

**Diseño e Implementación de un Sensor LoRaWAN para
el Monitoreo de Amoniaco (NH₃) en la Producción Avícola**

**Karen Melissa Prada Rodríguez
Ashely Daniela Amaya López**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Electrónica

Director:

Salvador Pacheco

Doctor en Ingeniería Eléctrica

Codirector:

Jaime Guillermo Barrero Pérez

Magíster en Electrónica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2024

Dedicado a nuestras familias y amigos.

Agradecimientos

Primero, quiero agradecer a Dios por permitirme alcanzar este logro. A mis padres, tía y nona, quienes siempre me han brindado su apoyo incondicional. Con su cariño y comprensión, me han impulsado constantemente a perseguir mis metas y a no rendirme frente a las adversidades. A mi mamá, por hacerme la persona que soy hoy en día y por ser mi mayor fuente de motivación. A Oliver, por ser mi compañero fiel y mi apoyo incondicional siempre.

A mis compañeros, gracias por las horas compartidas, los trabajos y las risas. A mis amigos y amigas, gracias por apoyarme, escucharme y darme una voz de aliento cuando más lo necesitaba. Sin ustedes, este camino habría sido mucho más difícil, y me siento afortunada y agradecida por tenerlos en mi vida, pues son mi segunda familia. A mi compañera, quien estuvo a mi lado desde el primer momento en la carrera, gracias, porque a pesar de las dificultades que enfrentamos en este trabajo, lo logramos.

A la universidad, por su apoyo a lo largo de la carrera. A nuestro director y codirector, por su guía y consejos en este proceso.

Finalmente, quiero agradecer a todos aquellos que, de una u otra manera, formaron parte de este proceso, cada uno de ustedes deja una huella en mi corazón.

- Karen Melissa Prada Rodríguez

Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi gratitud a Dios, quien me permitió alcanzar este logro tan significativo en mi vida. Su guía y compañía fueron fundamentales en cada paso de este proceso.

A mi familia, a quienes más amo y con quienes comparto este triunfo, les debo todo lo que soy. Esto es tanto de ustedes como mío, porque sin su apoyo constante, nada de esto habría sido posible. Esto es para ustedes, con todo mi corazón.

A mi querido Spike, mi fiel compañero de desvelos, gracias por estar siempre a mi lado brindándome consuelo y compañía cuando más lo necesitaba.

A mis amigos, con quienes compartí tanto en este proceso, les doy las gracias desde el fondo de mi corazón. Su amistad fue un refugio y una fuente de alegría. Gracias por las enseñanzas, por su acompañamiento durante la época de parciales, por los partidos, las recochas y las salidas de la rutina. Su cariño y su apoyo hicieron este camino más ameno, y cada uno de ustedes dejó su granito de arena en mi corazón el cual quedará para siempre.

A la vida, por permitirme encontrar a mi hermana de otra sangre, mi compañera en cada paso de esta carrera. Fue un honor realizar este trabajo a su lado, y a pesar de los desafíos, logramos juntas nuestro objetivo.

A la Universidad Industrial de Santander, que se convirtió en mi segundo hogar, gracias por cada experiencia, por cada lección. Gracias a los profesores que, con paciencia y dedicación, dejaron en mí su conocimiento y ejemplo. A mi director y codirector de tesis, gracias por su orientación y apoyo en cada momento.

A todos los que fueron parte de este capítulo de mi vida, gracias. Siempre llevaré en mí el recuerdo de cada palabra, cada sonrisa, cada consejo. Recuerden siempre que querer es poder.

- Ashely Daniela Amaya López

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
1 Objetivos	14
1.1 Objetivo General	14
1.2 Objetivos Esecíficos	14
2 Marco de Referencia	15
2.1 Industria avícola nacional	16
3 Marco Teórico	17
3.1 Compuestos nitrogenados	17
3.1.1 <i>Amoniaco</i>	17
3.2 Comunicación	17
3.2.1 <i>LoRa</i>	17
3.2.2 <i>LoRaWAN</i>	17
3.2.3 <i>IoT</i>	18
4 Metodología	20
4.1 Selección de componentes	21
4.1.1 <i>Alimentación</i>	21
4.1.2 <i>Sensor de amoniaco</i>	22
4.1.3 <i>Módulo LoRa</i>	22
4.1.4 <i>Microcontrolador</i>	23
4.2 Sensor MQ-137	24
4.2.1 <i>Hardware</i>	24
4.2.2 Cálculo de resistencia en aire fresco	25
4.2.3 <i>Definición de concentraciones en solución</i>	26
4.2.4 <i>Caracterización del sensor</i>	27
4.3 Diseño	27
4.3.1 <i>Layout</i>	27
4.4 Comunicación	28
4.4.1 <i>Hardware</i>	28
4.4.2 <i>Software</i>	29

