *gateway* gestiona la seguridad de los nodos de la red.

A nivel de la capa de aplicación

- El software de la capa de aplicación se conecta a los nodos sensores de la red LoRa a través de Internet.
- Un usuario administrador podrá iniciar sesión en el sistema utilizando su nombre de usuario y contraseña.
- Un usuario final del sistema podrá realizar acciones de monitoreo sin necesidad de autenticación.
- El sistema estará habilitado para exportar e importar datos capturados en el formato json o csv.
- El sistema desplegará canales y un dashboard de monitoreo global.
- El sistema mostrará un cuadro de mando que muestre los factores climatológicos de la calidad del aire: humedad, temperatura, CO2 y material particulado.
- El sistema desplegará una interfaz de usuario para mostrar los datos capturados por los nodos sensores de manera agrupada e individual, considerando datos históricos.
- El sistema debe almacenar los datos enviados por los nodos sensores.

3.1.2. Requisitos no funcionales

El sistema debe contemplar los siguientes requisitos no funcionales:

- El sistema tiene una interfaz de usuario fácil de usar y comprender.
- El sistema posee una seguridad de encriptación de los datos enviado por el nodo final.
- Los nodos de la red de IoT se comunican mediante el estándar de comunicación LoRa.

3.1.3. Casos de uso

Los casos de uso sirven para poder entender de mejor manera las acciones que puede realizar los actores en todo un sistema. Por ende, se han dividido los casos de uso para dos diferentes actores los cuales son: usuario administrador y usuario común.

El usuario administrador realiza acciones diferentes dependiendo de que plataforma este utilizando, como se aprecia en la Figura 7 el administrador puede realizar diferentes acciones en la plataforma de The Things Network, estas acciones incluyen la creación de dispositivos donde se van a conectar el nodo final. El ingreso de webhooks (método para

ThingSpeak con The Things Network T) el cual permite añadir funciones adicionales, en el caso del proyecto se añadió un webhook de ThingSpeak que permite la comunicación entre estas dos plataformas.

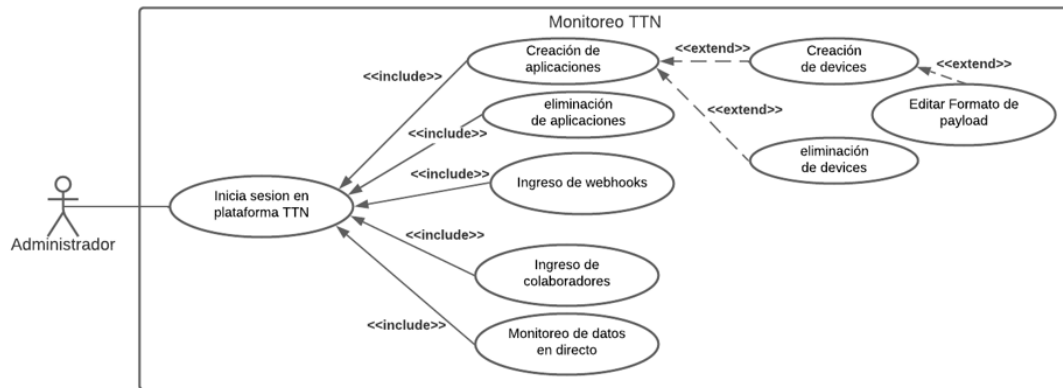


Figura 7 Caso de uso administrador TTN.

En el caso de la plataforma ThingSpeak, el administrador puede realizar otras acciones las cuales permitirán el monitoreo correcto en los dashboards que ofrece esta plataforma. Una de las acciones más relevantes es la creación de los canales, puesto que aquí se puede editar qué dashboards desea mostrar y editar sus formas y delimitaciones de los datos. Otra de las acciones más relevantes sería la del consumo de la API debido a que esta ofrece la posibilidad de guardar los datos en una base de datos externa. Todo esto se puede apreciar de mejor manera en la Figura 8.

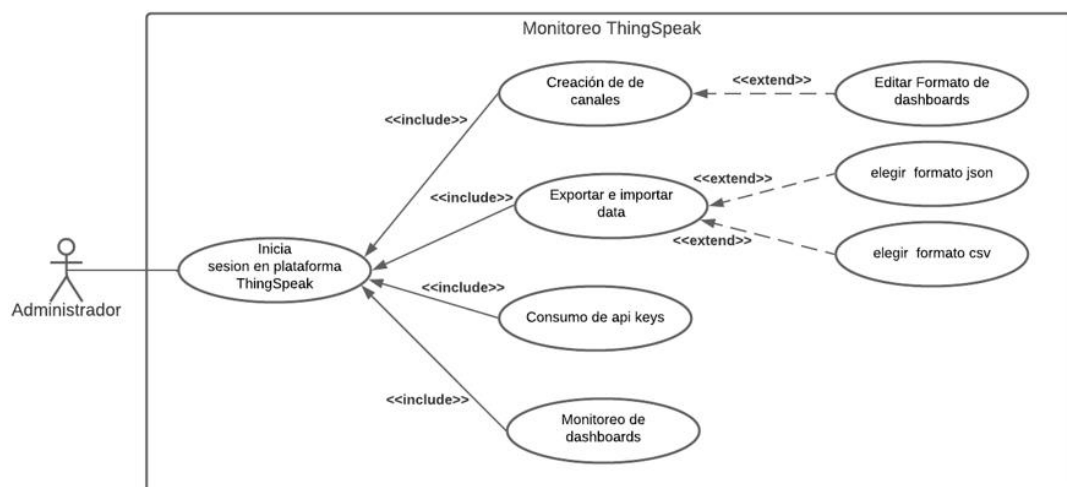


Figura 8 Caso de uso administrador ThingSpeak.

Por último, se tiene a los usuarios finales y estos solo tendrán acceso a la plataforma ThingSpeak con la posibilidad de monitorear los datos presentados en diferentes dashboards sin necesidad de tener una cuenta en esta plataforma. Otras de las acciones serían la de importar y exportar los datos en el formato de su preferencia como puede json o csv como se aprecia en la Figura 9.

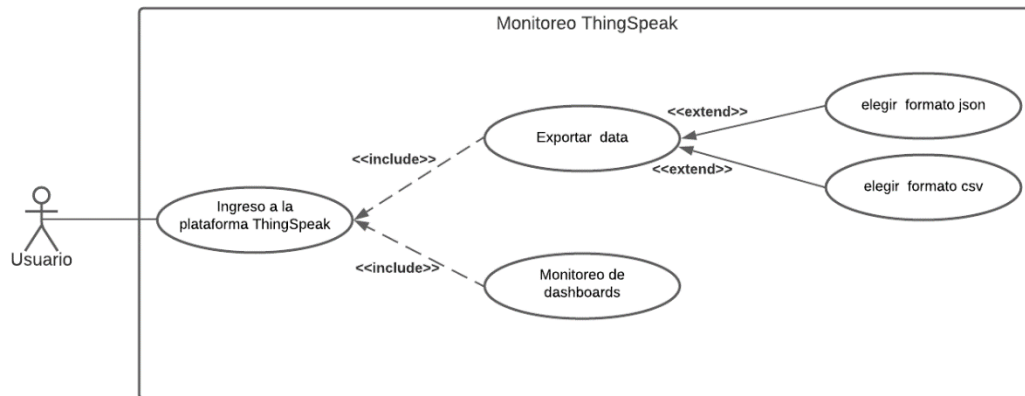


Figura 9 Caso de uso usuarios ThingSpeak.

3.1.4. Funcionalidades de los nodos

El siguiente diagrama permite ver la interacción entre objetos o componentes en un sistema y el orden en que se realizan las acciones. Esta es una herramienta útil para visualizar y documentar el flujo de eventos en un sistema de monitoreo de sensores con LoRa hacia TTN.

Como se puede observar en la Figura 10 el sistema empieza principalmente desde el nodo arduino con la lectura de los sensores para después comunicarse a través de nodo *gateway* creado a partir de la tecnología RAK7289 WisGate Edge Pro-interfaces hacia la plataforma de monitoreo que en este caso es TTN. Como se puede apreciar, antes de enviar la información leída por los sensores, primero se pasa por una etapa de permisos e identificación del dispositivo; en este caso los identificadores serían las NwkSKey (Clave de sesión de red), AppSKey (clave de la aplicación) y DevAddr (dirección del dispositivo). Después de pasar esta etapa la plataforma de TTN permite monitorear los datos enviados por los sensores.

Por último, se realizó la comunicación entre TTN y ThingSpeak por media de una api key, lo cual permite enviar la información a esta última plataforma en la cual se pueden monitorear los datos en diferentes dashboards con una interfaz para usuarios finales o

usuarios no sofisticados. A partir de esta interfaz se pueden observar los niveles de humedad, temperatura, CO2 y material particulado del ambiente en el que se encuentra ubicado del nodo final.