4.5 Estructura	32
5 Resultados	34
5.1 Parámetros en las mediciones de amoniaco	34
5.2 Parámetros de la transmisión y recepción de datos	36
6 Conclusiones	38
6.1 Conclusiones	38
6.2 Trabajos futuros	39
Apéndices	45

Lista de Figuras

		Pág.
Figura 1	Arquitectura LoRaWAN.	18
Figura 2	Arquitectura del sistema.	20
Figura 3	Esquemático del sensor con divisor de tensión.	25
Figura 4	Modelo de caja para toma de medidas.	25
Figura 5	R_0 en aire fresco en la terminal de Arduino IDE.	26
Figura 6	Curva de caracterización sensor.	27
Figura 7	Modelo 3D PCB	28
Figura 8	Conexión ESP-WROOM-32 con el módulo LoRa.	29
Figura 9	Decodificación del Payload.	31
Figura 10	Estructura final.	33
Figura 11	Vista superior de la estructura.	33
Figura 12	Montaje final del sistema.	33
Figura 13	Dispersión de datos experimentales en referencia a los teóricos.	46

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1	Requisitos del proyecto. 20
Tabla 2	Consumo componentes principales. 21
Tabla 3	Características batería. 21
Tabla 4	Características regulador. 22
Tabla 5	Comparación sensores de amoniaco. 22
Tabla 6	Comparación módulos LoRa. 23
Tabla 7	Características microcontrolador. 24
Tabla 8	Muestras de amoniaco. 27
Tabla 9	Comparación de bases de datos. 30
Tabla 10	Mediciones de concentración de amoniaco en ppm. 34
Tabla 11	Desviación estándar de las mediciones de concentración de amoniaco. 35
Tabla 12	Sensibilidad en diferentes rangos de concentración de amoniaco. 35
Tabla 13	Errores absolutos promedios por concentración. 36
Tabla 14	Errores relativos promedios por concentración. 36
Tabla 15	Incertidumbre de las mediciones en ppm. 36
Tabla 16	PRR en protoboard y PCB, para intervalos de 30 y 5 minutos. 37
Tabla 17	Resumen de SNR en protoboard y PCB, para intervalos de 30 y 5 minutos. 37
Tabla 18	Resumen de RSSI en protoboard y PCB, para intervalos de 30 y 5 minutos. 37
Tabla 19	Comparación de Concentraciones Teóricas y Experimentales 45

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A	45
Apéndice B	45
Apéndice C	45
Apéndice D	45
Apéndice E	45
Apéndice F	45
Apéndice G	45
Apéndice H	46
Apéndice I	46
Apéndice J	46
Apéndice K	46
Apéndice L	46

Glosario

AppEui: identificador único de aplicación. Sirve para poder separar o clasificar los nodos según la aplicación que va a interactuar con ellos.

AppKey: clave AES 128 secreta que comparten el nodo y la red.

AppSKey: siglas de Application Session Key. Clave necesaria para el cifrado entre el nodo y la aplicación. En resumen, es la que permite al Network Server (o al Gateway cuando asume parte de sus funciones) interpretar y traducir el Payload del mensaje.

DevAddr: dirección del nodo dentro de la red.

DevEui: identificador único que viene de fábrica.

Payload: propiamente el mensaje que se quiere transmitir sin tener en cuenta el resto de la trama que incorpora el protocolo LoRaWAN. Son los datos útiles que requiere la aplicación final del sistema (SCADA, BMS, GMAO, etc.) (Becolve Digital, 2020)

Resumen

Título: Diseño e Implementación de un Sensor LoRaWAN para el Monitoreo de Amoníaco (NH₃) en la Producción Avícola *

Autores: Karen Melissa Prada Rodríguez
Ashely Daniela Amaya López **

Palabras Clave: Amoníaco, Avícola, Monitoreo, LoRaWAN, IoT.