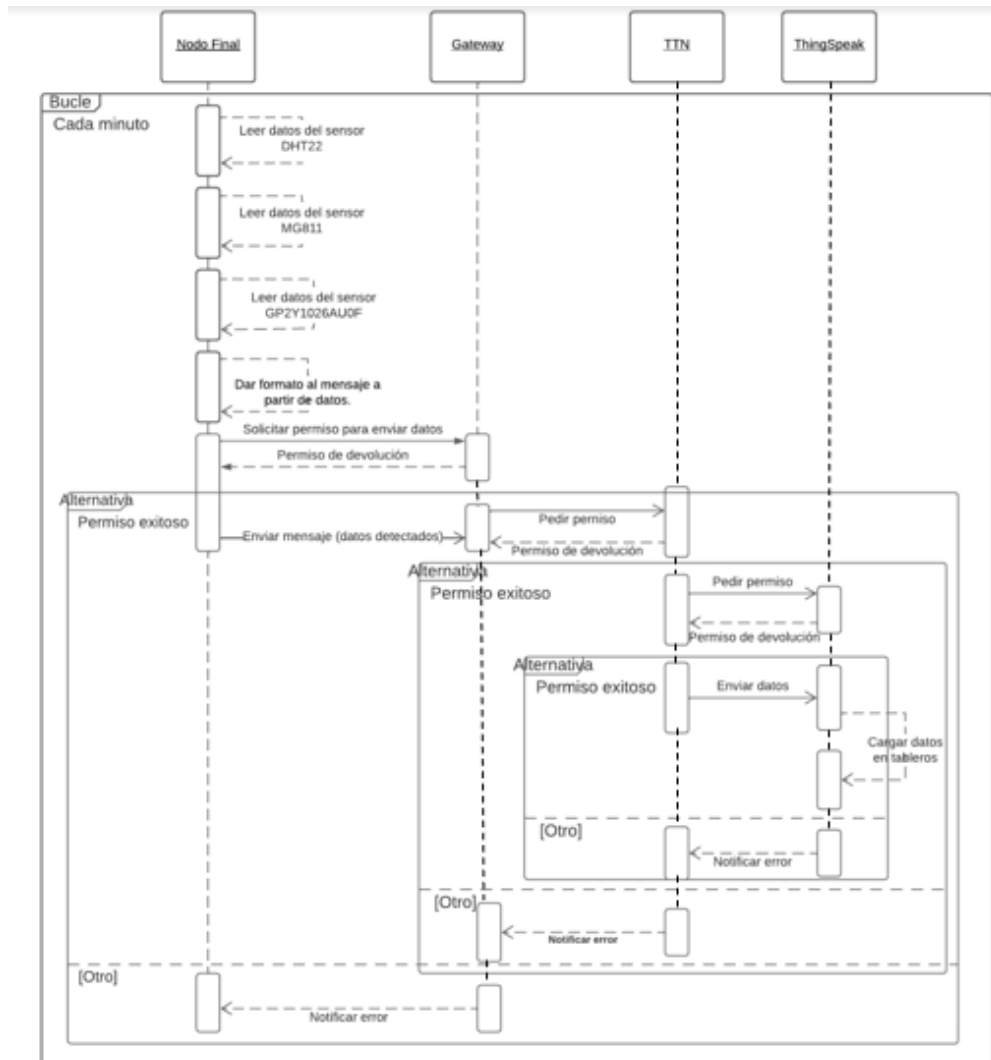


Figura 10 Diagrama de secuencia del sistema.

3.2. Arquitectura del sistema

La arquitectura del sistema es una herramienta que permite ver con mejor perspectiva cuales son los distintos componentes que forman parte del sistema y cómo éstos se relacionan entre sí. Estos componentes trabajan juntos para garantizar la recopilación, transmisión, procesamiento y visualización de los datos de los sensores de forma eficiente y segura.

La arquitectura debe ser escalable, segura y fiable para garantizar que el sistema cumpla con los requisitos funcionales y no funcionales previamente descritos y definidos.

Como se puede observar en la Figura 11 la arquitectura propuesta está dividida en tres capas, siguiendo los lineamientos de la arquitectura descrita en el marco teórico. Las 3 capas de la arquitectura propuesta en este trabajo son las siguientes: percepción, red y aplicación.

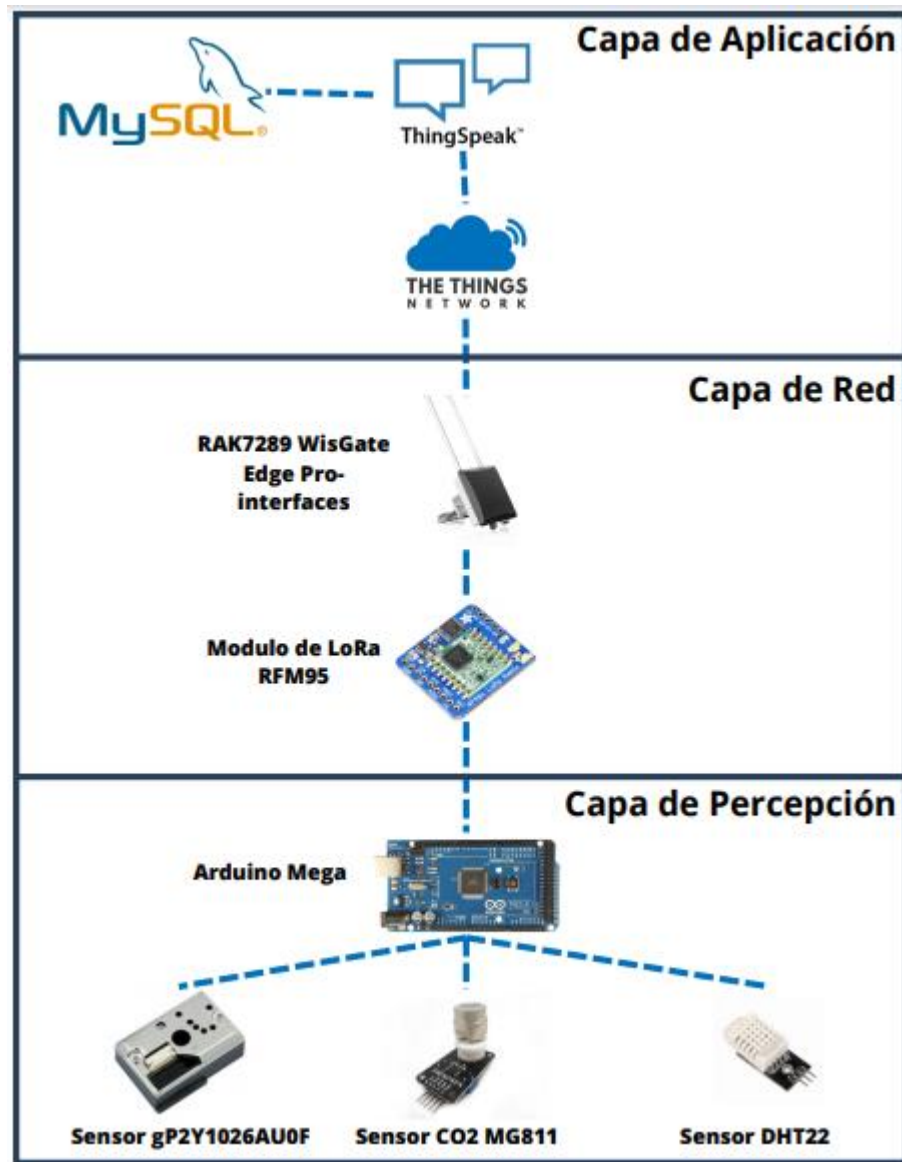


Figura 11 Arquitectura del sistema propuesto.

3.2.1. Capa de percepción

Esta sección es la base de este proyecto debido a que los sensores se encargan de realizar la lectura de los parámetros relacionados con las alergias respiratorias (humedad, temperatura, CO2 y material particulado). Estos sensores tienen la tecnología especializada para leer e interpretar cada una de estas magnitudes físicas.

Como complemento de los sensores, el microcontrolador Arduino Mega permite brindar la fuente de voltaje requerida para cada sensor y por añadidura permite también realizar la programación de especificada de cada sensor para garantizar un funcionamiento óptimo.

El sensor DHT22 posee una salida de señal digital de calibración DHT22. Utiliza tecnología única de adquisición de señales digitales y tecnología de detección de humedad para garantizar su confiabilidad y estabilidad. Sus elementos sensores están conectados a un microcontrolador de 8 bits. Para su programación se requirió la instalación de la librería “DHT Sensor Library”.

El sensor de CO2 MG811 es un componente electrónico que se utiliza para medir la concentración de dióxido de carbono en el aire. Está diseñado para ser altamente preciso y se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo la monitorización de la calidad del aire en interiores, el control de la ventilación en edificios y la medición de la producción de gases en procesos industriales.

El sensor GP2Y1026AU0F es un sensor de polvo y partículas utilizado para medir la concentración de partículas en el aire. Se utiliza comúnmente en aplicaciones relacionadas con la calidad del aire, como el monitoreo de la contaminación del aire y la ventilación de edificios. Funciona mediante la emisión de luz infrarroja y la medición de la cantidad de luz reflejada por las partículas en el aire. La cantidad de luz reflejada es proporcional a la concentración de partículas en el aire y se puede convertir en una lectura cuantitativa de la concentración de partículas. Para el funcionamiento de este sensor no es necesaria una librería, pero si es necesario la aplicación de una fórmula para calcular el material particulado 2.5 en el ambiente. La fórmula se describe en (2) y su complemento previo al cálculo en (1).

$$V_{out} = \frac{V_{outH} \times 256 + V_{outL}}{1024 \times 5} \quad (1)$$

$$pm25 = ((V_{out} - 0.0356) \times 120000) \times 100 \quad (2)$$

3.2.2. Capa de red

La capa de red es la responsable de la transmisión de datos desde los sensores hasta la plataforma de procesamiento de datos. Una de las funciones más importantes de la capa de red es la seguridad de los datos, ya que permite que los datos viajen desde los sensores

de los nodos finales hasta la plataforma de procesamiento de datos de manera eficiente y segura. Para la seguridad, el sistema utiliza un algoritmo de encriptación denominado *Advanced Encryption Standard* (AES) payload proporcionado por la librería “MCCI LoRaWAN LMIC library”.

El RAK7289 WisGate Edge Pro-interfaces es el *gateway* encargado de comunicar el sistema con TTN, es decir, este dispositivo actúa como puente entre la red LoRa y otros sistemas, en este caso sería la red de Internet para la comunicación con TTN. RAK7289 permite el despliegue comercial de IoT con sus componentes de calidad industrial y alcanza un alto nivel de fiabilidad. Además, soporta hasta 16 canales LoRa, multi backhaul con conectividad Ethernet, Wi-Fi y celular. Opcionalmente hay un puerto dedicado para diferentes opciones de alimentación, paneles solares y baterías. Con su nuevo diseño de carcasa, permite que las antenas LTE, Wi-Fi y GPS estén dentro de la carcasa [33]. Por lo tanto, el RAK7289 es adecuado para cualquier escenario de uso, ya sea un despliegue rápido o la personalización con respecto a la interfaz de usuario y la funcionalidad.