Descripción:

Con el sector avícola como una de las principales fuentes de la economía en Colombia, muchas granjas carecen de tecnologías modernas, lo que genera un control insuficiente en los niveles de amoníaco comprometiendo la salud de los animales y de las personas. Ante esto, se presenta el desarrollo de un sistema de monitoreo para la detección de niveles de amoníaco, utilizando tecnología LoRaWAN. El sistema se basa en un sensor capaz de medir concentraciones de amoníaco en sitio y transmitir los datos a través de una red LoRa hacia una plataforma en la nube para su análisis, visualización y notificación de alarmas. El diseño implementado permite una solución de bajo consumo energético y amplia cobertura, lo que lo hace adecuado para su uso en entornos industriales y avícolas.

Durante el desarrollo, se llevó a cabo la caracterización del sensor y mediciones a diferentes concentraciones, donde se obtuvo una buena fiabilidad, en cuanto a la transmisión de los datos se analizaron parámetros que confirmaron una recepción de datos aceptable.

Con esto se logra ofrecer un producto asequible para las pequeñas y grandes granjas, para mantener regulados los niveles de amoníaco y proteger tanto la producción como la salud y bienestar.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Salvador Pacheco. Doctor en Ingeniería Eléctrica

Abstract

Title: Design and Implementation of a LoRaWAN Sensor for Ammonia (NH₃) Monitoring in Poultry Production *

Authors: Karen Melissa Prada Rodríguez
Ashely Daniela Amaya López **

Keywords: Ammonia, Poultry, Monitoring, LoRaWAN, IoT.

Description:

With the poultry sector being one of the main sources of the economy in Colombia, many farms lack modern technologies, which generates insufficient control of ammonia levels, compromising the health of animals and people. Given this, the development of a monitoring system for the detection of ammonia levels is presented, using LoRaWAN technology. The system is based on a sensor capable of measuring ammonia concentrations in site and transmitting the data through a LoRa network to a cloud platform for analysis, visualization, and alarm notification. The implemented design allows for a low energy consumption and wide coverage solution, making it suitable for use in industrial and poultry environments.

During the development, the sensor was characterized and measurements were made at different concentrations, where good reliability was obtained. Regarding of data transmission, parameters were analyzed to confirmed acceptable data reception.

This provides an affordable product for small and large farms to keep ammonia levels regulated and protect both production and health and well-being.

* BSc Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Advisor: Salvador Pacheco. PhD in Electrical Engineering

Introducción

La producción avícola, es un sector que aporta significativamente a la economía nacional (Gerencia Corporativa de Analítica y Estudios Económicos, 2023), sin embargo presenta un desafío considerable en lo que respecta a la contaminación del aire. Los principales contaminantes atmosféricos que se originan en la avicultura tienen su fuente en la gestión de la pollinaza o gallinaza, compuesta por una mezcla de viruta o cascarilla junto con las excreciones urinarias y fecales de las aves (Seclèn Effio, 2017). La fermentación de estos materiales da como resultado la liberación de niveles significativamente elevados de amoníaco, gas sulfhídrico (cuando los residuos tienen humedad por encima del 80%) y otros compuestos azufrados en las instalaciones avícolas (Federación Nacional de Avicultores de Colombia (FENAVI) y Fondo Nacional Avícola (FONAV), 2014).

En Colombia, en 2019, había aproximadamente 5627 granjas avícolas con 842 millones de aves de engorde y 44.6 millones de aves de postura, las cuales produjeron 7.24 millones de toneladas de pollinaza y 1.5 millones de toneladas de gallinaza, con una significativa liberación de nitrógeno y nitrógeno amoniacal (Bastidas Marin, 2020). Este sector ha experimentado un crecimiento notable, impulsado por mejoras en los procesos productivos y un aumento en la demanda de productos avícolas, aunque el 98% de las granjas en el país siguen siendo de tipo familiar y no tecnificado (Gerencia Corporativa de Analítica y Estudios Económicos, 2023).

La falta de control sobre las emisiones de amoníaco y otros gases pueden afectar la salud tanto de las aves como de los humanos, ya que concentraciones superiores a 25 partes por millón [ppm] en aves (Wang et al., 2023) y 100 [ppm] en humanos (Mohammed-Nour et al., 2019) pueden causar problemas respiratorios e irritación. Por tanto, resulta esencial llevar a cabo un monitoreo continuo para mantener un ambiente adecuado y minimizar los efectos negativos en las comunidades cercanas.