Por otra parte, el módulo RFM95 es el encargado de conectar y enviar la información de los sensores hacia el *gateway* dentro de la red LoRa. Incorpora el módem de espectro ensanchado y técnicas de corrección de errores para aumentar el alcance LoRa, capaz de lograr un alcance significativamente mayor que los sistemas existentes basados en modulación FSK/OOK. Con este nuevo esquema de modulación se pueden conseguir sensibilidades 8 dB mejores que FSK con una referencia de cristal de bajo coste y baja tolerancia [32].

3.2.3. Capa de aplicación

La capa de aplicación es un componente crítico para garantizar una implementación exitosa de un sistema de monitoreo de sensores con LoRa enfocado en TTN, ThingSpeak y la base de datos MySQL. Debe ser escalable, seguro y fácil de usar para garantizar una experiencia satisfactoria para el usuario final.

En esta capa se encuentra primero The Things Network. Ésta es especialmente la plataforma encargada del procesamiento de los datos, es decir, que recibe y procesa los datos recopilados por los sensores y dispositivos LoRa. En el Código 1 se puede observar que para realizar la decodificación de los datos en TTN se utilizó la función “Decoder” con un formato de javascript.

Código 1 Decodificador en formato javascript TTN

```
function Decoder(bytes, port) {
  var decoded = {};
  decoded.field1 = ((bytes[0]<<8) | bytes[1])/100;
  decoded.field2 = ((bytes[2]<<8) | bytes[3])/100;
  decoded.field3 = ((bytes[4]<<8) | bytes[5])/100;
  decoded.field4 = ((bytes[6]<<8) | bytes[7])/100;

  return {
    'field1': decoded.field2,
    'field2': decoded.field1,
    'field3': decoded.field3,
    'field4': decoded.field4,
  }
}
```

Otra de las plataformas que definen esta capa de aplicación es ThingSpeak. Dicha aplicación tiene como funcionalidad principal el monitoreo de los datos permitiendo conocer la calidad de los datos enviados por los sensores y, además, llevar un control del tiempo en el que llegan cada uno de estos datos.

Como complementos de capa de aplicación se ha integrado una base de datos. Para la base de datos se optó por MySQL como herramienta de gestión de base de datos debido a que posee un sistema relacional y es basado en un lenguaje de consulta estructurado [34]; siendo compatible con lo requerido para almacenar en este sistema. En la Figura 12 se observa el diagrama de la base de datos relacional empleado por el sistema para realizar el almacenamiento de los datos fruto del proceso de monitoreo por parte de los nodos de la red.

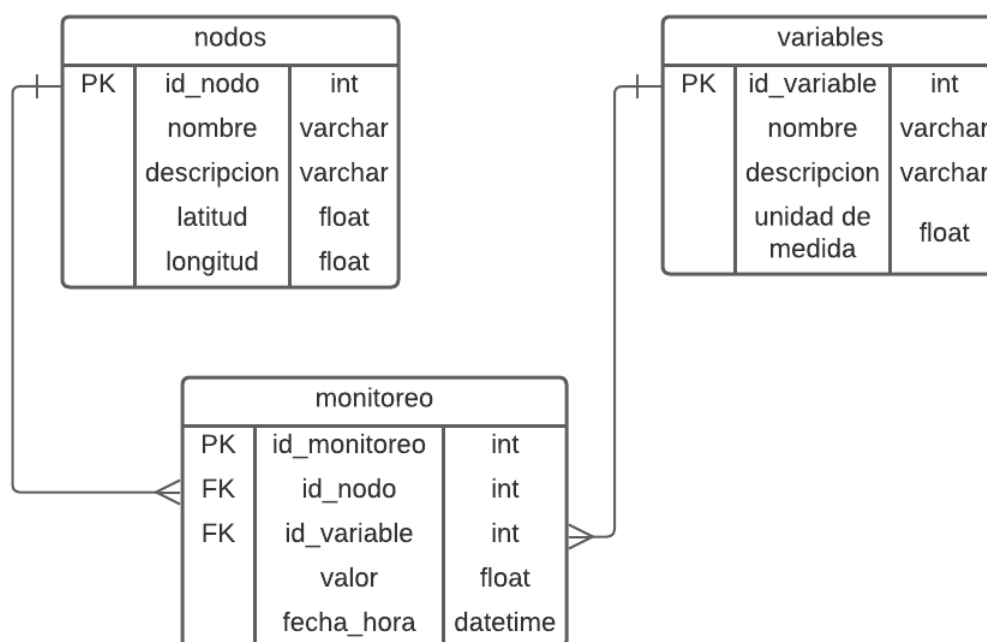


Figura 12 Diagrama de la base de datos.

3.3. Prototipo

En este proyecto se creó el diagrama referencial del circuito de los nodos finales del sistema de monitoreo basados en el estándar de comunicación LoRa. Los diagramas son una versión inicial y simplificada de un sistema completo diseñado para probar y demostrar los conceptos.

3.3.1. Diagrama de circuitos y conexiones

Como se puede observar en la Figura 13, el diagrama del circuito es una representación gráfica de los componentes electrónicos que conforman el sistema y de la misma manera permite ver en qué pines están conectados y cómo funcionan en conjunto.

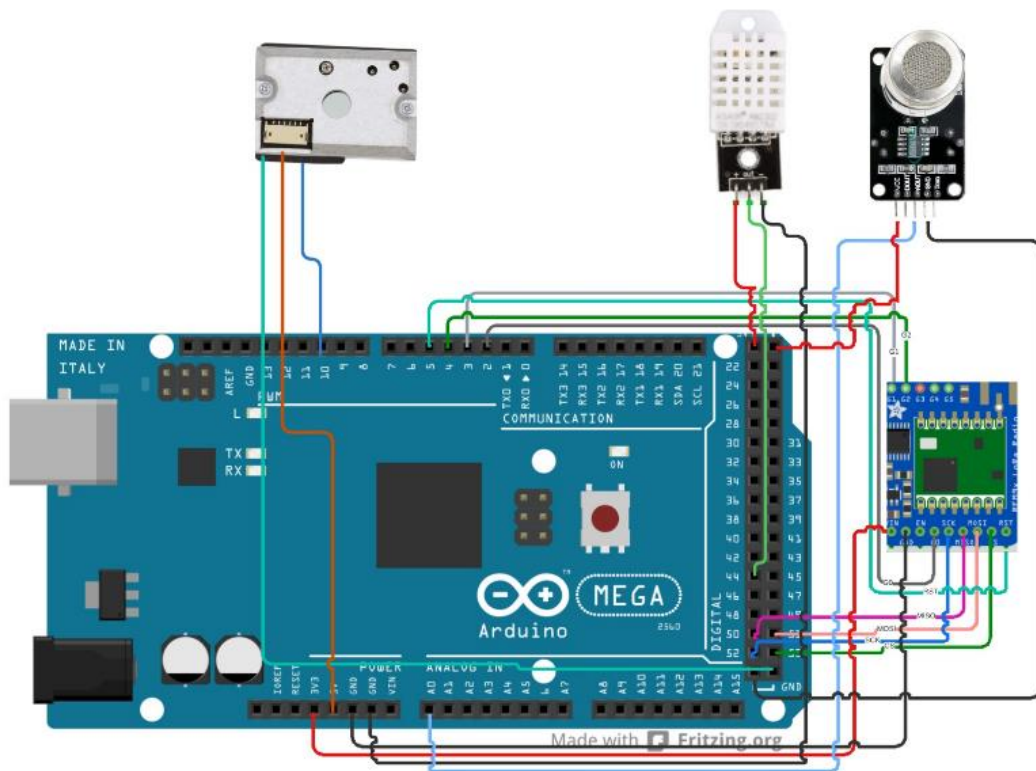


Figura 13 Diagrama del circuito de nodo final.

Como se observa en la Figura 13 el sensor DHT22 se encuentra conectado a una fuente de poder de 5V y su respectiva conexión a tierra (GND). Para el envío de la información leída por el sensor se utilizó el pin digital número 44. A continuación, se proporciona de manera general las líneas de código necesarias para realizar la lectura del sensor y puesta en marcha del nodo final.

Código 2 Lectura del sensor temperatura y humedad (DHT22).

```
#include "DHT.h"
#define DHTPIN 44      // pin Digital donde está conectado el sensor
#define DHTTYPE DHT22
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
void setup(){
  Serial.begin(9600);
  dht.begin();
}

void loop() {
  float humidity = dht.readHumidity(false) ;
  float temperature = dht.readTemperature(false) ;
}
```

El sensor de material particulado gP2Y1026AU0F se encuentra conectado a una fuente de poder de 5V y a una conexión a tierra. Para el envío de información leída por el sensor se utilizó el pin PWM (Pulse Width Modulation) número 10. A continuación, se proporciona de manera general las líneas de código necesarias para realizar la lectura de los datos.

Código 3 Lectura del sensor material particulado (gP2Y1026AU0F).

```
#include <SoftwareSerial.h>
#define rxPin 10
SoftwareSerial mySerial(rxPin);
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  mySerial.begin(2400);
}
void loop() {
  int frame[7];
  int dataStart, VoutH, VoutL, VrefH, VrefL, checksum, dataEnd;

  // Read in next frame.
  for(int i = 0; i < 7; i++) {
    frame[i] = getSerial();
  }

  // Asignar valores
  dataStart = frame[0];
  VoutH = frame[1];
  VoutL = frame[2];
  VrefH = frame[3];
  VrefL = frame[4];
  checksum = frame[5];
  dataEnd = frame[6];
  float Vout = (VoutH * 256 + VoutL) / 1024.0 * 5.0;
  float pm25 = ((Vout-0.0356)*120000) * 100;
}
```

El sensor de CO2 MG-811 se encuentra conectado a una fuente de poder de 5V y a una conexión a tierra. Para el envío de información leída por el sensor se utilizó el pin analógico A0. A continuación, se proporciona de manera general las líneas de código necesarias para realizar la lectura de los datos.

```
#include "CO2Sensor.h"
CO2Sensor co2Sensor(A0, 0.99, 100);
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  co2Sensor.calibrate();
}
void loop() {
  int val = co2Sensor.read();
}
```

Para el módulo LoRa RFM95 se necesita una fuente de poder de 3.3V y a una conexión a tierra. Este dispositivo utiliza varios pines de conexión difíciles de expresar de manera literal, por este motivo y para una mejor comprensión, las conexiones se ilustran en la Figura 14.

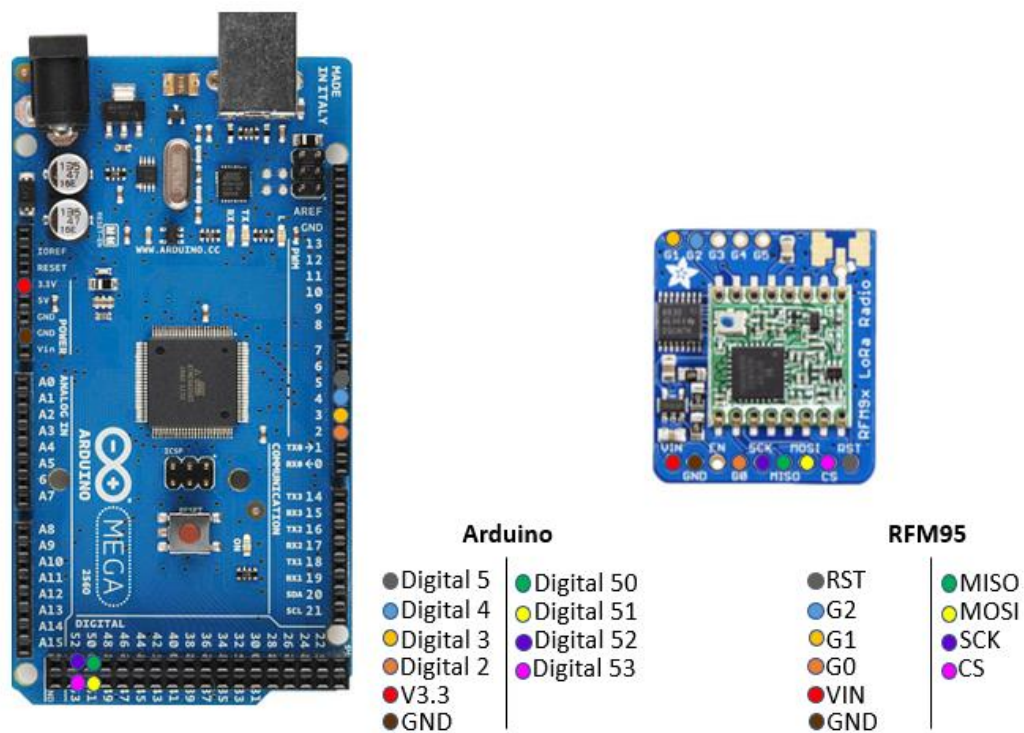


Figura 14 Pines módulo de LoRa RFM95.

Después de toda la explicación de los pines en los cuales están conectado los sensores y el módulo LoRa, es bueno tener un punto de vista más claro de como se ve el nodo final. Por este motivo en la Figura 15 hay un collage con el nodo final ya armado y en funcionamiento, así se tendrá una mejor apreciación de cómo es el nodo final.

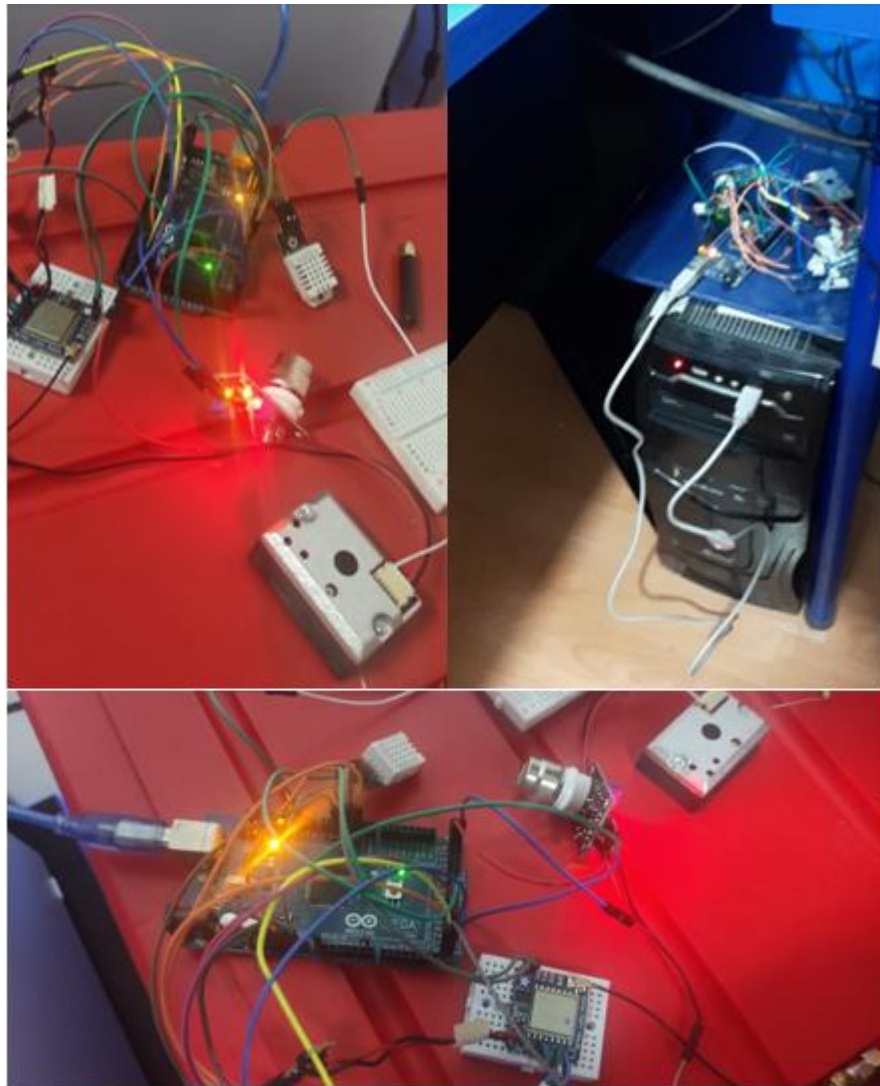


Figura 15 Nodo final en funcionamiento

3.3.2. Comunicación LoRa

Como se mencionó anteriormente, para que este sistema funcione con una comunicación LoRa necesita principalmente el hardware creado para que cumpla esta característica. Como siguiente paso, para este proyecto se necesitó programar el módulo de lora RFM95 que se encuentra conectado al Arduino Mega. Para el funcionamiento de este módulo se necesita la librería “MCCI LoRaWAN LMIC library”. Esta librería usa por defecto las versiones 1.0.2 y 1.0.3 de LoRa.

Para este proyecto se opta por la versión 1.0.3 por el soporte que ofrece y funcionalidades más actualizadas. Asimismo, al utilizar esta versión, se optó por el parámetro regional v1.0.3 con la revisión A. Estos parámetros son requisitos o normas establecidas dependiendo de la región en la que el nodo se encuentre localizado. En este

proyecto se utiliza la frecuencia de los Estados Unidos de 902-928 MHz, puesto que en Ecuador se utiliza la misma frecuencia.

Por último, se utilizó el modo de activación ABP, el cual es proporcionado por The Things Stack y facilita una activación con claves fijas DevAddr, permitiendo una conexión personalizada y fácil de utilizar.

3.3.3. Capa de aplicación

Prototipado de baja fidelidad

El prototipado de baja fidelidad como se aprecia en la Figura 16 y 17, es una técnica de diseño y desarrollo permite conocer una representación simple de cómo está formada la interfaz de monitoreo que brinda la herramienta ThingSpeak orientado específicamente a los parámetros enviados por el nodo final.