Ante esta situación, se propone una solución asequible para el monitoreo de la calidad del aire en granjas avícolas no tecnificadas en Colombia, mediante la implementación de tecnologías como LoRaWAN y plataformas IoT. A continuación, se presentará la metodología y el diseño del proyecto, subrayando su importancia para mejorar el entorno social y ambiental en el sector avícola.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

- Diseñar e implementar un sensor LoRaWAN integrado a una plataforma IoT y destinado al monitoreo de Amoníaco (NH_3) en instalaciones de galpones de cría de pollo.

1.2. Objetivos Específicos

- Diseñar un sensor de amoníaco de bajo costo y bajo consumo de energía que cumpla con los requisitos de operación en un rango de temperatura de 0 a 50°C y que funcione con baterías.
- Implementar el diseño que comprende el sensor de amoníaco, el microcontrolador propuesto, el módulo LoRa y el gateway LoRaWAN.
- Desarrollar una plataforma de monitoreo y control que permita a los productores avícolas recopilar y analizar datos en tiempo real sobre los niveles de amoníaco en sus instalaciones.
- Configurar el protocolo LoRaWAN por medio de un microcontrolador y módulo LoRa programando los comandos esenciales para habilitar la conectividad con gateway LoRaWAN y la plataforma IoT basada en la nube.
- Establecer un sistema de alerta temprana que notifique a los productores sobre posibles aumentos en los niveles de amoníaco, permitiéndoles tomar medidas preventivas de manera oportuna.

2. Marco de Referencia

El monitoreo de los niveles de amoníaco en la industria avícola es esencial tanto para la salud de las aves y las personas, como para la sostenibilidad del entorno. Varios estudios y proyectos han implementado distintos métodos para medir la concentración de este gas.

Uno de estos trabajos es el de Mónica Ricardo, titulado "Determinación de la producción de amoniaco en galpones de pollo de engorde por medio de un detector de gases portátil" (Jiménez, 2019), realizado en el municipio de Betulia. Este estudio utilizó un detector de gases digital portátil marca RKL, modelo SC-01, para medir la concentración de amoníaco a tres alturas: 10 cm, 25 cm y 150 cm sobre la cama de aves. Se realizaron cuatro mediciones diarias a las 8:00 a.m., 11:00 a.m., 2:00 p.m. y 5:00 p.m., durante 40 días, registrando también las condiciones ambientales mediante un termo-hidrómetro digital. La metodología permitió correlacionar las concentraciones de amoníaco con factores como el peso de las aves y las condiciones ambientales, aportando datos útiles para optimizar la gestión en las granjas avícolas.

Por otro lado, según Ricardo Ibañez, Director de Procesos Especiales en Granjas AVSA Mac Pollo S.A. , en una entrevista realizada el 14 de Mayo de 2024, las granjas de Avidesa MacPollo, líder en producción avícola en Colombia, emplean un método más tradicional basado en cintas colorimétricas que reaccionan al contacto con el amoníaco en el aire, como el PHydrion Test Paper Ammonia de Micro Essential Laboratory. Aunque este método es simple y fácil de usar, presenta limitaciones en cuanto a precisión y carece de un protocolo estandarizado de medición.

En el sector porcino, las fluctuaciones en variables como la temperatura, la humedad y los niveles de amoníaco pueden provocar problemas de salud. En respuesta a esta situación, Marcia Hidalgo y Kevin León propusieron un sistema mecatrónico en Cuenca, Ecuador, que monitorea y controla dichas variables utilizando sensores inalámbricos. Este sistema emplea el sensor de gas MQ-137 para medir los niveles de amoníaco, y la información recopilada se envía a una puerta de enlace que gestiona la climatización a través de un PLC (controlador lógico programable). Además, proporciona datos en tiempo real a través de una interfaz web, lo que contribuye a mejorar el bienestar animal y optimizar la producción (Hidalgo y León, 2021).

2.1. Industria avícola nacional

La industria avícola colombiana es una de las principales actividades agropecuarias del país, contribuyendo significativamente a la producción de alimentos y la economía nacional. Con un crecimiento sostenido del 1.2% en 2023, la producción total de proteína animal, que incluye carne de pollo y huevos, alcanzó las 2.82 millones de toneladas (AviNews, 2023). Este aumento responde a una mayor demanda interna y una creciente tecnificación en los procesos productivos, permitiendo mejorar la eficiencia y reducir costos.

El consumo per cápita de productos avícolas también ha experimentado un incremento notable. En 2023, el consumo de huevos llegó a 323 unidades por habitante, mientras que el consumo de carne de pollo se estabilizó en 36.7 [kg] per cápita. Estos productos se han consolidado como una fuente de proteína fundamental en la dieta de los colombianos debido a su asequibilidad y valor nutricional (AviNews, 2023).

Sin embargo, el rápido crecimiento de la industria avícola también conlleva desafíos ambientales. La producción avícola a gran escala, que concentra el 95% de las aves en solo el 2% de los predios, genera grandes cantidades de residuos que deben ser manejados adecuadamente (Gerencia Corporativa de Analítica y Estudios Económicos, 2023). Estos residuos, particularmente los derivados del nitrógeno presente en la gallinaza y pollinaza, requieren un manejo eficiente para evitar la contaminación del suelo y del agua. Un manejo inadecuado puede contribuir a la liberación de compuestos, que pueden llegar a ser altamente perjudiciales tanto para la salud de las aves como para el medio ambiente (Federación Nacional de Avicultores de Colombia (FENAVI) y Fondo Nacional Avícola (FONAV), 2014).

3. Marco Teórico

3.1. Compuestos nitrogenados

Los compuestos nitrogenados son biomoléculas que contienen nitrógeno y se clasifican en macromoléculas importantes, como ácidos nucleicos y proteínas, y en productos de desecho metabólico. Los precursores de estas macromoléculas son las bases nitrogenadas y los aminoácidos, mientras que otros compuestos relevantes son las porfirinas, presentes en moléculas esenciales como la hemoglobina, mioglobina, citocromos y la catalasa. El catabolismo de los ácidos nucleicos, proteínas y el grupo hemo da lugar a productos de desecho como el ácido úrico, la urea y la bilirrubina, respectivamente. (Ramírez et al., 2015)

3.1.1. Amoníaco El amoníaco es un compuesto químico que consta de un átomo de nitrógeno (N) y tres átomos de hidrógeno (H_3). Se presenta como un gas incoloro y de olor penetrante, y se genera, entre otras fuentes, por la descomposición de la urea en la gallinaza y la pollinaza. Este gas alcalino puede causar irritación en el sistema respiratorio y en los ojos, especialmente cuando se concentra en espacios cerrados (Lumitos AG, s.f.).

3.2. Comunicación

3.2.1. LoRa LoRa (Long Range) es una tecnología de comunicación inalámbrica diseñada precisamente para la conectividad de largo alcance y las comunicaciones de bajo consumo (Kuan, s.f-a). Opera en bandas de frecuencia sin licencia, como 915 MHz en América y 868 MHz en Europa, utilizando modulación basada en espectro ensanchado por Chirp Spread Spectrum (CSS). Esto le permite transmitir pequeñas cantidades de datos de manera eficiente y resistente a interferencias, ofreciendo mayor alcance en comparación con tecnologías como WiFi, Bluetooth o ZigBee (The Things Network, s.f-b). Normalmente, LoRa se utiliza junto con el protocolo de red LoRaWAN (LoRa Wide Area Network), que gestiona la comunicación entre los dispositivos y las pasarelas, permitiendo conexiones seguras y masivas en aplicaciones IoT.

3.2.2. LoRaWAN LoRaWAN significa Long Range Wide Area Network (red de área amplia de largo alcance) (Kuan, s.f-b), es un protocolo basado en la nube que gestiona las comunicaciones en redes de baja potencia y largo alcance (LPWAN). Aunque opera en la capa de control de acceso a medios (MAC), su función principal es actuar como un protocolo de capa de red, facilitando la comunicación entre los dispositivos finales y las puertas de enlace.