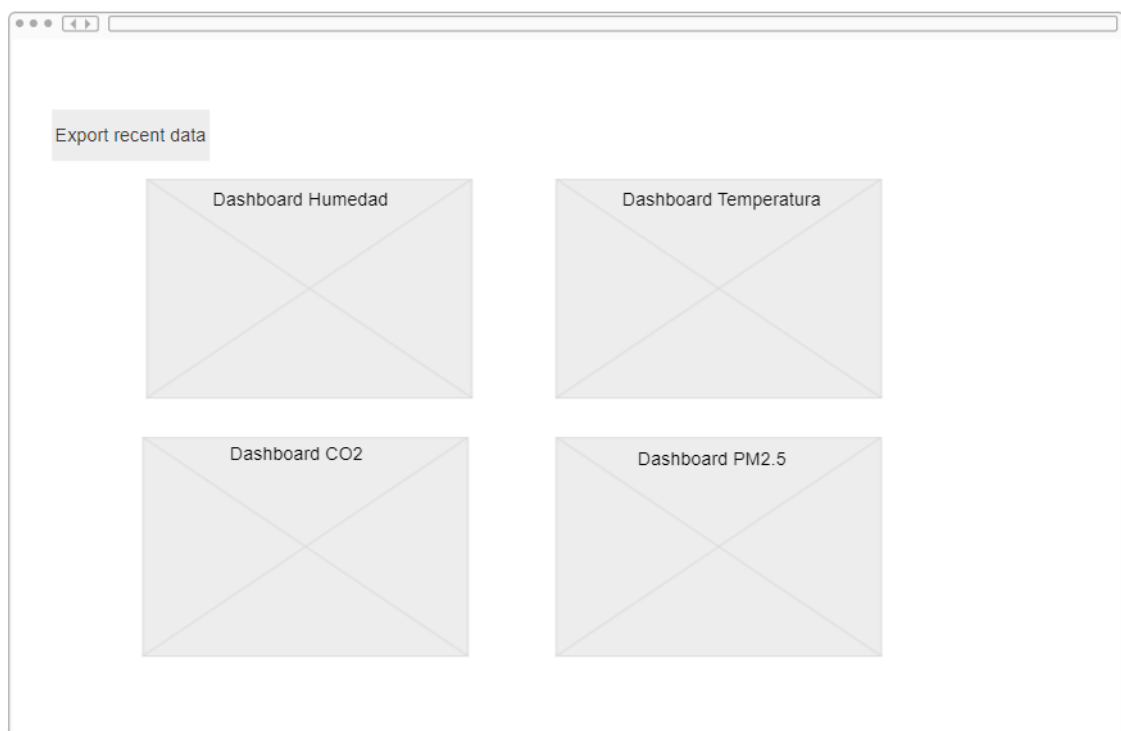


Figura 16 Prototipado de baja fidelidad ThingSpeak del dashboard grupal

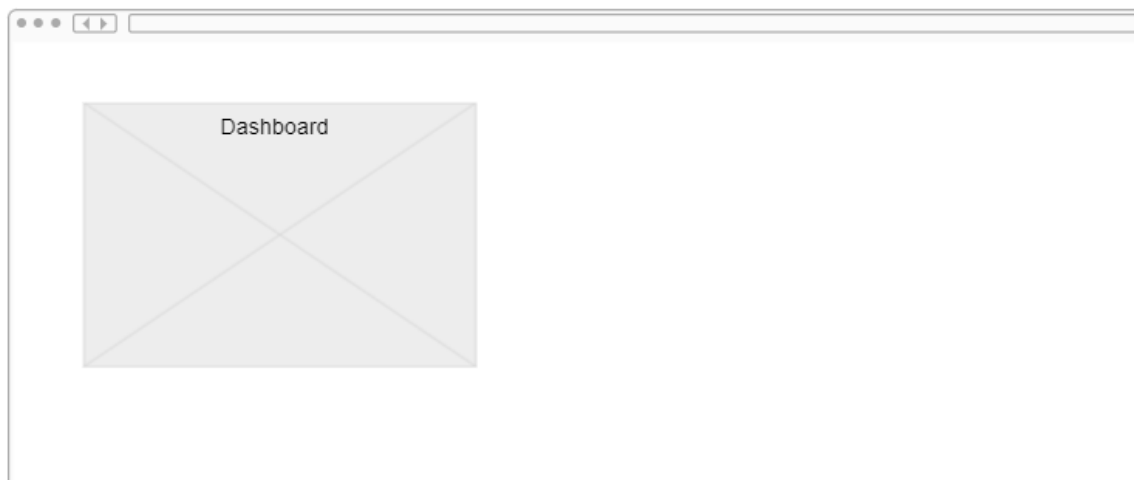


Figura 17 Prototipado de baja fidelidad ThingSpeak del dashboard individual

Prototipado de alta fidelidad

Para el prototipado de alta fidelidad se utilizó una captura de la interfaz final que ofrece ThingSpeak como se aprecia en la Figura 18 y 19. Esto se hizo para mejor apreciación del diseño final, puesto que el prototipo de alta fidelidad es un diseño y desarrollo que se utiliza para crear una representación detallada y precisa de un producto o sistema.

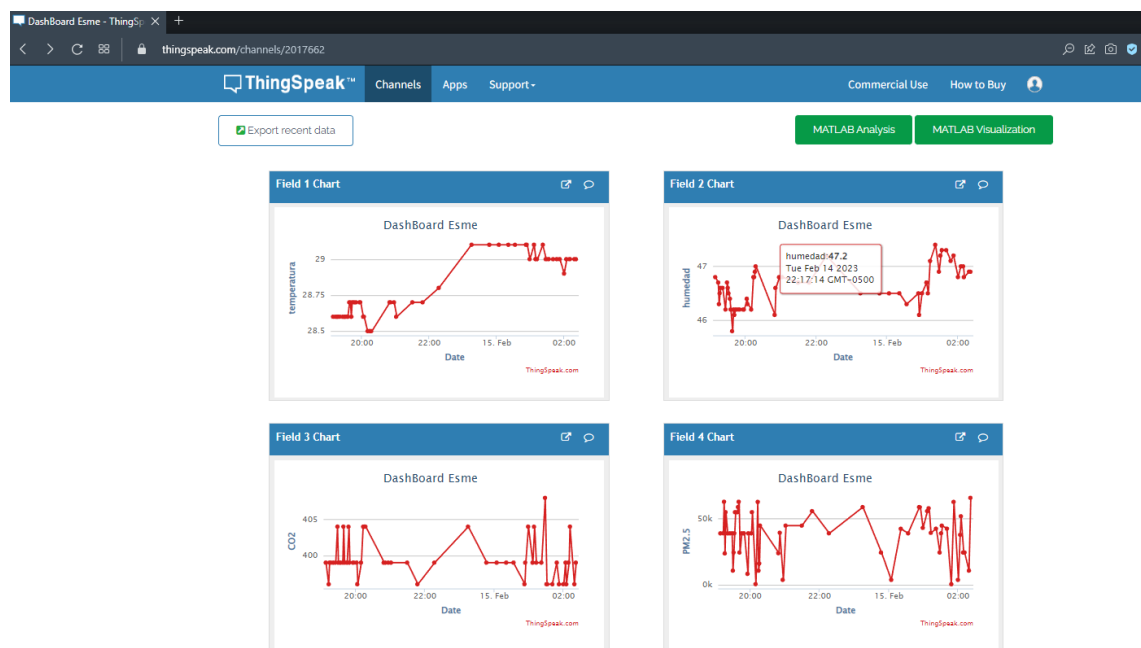


Figura 18 Prototipado de alta fidelidad ThingSpeak del dashboard grupal.

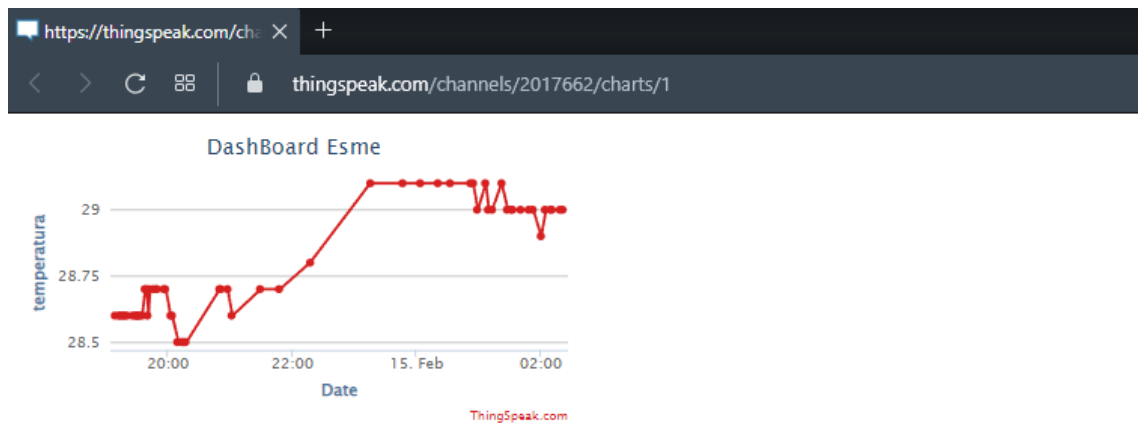


Figura 19 Prototipado de alta fidelidad ThingSpeak del dashboard individual.

3.4. Evaluación y análisis de resultados

En esta sección se evaluarán los resultados obtenidos en la capa de aplicación, permitiendo analizar la calidad de los datos enviados y la calidad de comunicación que existe entre el punto A y el punto B en relación con el *gateway* ubicado en la Plaza Cívica del centro de Esmeraldas.

3.4.1. Escenarios

Se tomaron en cuenta dos escenarios con el fin de analizar cómo reaccionan los dispositivos ante diversos eventos. Estos escenarios permitirán ver si los datos enviados por el nodo final reaccionan eficientemente y poder examinar la calidad de datos y la calidad de comunicación.

Escenario 1: plástico quemado

Este escenario se creó con la finalidad de visualizar si el nodo final reacciona eficientemente a la quema de plástico cerca de los sensores del sistema. Como se puede observar en la Figura 20, se ha encerrado en una circunferencia el punto específico donde se realiza la quema de plástico a las 16:21 del 13 de febrero del 2023. Apareciéndose un aumento en el dashboard. los datos de CO₂ y Material particulado aumentan a 412ppm y 54656 partículas/0.01 pie³. El nodo final se localizó en el punto A, esto es en la calle Juan Montalvo Esmeraldas centro, latitud: 0.969468 y longitud: -79.6547.

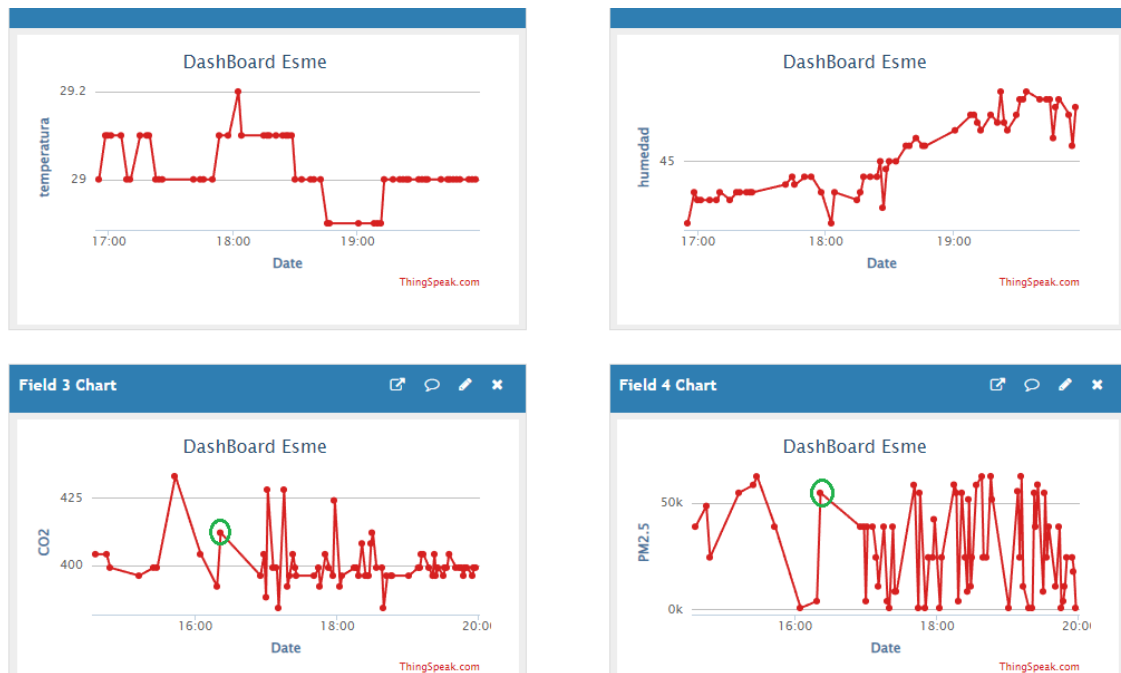


Figura 20 Escenario plástico quemado dashboard.