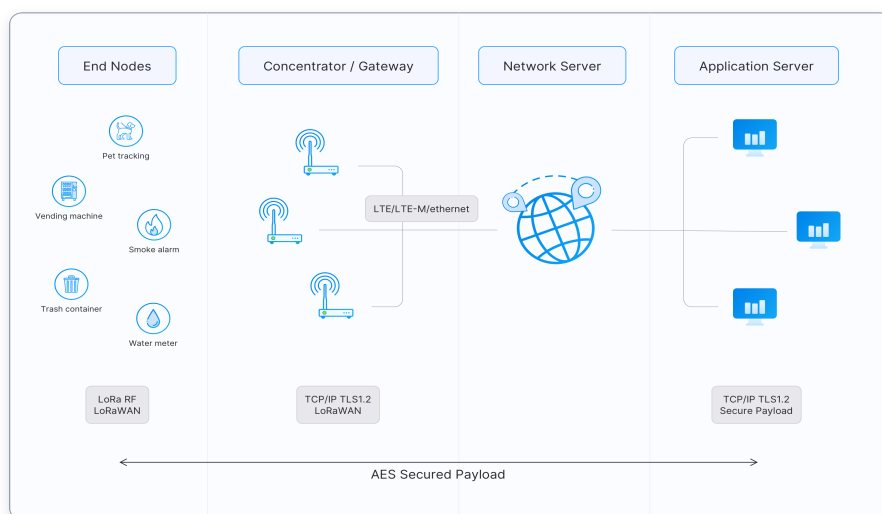
Desarrollado y mantenido por la LoRa Alliance, LoRaWAN define tanto la arquitectura del sistema como el protocolo de comunicación para toda la red. Mientras que LoRa se encarga de la capa física, permitiendo la transmisión de datos a largas distancias, LoRaWAN establece cómo se estructuran y manejan esas comunicaciones, proporcionando una dirección eficaz y la gestión de los datos entre los dispositivos y la infraestructura de la red.

- Arquitectura de una red LoRaWAN

Las redes LoRaWAN operan en una topología de estrella y están compuestas por dispositivos finales, puertas de enlace, un servidor de red, servidores de aplicaciones y un servidor de unión (ver Figura 1). Los dispositivos finales envían y reciben mensajes a través de las puertas de enlace, que los transmiten al servidor de red para su gestión. Las redes LoRaWAN usan un protocolo ALOHA, lo que permite que los mensajes se transmitan a todas las puertas de enlace cercanas sin necesidad de conexión específica. El servidor de red deduplica los mensajes para evitar redundancias (The Things Network, s.f-a).

Figura 1

Arquitectura LoRaWAN.



3.2.3. IoT El término IoT (Internet of Things) se refiere a la red de dispositivos conectados y a la tecnología que permite la comunicación entre ellos y la nube, así como entre los propios dispositivos (Amazon Web Services Inc, s.f). Una vez que los datos llegan a la nube, el software los procesa y determina si es necesario tomar alguna acción, como ajustar sensores o dispositivos, o enviar una alerta, todo sin intervención del usuario. Un sistema IoT completo consta de cuatro elementos clave: sensores o dispositivos, conectividad, procesamiento de datos, y una interfaz de usuario (Kaspersky, s.f).

The Things Network (TTN) The Things Network es un ecosistema colaborativo global enfocado en el Internet de las Cosas (IoT), que desarrolla redes, dispositivos y soluciones basadas en la tecnología LoRaWAN. Se sustenta en The Things Stack, un servidor de red LoRaWAN que constituye un componente esencial para cualquier implementación de LoRaWAN, permitiendo una gestión y transmisión eficaz de datos entre los dispositivos y la nube (Alfaiot-Webmaster, s.f).

ThingSpeak ThingSpeak es un servicio de análisis de IoT que le permite agregar, visualizar y analizar flujos de datos en vivo en la nube. Se utiliza a menudo para la creación de prototipos y pruebas de concepto de sistemas de IoT que requieren análisis. Puede enviar datos desde cualquier dispositivo conectado a Internet directamente a ThingSpeak mediante una API Rest o MQTT. Además, las integraciones de nube a nube con The Things Network, Senet, la puerta de enlace Meshlium de Libelium y Particle.io permiten que los datos de los sensores lleguen a ThingSpeak a través de conexiones celulares LoRaWAN® y 4G/3G (The MathWorks, s.f).

Grafana Cloud Grafana Cloud es una plataforma de observabilidad alojada en la nube totalmente gestionada, ideal para entornos nativos en la nube (Grafana Labs, s.f). Ofrece una solución integrada que combina la visualización de datos mediante paneles interactivos con la unificación de métricas, registros y seguimientos. Al estar basada en la nube, permite gestionar datos en tiempo real de forma centralizada, sin la necesidad de contar con infraestructura local, lo que la convierte en una opción eficiente para organizaciones que buscan escalar fácilmente. La integración entre ThingSpeak y Grafana es simple y muy viable para proyectos de IoT, ya que Grafana se conecta a fuentes de datos a través de APIs REST, compatibles con ThingSpeak. Esta conexión permite aprovechar las capacidades de visualización de Grafana, facilitando la presentación de datos en tiempo real, la creación de alertas y el análisis de información.

4. Metodología

Primero, se realizó la selección de los componentes para la alimentación, así como del sensor, el módulo LoRa y el microcontrolador. Luego, se adecuó el montaje del sensor, incluyendo la definición de concentraciones y su caracterización. Posteriormente, se diseñó una PCB modular para integrar todos los componentes. Con el diseño listo, se configuraron la puerta de enlace y el módulo LoRa, y se realizó la actualización del firmware. Después, se desarrolló el código en Arduino IDE, programando la toma de muestras y la conexión a TTN. Una vez realizada esta integración, se estableció el enlace con la base de datos y se diseñó la interfaz de usuario; en la Tabla 1 se exponen los requisitos del proyecto y en la Figura 2 se muestra la arquitectura del sistema. Finalmente, se elaboró un soporte para la PCB y el sensor, asegurando su acoplamiento adecuado en el galpón para facilitar las mediciones.

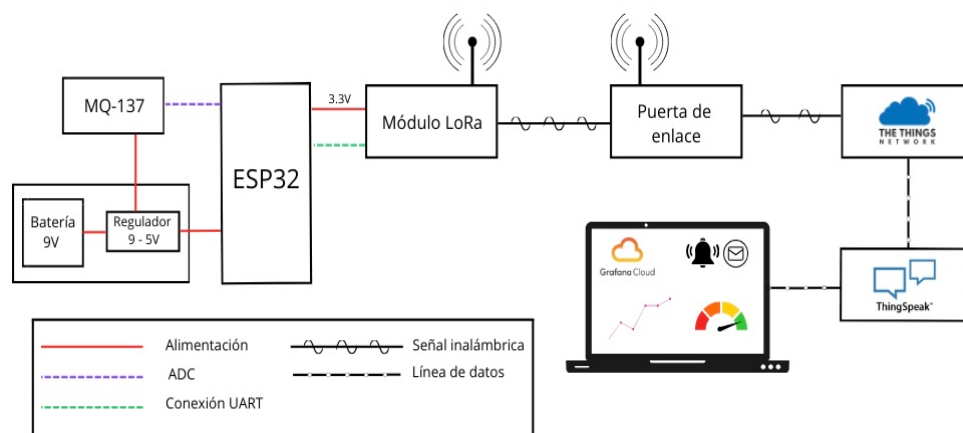
Tabla 1

Requisitos del proyecto.

Especificaciones
• Consumo mensual del sistema: 9800 [mAh] @ 9 [V] • Rango de medición del sensor: 5 a 500 [ppm]. • Rango de temperatura de operación: 0 a 50 °C. • Tiempo de recarga de la batería para el 100%: 1 hora. • Rango de frecuencia: 902 a 928 [MHz] • Rango de cobertura del módulo LoRa: al menos 30 [m]. • Contar con correo electrónico para el registro en las plataformas. • Toma de datos cada 6 horas. • Interfaz de monitoreo de amoniaco y carga de la batería. • Sistema de alarmas preventivas que se activa al superarse los límites de amoniaco (25 ppm para aves o 100 ppm para personas) y/o cuando la carga de la batería baja del 50%.

Figura 2

Arquitectura del sistema.



4.1. Selección de componentes

4.1.1. Alimentación

- Batería

Para la selección de la batería, se calculó el consumo total del sistema considerando únicamente los tres componentes con mayor demanda de corriente, despreciando el aporte de los demás. Basándose en los datos de corriente presentados en la Tabla 2, se realizaron los cálculos teniendo en cuenta que las mediciones se realizan durante un total de cuatro minutos al día, permaneciendo el sistema en modo de bajo consumo el resto del tiempo. Así, se obtuvo un consumo diario de 327 [mAh].

Tabla 2

Consumo componentes principales.