Para poder tener una mejor apreciación del espacio donde se realizó este experimento revisar la Figura 21. Debido que el punto A donde se realizó el escenario es un ambiente cerrado, por seguridad de cualquier evento físico ocurrido en el exterior.

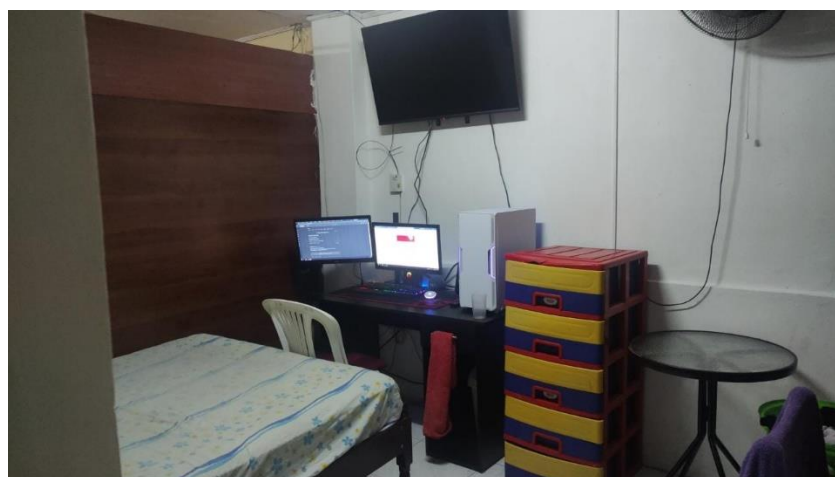


Figura 21 Habitación punta A

Escenario 2: clima lluvioso

Este escenario se centra más en la calidad de comunicación y la pérdida de datos, puesto que durante una fuerte lluvia se quiso analizar cómo reacciona el nodo final a este tipo de climas muy comunes. En la Figura 22 se puede visualizar cómo hay una pérdida de datos

durante todo el transcurso del clima lluvioso, donde TTN solo recepta datos aproximadamente cada hora cuando el sistema está programado para enviar datos cada minuto. Además, se pueden visualizar esas alertas con signo de admiración de reconexión del sistema.

Applications > My Application Tesis > Live data

Time	Entity ID	Type	Data preview	Verbose stream	Export as JSON	Pause	Clear
↑ 02:47:10	arduino-mega-abp...	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C D6 CA <> Payload: { field1: 29.1, field2: 46.5, field3: 399, field	☒			
⚠ 02:34:24		Console: Filter enabled	An event filter has been enabled				
⚠ 02:34:23		Console: Filter disabled	The previously set event filter has been disabled				
⚠ 01:24:42		Console: Stream reconnected	The stream connection has been re-established				
↑ 01:24:36	arduino-mega-abp...	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C D6 CA <> Payload: { field1: 29.2, field2: 46.5, field3: 399, field	☒			
⚠ 01:24:36		Console: Stream connection...	The connection was closed by the stream provider				
⚠ 00:13:01		Console: Filter enabled	An event filter has been enabled				
⚠ 00:12:53		Console: Filter disabled	The previously set event filter has been disabled				
↑ 00:09:40	arduino-mega-abp...	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C D6 CA <> Payload: { field1: 29.4, field2: 46.7, field3: 396, field	☒			
↑ 00:08:08	arduino-mega-abp...	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C D6 CA <> Payload: { field1: 29.4, field2: 46.7, field3: 396, field	☒			
⚠ 00:06:42		Console: Stream reconnected	The stream connection has been re-established				
⚠ 00:06:36		Console: Stream connection...	The connection was closed by the stream provider				

Figura 22 Escenarios con clima lluvioso TTN.

De igual manera que en el escenario 1, en este escenario con un clima lluvioso se realizó en un espacio cerrado, por seguridad de cualquier evento físico ocurrido en el exterior. Para poder tener una mejor apreciación del espacio donde se realizó este experimento revisar la Figura 23.



Figura 23 Oficina PUCESE punto B

3.4.2. Calidad de datos

Se puede observar la Figura 24 que en el punto A la calidad de datos no es muy buena debido a que está ubicado en el centro de la ciudad de Esmeraldas a 20,32 metros sobre el nivel del mar. Esta es la misma altura a la que estaba ubicado el *gateway* haciendo que varios obstáculos (i.e., edificios, casas, autos) interfieran en la calidad de los datos haciendo que estos se pierdan, puesto que el nodo final está programado para enviar información cada minuto y es posible observar que los datos llegan a TTN pasando cada 4, 10 y 20 minutos en diferentes casos.

Time	Entity ID	Type	Data preview	Verbose stream	Export as JSON	Pause	Clear
↑ 00:19:35	arduino-mega-abp...	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C D6 CA <> Payload: { field1: 29.6, field2: 43.3, field3: 399, field4: ... }	☐			
↑ 00:11:56	arduino-mega-abp...	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C D6 CA <> Payload: { field1: 29.6, field2: 43.7, field3: 399, field4: ... }	☐			
↑ 00:07:21	arduino-mega-abp...	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C D6 CA <> Payload: { field1: 29.6, field2: 43.8, field3: 399, field4: ... }	☐			
↑ 00:02:45	arduino-mega-abp...	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C D6 CA <> Payload: { field1: 29.6, field2: 43.5, field3: 399, field4: ... }	☐			
ⓘ 23:59:48		Console: Stream reconnected	The stream connection has been re-established				
↑ 23:59:42	arduino-mega-abp...	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C D6 CA <> Payload: { field1: 29.6, field2: 44, field3: 399, field4: ... }	☐			
ⓘ 23:59:41		Console: Stream connection...	The connection was closed by the stream provider				
↑ 22:46:16	arduino-mega-abp...	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C D6 CA <> Payload: { field1: 29.6, field2: 43.7, field3: 399, field4: ... }	☐			
↑ 22:24:50	arduino-mega-abp...	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C D6 CA <> Payload: { field1: 29.7, field2: 42.6, field3: 399, field4: ... }	☐			
↑ 22:03:25	arduino-mega-abp...	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C D6 CA <> Payload: { field1: 29.6, field2: 42.6, field3: 399, field4: ... }	☐			
ⓘ 21:52:48		Console: Stream reconnected	The stream connection has been re-established				
↑ 21:52:42	arduino-mega-abp...	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C D6 CA <> Payload: { field1: 29.6, field2: 42.8, field3: 399, field4: ... }	☐			

Figura 24 Resultados TTN punto A.

En el punto B (Pucese, latitud: 0.969965 y longitud: -79.6565) la situación es distinta puesto que este punto está ubicado en la PUCESE a una altitud de 31,53 metros sobre el nivel del mar. Aquí hay una comunicación con menos interferencia de objetos hacia el *gateway* y se puede apreciar en la Figura 25 cómo el envío de la información es recibido por TTN cada minuto aproximadamente. Hay que tener en cuenta que el dispositivo se encuentra en un espacio cerrado por seguridad de cualquier evento físico ocurrido en el exterior.

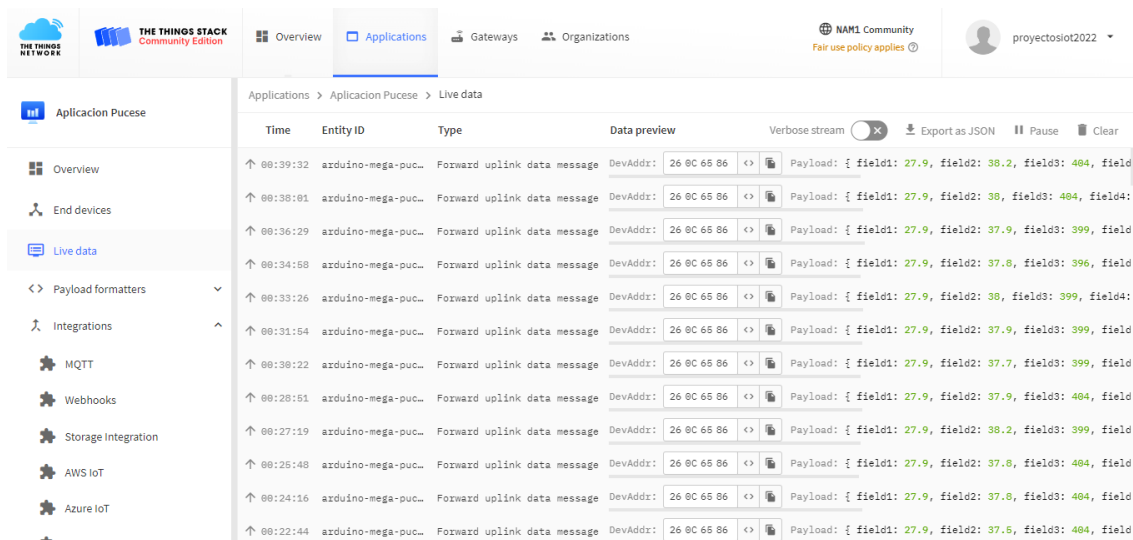


Figura 25 Resultados TTN punto B

3.4.3. Calidad y velocidad de comunicación

Como se pudo apreciar en la Figura 20 con el escenario 2, la calidad de la comunicación puede ser interferida muchas veces por eventos climáticos. Pero, asimismo, como se aprecia en la Figura 21 en el punto A (Juan Montalvo Esmeraldas centro, latitud: 0.969468 y longitud: -79.6547), al estar en la misma altura que el *gateway*, los edificios, casas, autos, crean una interferencia en la comunicación provocando pérdida de datos y cierta demora en la recepción de la información por parte de TTN.

En el punto B (Pucese, latitud: 0.969965 y longitud: -79.6565) el sistema reacciona de manera diferente, no hay tales problemas de comunicación como se aprecia en la Figura 22 porque al estar en un punto más alto hay menos obstáculos que interfirieran con la misma, habiendo solo un tiempo de demora en el envío de los datos, este tiempo es de aproximadamente 30 segundos.

Se puede visitar el repositorio con los códigos utilizados en este proyecto en el siguiente URL: <https://github.com/TesisPuceseLora/Monitoreo.git>

CAPITULO IV: DISCUSIÓN

De acuerdo a los resultados obtenidos de nuestra investigación, se demuestra que hay factores ambientales, de infraestructura y niveles de altitud, que intervienen en las medidas y valores que arrojan los equipos para establecer la calidad de la humedad, de muestreo y niveles de contaminantes y material particulado objeto de este estudio.

En relación al estudio hecho por Sergio Iván López, et al., donde mediante un equipo o sensores DHT y SGP en un aula de clase sin ningún tipo de contaminantes arroja valores normales, a diferencia de nuestra investigación que al crear un ambiente contaminado por CO₂ al quemar plástico arroja valores en PPM altos lo que confirma que los sensores captan el químico al igual que el material particulado. En nuestro estudio se empleó un escenario controlado que facilitó analizar los cambios en los datos medidos por los nodos.

González Leni y Sánchez Guzmán, en su estudio de la calidad de aire en la ciudad de México-Chiapas con el agregado de observar las causas de enfermedades respiratorias, utiliza un sensor DHT22 y utilizando la plataforma ThingSpeak para el monitoreo de los datos. Y concluye que existe alta contaminación por el circular de autos y buses; al mismo tiempo deduce que hay mayor contaminación durante el día que por las noches. De acuerdo a los datos obtenidos por los equipos que utilizamos, nuestra investigación tiene similitud en el correcto funcionamiento de la plataforma ThingSpeak, puesto que esta plataforma brinda facilidades y seguridad para mostrar la información de manera correcta. En cuanto a las conclusiones, en nuestro estudio al estar en ambientes cerrados no se pudo concluir de igual manera, pero si se pudo notar una variación grande en el punto B por el día, puesto que en las oficinas de la PUCSE hay mucho movimiento y aire acondicionado.

En el estudio de Wen-Tsai Sung y Sung-Jung Hsiao, realizaron una simulación en MATLAB con el uso de un Arduino Uno y un sensor de CO₂, concluyendo que la calidad de los datos en el exterior afectaba a la calidad del aire medida por el sensor, puesto que los datos variaban si la puerta estaba abierta o cerrada. En comparación con nuestro estudio, podemos determinar los mismos resultados, pero con escenarios distintos, puesto que en nuestro estudio se utilizó un escenario real en el que se pudo realizar la quema de plástico y demostrar así cómo afectó la calidad del aire del ambiente, se evidenció que durante este fenómeno en este escenario hubo un incremento del CO₂ y material particulado 2.5.

En cuanto al sistema de sensores de largo alcance inventado por Sujuan Liu, et al. para medir la calidad del aire se evidencia que tienen la precisión de medir químicos y material particulado con gran precisión, aun teniendo baja potencia, al compararlo con nuestro estudio que se conectó el *gateway* a dos puntos uno a 20,32 m al nivel del mar y el otro a una altura de 31,53 m. al nivel del mar se dedujo que los dos puntos captan los datos con precisión al igual que el estudio anterior, a diferencia que se recibieron los datos con más velocidad y menor pérdida de datos en el punto de más altura.

Liang-yu Chen, et al. utilizó equipos parecidos al nuestro, pero utilizando un dron, con datos fehacientes y valores en tiempo real, esto confirma nuestra hipótesis de la investigación realizada debido a que nuestros datos más reales y que se capturan con mayor velocidad y menos pérdida de datos, está en el punto que ubicamos el nodo final a la altura donde funciona la PUCese es decir a 31,53 m al nivel del mar. Se podrían juntar el nodo final propuesto en nuestro estudio con la idea del dron. De manera que en zonas con alturas donde hay interferencias físicas, se podría utilizar un dron para subir el nodo final y evitar interferencias de algún tipo.

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Este proyecto buscó como objetivo general desarrollar un sistema que monitoree la calidad del aire en interiores y exteriores por medio de una red LPWAN a fin de proveer datos que permita la toma de decisiones para prevenir problemas alérgicos respiratorios. Todo este sistema se conectó mediante el uso de la red LoRa a TTN y después esta información se utilizó para la presentación de dashboards de monitoreo en la plataforma ThingSpeak y el almacenamiento de los mismos en una base de datos MySQL local.

El nodo se ubicó en dos puntos denominados Punto A (Juan Montalvo Esmeraldas centro, latitud: 0.969468 y longitud: -79.6547) y Punto B (Pucese, latitud: 0.969965 y longitud: -79.6565). El primero se encuentra en la calle Juan Montalvo Centro de Esmeraldas y el segundo punto se ubicó en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Esmeraldas. El nodo ubicado en los dos puntos se conectó mediante red LoRa a un *gateway* proporcionado por el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Esmeraldas, el cual se encuentra en la Plaza Cívica Nelson Estupiñán Bass. En conclusion, la distancia entre los puntos y el *gateway* no fue un factor determinante, puesto que el punto A se encontraba a 0.62 Km de distancia y el punto B se encontraba a 0.99 Km de distancia. Pero como se pudieron observar en los análisis de los resultados, el punto B que se encuentra más lejos del *gateway* fue el que tuvo mejores resultados en la comunicación, debido a que el factor más determinante fue la altura porque había menos interferencia de obstáculos físicos provocando que hubiera mejor calidad de comunicación y menos pérdidas de datos.

En este estudio se eligieron 4 factores específicos, los cuales se consideraron más determinantes en un cuadro clínico los cuales son: humedad, temperatura, CO₂ y material particulado. Para leer estos parámetros se usaron 3 sensores los cuales representaron a la capa de percepción con la ayuda del microcontrolador Arduino Mega 2560. Para la lectura de la humedad y temperatura se utilizó el sensor DHT22. El sensor CO₂ MG-811 fue el encargado de la lectura de CO₂ en el sistema. Por último, el sensor gP2Y1026AU0F fue el encargado de la lectura del material particulado. Se concluye que los sensores utilizados en este sistema, fueron compatibles con el microcontrolador Arduino Mega 2560 y que tuvieron una buena sinergia al momento de enviar los datos por una red LoRa.

En la capa de aplicación se encuentran 2 plataformas importantes las cuales son The Thing Network y ThingSpeak. La primera es la que se encarga de receptar los datos

enviados por el nodo final y decodificarlos. La segunda plataforma se encarga de mostrar los datos en un dashboard de monitoreo y como complemento esta información es almacenada en una base de datos MySQL local. Asimismo se concluye, que la plataforma ThingSpeak permite la funcionalidad de guardar los datos mostrados en una base de datos local, brindando muchas facilidades al momento de realizar cualquier tipo de acción con esta información.

Como conclusión general, este proyecto logro los objetivos propuestos al inicio del mismo, puesto que se llego a completar el sistema de monitoreo con el envío de la información por medio de una red lora a TTN. Uno de los datos mas relevantes que se pudieron notar en los resultados del proyecto fue la ubicación entre el nodo final y el *gateway*. Porque como se pudo apreciar en los resultados del punto A, este al tener diferentes interferencias físicas (i.e., edificios, casas, autos, etc.) provoca fallas en la comunicación y también provoca pérdida de datos. Por otro lado los resultados del punto B permitieron detectar que al estar ubicado en una posición mas alta la calidad de datos y de comunicación fue mas óptima, puesto que no habia muchas interferencias. Por último, el clima es un factor determinante en este sistema, lo cual se puede presenciar en los resultados del escenario de un clima lluvioso. Durante este escenario también hubo pérdidas de datos y fallos en la comunicación.

5.2. Recomendaciones

Como propuesta a futuro se recomienda añadir un sensor de monóxido de carbono, puesto que según la entrevista, el doctor habla sobre este factor como uno más de los causantes de alergias respiratorias y no se lo pudo añadir al proyecto, por falta de tiempo y capital. En este mismo sentido, otra recomendación sería añadir un sensor que pueda leer material particulado 1.0, porque este proyecto solo se pudo medir el material particulado 2.5.

También se recomienda el uso de una Inteligencia Artificial(IA) para predicciones, toma de decisiones o recomendaciones. Esta IA analizaria los datos almacenados en la base de datos y podría programarse para realizar diferentes acciones.

Como última recomendación sería el aumentar el número de nodos. Debido a que en este proyecto se trabajó con un solo nodo por falta de capital. Sería interesante crear un sistema con multiples nodos que monitoreen al mismo tiempo.

REFERENCIAS

- [1] F. Farshad and C. Krishnendu, *Intelligent Internet of Things From Device to Fog and Cloud*. Springer, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-30367-9_11.
- [2] Arpita Das; Shimul Dey Katha; Muhammad Sheikh Sadi; Ferdib-Al-Islam, "An IoT Enabled Health Monitoring Kit Using Non-Invasive Health Parameters," in *2021 International Conference on Automation, Control and Mechatronics for Industry 4.0 (ACMI)*. doi: 10.1109/ACMI53878.2021.9528227.
- [3] J. Ring, B. Eberlein-Koenig, and H. Behrendt, "Environmental pollution and allergy," *Annals of Allergy, Asthma and Immunology*, vol. 87, no. 6, pp. 2–6, 2001, doi: 10.1016/S1081-1206(10)62332-0.
- [4] J. A. Pacheco Luque, "Contaminantes industriales y salud. incidencia en la salud de los moradores del Barrio 15 de Marzo, de los contaminantes gaseosos, emitidos por la Refinería de Petróleos y Termoesmeraldas, en el periodo 2005 – 2010," Jul. 2011, Accessed: Nov. 30, 2022. [Online]. Available: <https://repositorio.iaen.edu.ec/handle/24000/3806>
- [5] J. A. Díaz Segura, "Relación entre exposición a material particulado y trastornos respiratorios en trabajadores de una planta de prefabricados de concreto," Sep. 2022. Accessed: Nov. 30, 2022. [Online]. Available: <https://tesis.ucsm.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12920/12034>
- [6] L. M. Terán, M. Marie, M. Haselbarth-López, and D. Leonor Quiroz-García, "Alergia, pólenes y medio ambiente," 2009. Accessed: Nov. 15, 2022. [Online]. Available: https://www.anmm.org.mx/GMM/2009/n3/31_vol_145_n3.pdf
- [7] G. D'Amato *et al.*, "Allergenic pollen and pollen allergy in Europe," *Allergy: European Journal of Allergy and Clinical Immunology*, vol. 62, no. 9, pp. 976–990, Sep. 2007. doi: 10.1111/j.1398-9995.2007.01393.x.
- [8] Cedeño Lucas Gerardo Andrés, "Asma Infantil Bajo Exposición A Contaminación Ambiental En El Cantón Esmeraldas," Aug. 2022, Accessed: Nov. 30, 2022. [Online]. Available: <https://repositorio.pucese.edu.ec/handle/123456789/3117>
- [9] labtestsonline, "Inmunoglobulina E (IgE)," May 29, 2022. <https://www.labtestsonline.es/tests/ige> (accessed Nov. 23, 2022).
- [10] Juan del Arco, "Alergias respiratorias," Apr. 2020, Accessed: Nov. 23, 2022. [Online]. Available: <https://www.elfarmaceutico.es/uploads/s1/23/12/ef587-profesion-alergias-respiratorias.pdf>
- [11] G. B. Martín, "Cambio climático y su relación con enfermedades respiratorias," Jun. 2018. Accessed: Nov. 23, 2022. [Online]. Available: <http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/GUILLERMO%20BILBAO%20MARTIN.pdf>
- [12] paho, "La Carga de las Enfermedades Respiratorias Crónicas," 2019. <https://www.paho.org/es/enlace/carga-enfermedades-respiratorias-cronicas> (accessed Dec. 07, 2022).
- [13] M. Cruz, P. Oliete, Morales Christian, González Carlos, Cendón Bruno, and Hernández Alberto, *Las tecnologías IOT dentro de la industria conectada: Internet of things*. Madrid, 2015. Accessed: Jul. 12, 2022. [Online]. Available: <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=ujRaDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA4&dq=iot+que+es&ots=Wgfk5rBNSG&sig=4W45GgTpD49FelJyWi4080lenQM#v=onepage&q=iot%20que%20es&f=false>
- [14] Oswaldo Quiñonez Muñoz, *Internet de las cosas (IoT)*. Ibukku, 2019. Accessed: Aug. 09, 2022. [Online]. Available: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=vnnEDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT2&dq=iot+que+es&ots=oRrvT_knnp&sig=cjWZSDda-lZaKks6pWXHSYg1a-o#v=onepage&q=iot%20que%20es&f=false
- [15] mokosmart, "Tecnología de comunicación inalámbrica de corto alcance frente a tecnología de comunicación inalámbrica de largo alcance." <https://www.mokosmart.com/es/short-range-wireless-communication-technology-vs-long-range-wireless-communication-technology/> (accessed Dec. 07, 2022).
- [16] Sergio Rojas, "Arquitectura empresarial con capas para el Internet de las Cosas | 2ª parte," vs-sistemas. <https://www.vs-sistemas.com/Blog/Actualidad/arquitectura-empresarial-con-capas-para-iot> (accessed Nov. 29, 2022).
- [17] J. P. Tovar Soto, J. D. los S. Solórzano Suárez, A. Badillo Rodríguez, and G. O. Rodríguez Cainaba, "Internet de las cosas aplicado a la agricultura: estado actual," *Lámpsakos*, no. 22, pp. 86–105, Nov. 2019, doi: 10.21501/21454086.3253.

- [18] N. Perez, M. Bustos, M. Berón, and P. Rangel Henriques, “Análisis sistemático de la seguridad en internet of things,” Apr. 2018. Accessed: Nov. 29, 2022. [Online]. Available: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/68387>
- [19] D. Rodríguez González, “Arquitectura y Gestión de la IoT,” *Revista Telem@tica*, vol. 12, no. 3, pp. 49–60, 2013, [Online]. Available: <http://revistatelematica.cujae.edu.cu/index.php/tele>
- [20] B. S. Chaudhari, M. Zennaro, and S. Borkar, “LPWAN technologies: Emerging application characteristics, requirements, and design considerations,” *Future Internet*, vol. 12, no. 3. MDPI AG, Mar. 01, 2020. doi: 10.3390/fi12030046.
- [21] Aprendiendoarduino, “Redes LPWAN,” *aprendiendoarduino.com*, Mar. 05, 2018. <https://www.aprendiendoarduino.com/2018/03/05/redes-lpwan/> (accessed Nov. 30, 2022).
- [22] D. D. Olatinwo, A. Abu-Mahfouz, and G. Hancke, “A survey on LPWAN technologies in WBAN for remote health-care monitoring,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 23. MDPI AG, Dec. 01, 2019. doi: 10.3390/s19235268.
- [23] J. Vega, M. Lagos, G. Salgado, V. Tapia, F. Sánchez, and J. Cosme, “Inventario de máquinas expendedoras usando una LPWAN,” 2017. [Online]. Available: <http://itcelaya.edu.mx/ojs/index.php/pistas>
- [24] R. Hernández, “Despliegue de red LPWAN en entorno industrial con movilidad,” Mar. 2022, Accessed: Nov. 06, 2022. [Online]. Available: <https://riunet.upv.es/handle/10251/181897>
- [25] S. Paiva, S. Lopes, R. Zitouni, N. Gupta, S. F. Lopes, and T. Yonezawa, “Science and Technologies for Smart Cities,” 2020. [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/8197>
- [26] L. GONZALEZ and H. SANCHEZ, “Prototipo para el monitoreo y análisis de la calidad del aire en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez,” Jun. 2019, Accessed: Jul. 11, 2022. [Online]. Available: <http://repositoriodigital.tuxtla.tecnm.mx/xmlui/handle/123456789/784>
- [27] W. T. Sung and S. J. Hsiao, “Building an indoor air quality monitoring system based on the architecture of the Internet of Things,” *EURASIP J Wirel Commun Netw*, vol. 2021, no. 1, Dec. 2021, doi: 10.1186/s13638-021-02030-1.
- [28] L. Sujuan, X. Chuyu, and Z. Zhenzhen, “A low-power real-time air quality monitoring system using LPWAN based on LoRa,” 2016. doi: 10.1109/ICSICT.2016.7998927.
- [29] C. Liang-Yu, H. Hsiao-Shih, W. Cheng-Ju, T. Yi-Ting, and C. Yue Shan, “A LoRa-Based Air Quality Monitor on Unmanned Aerial Vehicle for Smart City,” Jun. 2018. doi: 10.1109/ICSSE.2018.8519967.
- [30] epa.gov, “Conceptos básicos sobre el material particulado,” Jul. 14, 2022. <https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles> (accessed Feb. 12, 2023).
- [31] Arduino, “Arduino MEGA 2560 Rev3.”
- [32] HoperF Electronic, “RFM95 Datasheet.” Accessed: Feb. 12, 2023. [Online]. Available: <http://www.hoperf.com>
- [33] RAK Wireless, “RAK7289V2/RAK7289CV2 WisGate Edge Pro Datasheet Overview Product Features.”
- [34] computerweeklym and TechTarget, “MySQL,” Apr. 2021. <https://www.computerweekly.com/es/definicion/MySQL#:~:text=MySQL%20es%20un%20sistema%20de,incluyendo%20Linux%2C%20UNIX%20y%20Windows.> (accessed Feb. 15, 2023).

ANEXOS

Anexo 1 Entrevista

Entrevistado: Doctor Guillo Chica

¿Cuáles son los síntomas más comunes de una alergia respiratoria?

Lo primero que se presenta es la tos como mecanismo de defensa, luego hay expectoración, fiebre, dolor de cabeza, escalofrío, dolor de espalda y a veces un rash (. i.e. es una erupción dérmica) alérgico en piel.

¿Cuáles son las enfermedades causantes de las alergias respiratorias?

Generalmente son secundarias a enfermedades como contaminación por gases, aerosoles, monóxido de carbono, polen y algunos elementos particulados producto de la polución del ambiente.

¿A su criterio, en qué orden de prioridad los factores son determinantes en cuadros de alergias respiratorias?

- (1) Humedad
- (3) Temperatura
- (4) CO₂
- (2) Material Particulado

¿Qué problemas a largo plazo podrían causar las alergias respiratorias si no son tratadas?

- Enfermedades de los bronquios (bronquitis crónica).
- Enfermedades pulmonares (neumonía, enfisema pulmonar y telangiectasia).

¿Ha atendido casos de pacientes con alergias respiratorias?

Si muchos, existen muchos casos especialmente en esta ciudad que posee un ambiente húmedo.

Anexo 2 Ficha de experimento

Punto A		
Observaciones	SI	NO
El sistema reacción a algún cambio en el ambiente.		
El tiempo que tarda en llegar los datos a la plataforma TTN es menor a 4 minutos.		
Ocurren pérdidas de datos.		
Existe interferencia y falla de comunicación.		

Los datos enviados desde TTN hacia el dashboard de la plataforma ThingSpeak son los mismos.		
---	--	--

Punto B		
Observaciones	SI	NO
El sistema reacción a algún cambien en el ambiente.		
El tiempo que tarda en llegar los datos a la plataforma TTN es menor a 4 minutos.		
Ocurren perdidas de datos.		
Existe interferencia y falla de comunicación.		
Los datos enviados desde TTN hacia el dashboard de la plataforma ThingSpeak son los mismos.		