Componente	Modo Activo [mA]	Modo Bajo Consumo [mA]
ESP32-WROOM-32	47	Deepsleep: 6.7
RN2903	Transmisión: 9.88 - Activo: 3	Deepsleep: 0.007
MQ-137	130	6.45

Con base en lo anterior, se seleccionó una super batería recargable de Litio-Ion 18650 con una capacidad de 5600 [mAh] (Electrosena, 2024), sus características se pueden ver en la Tabla 3.

Tabla 3

Características batería.

Referencia	Imagen	Características
Super Batería 9 [V] Litio 18650		- Voltaje máximo: 9.3[V] - Capacidad: 5600 [mAh] - Corriente de descarga: 1C (5600 [mA]) - Voltaje de carga: 5[V]

- Regulador

Para garantizar la correcta polarización tanto del sensor como del microcontrolador, se requiere reducir el voltaje a 5 [V]. Se elige el regulador de baja caída LD1117V50 debido a sus características, presentadas en la Tabla 4, además de su disponibilidad.

Tabla 4*Características regulador.*

Referencia	Imagen	Características
LD1117V50		- Voltaje de entrada máximo: 15 [V] - Voltaje de salida: 5 [V] - Corriente máxima: 950 [mA] - Voltaje de caída máximo: 1.3[V]

4.1.2. Sensor de amoniaco Para elegir el sensor, era fundamental que cumpliera con el rango de medición requerido 1. Aunque el MICS-5914 (Sensortech, 2014) es una opción rentable y de bajo consumo, se descartó porque, a pesar de estar clasificado como sensor de amoníaco, también mide otros gases sin poder diferenciarlos, esto impide garantizar la precisión en un ambiente con gases variados. Por lo tanto, se optó por el MQ-137 (Winsen Electronics Technology Co., 2021), que cumple con los requisitos y es mucho más económico en comparación con el ZE03-NH3 (Winsen Electronics Technology Co., 2018), como se observa en la Tabla 5.

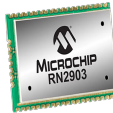
Tabla 5*Comparación sensores de amoniaco.*

Referencia	Imagen	Características
MICS-5914		- Voltaje de operación: 4.9 a 5.1 [V] - Corriente: 30 [mA] - Rango de detección: 1 a 300 [ppm] - Precio: \$ 75.137 COP
ZE03-NH3		- Voltaje de operación: 4.9 a 5.1 [V] - Corriente: 5 [mA] - Rango de detección: 0 a 100 [ppm] - Precio: \$ 604.158 COP
Módulo MQ-137		- Voltaje de operación: 4.9 a 5.1 [V] - Corriente: 150 [mA] - Rango de detección: 5 a 500 [ppm] - Precio: \$ 107.035 COP

4.1.3. Módulo LoRa El módulo LoRa RN2903 (Microchip Technology Inc., 2021), en comparación con otros módulos, como el RAK4200 (RAKwireless Technology Limited, 2020) y el STM32WLE5JCI6TR (STMicroelectronics, 2020), ofrece una serie de ventajas para la integración con los demás componentes, las cuales se muestran en la Tabla 6. Su interfaz de comunicación UART facilita la implementación sin añadir complejidad innecesaria al diseño del sistema. Además, el bajo consumo de energía en 'Modo Sleep' es crucial para garantizar la sostenibilidad energética del proyecto, dado que se requieren periodos de inactividad

prolongados entre las mediciones. Al ser ajustable la potencia de transmisión, se asegura una transmisión de datos fiable a través de LoRa, cubriendo las necesidades sin exceder los límites de consumo energético. Es importante destacar que, aunque el STM32WLE5JCI6TR ofrece ventajas en términos de precio y consumo, necesita componentes adicionales para su correcto funcionamiento. Por esta razón, y debido a la disponibilidad previa, se optó por utilizar el RN2903.

Tabla 6
Comparación módulos LoRa.

Referencia	Imagen	Características
RAK4200		- Rango de frecuencia: 863–870 [MHz] / 902–928 [MHz]. - Rango de operación: Cobertura de hasta 15 [km] en áreas suburbanas y de hasta 5 [km] en áreas urbanas. - Interfaz de comunicación: UART, SPI, I2C. - Potencia de transmisión: -4[dBm] a [19dBm]. - Transmisión: 120 [mA] (en PA_BOOST) y Sleep: 1.5 [μA]. - Protocolo : LoRaWAN 1.0.2 - Precio: \$ 67.000 COP
RN2903		- Rango de frecuencia: 902 a 928 [MHz]. - Rango de operación: Cobertura de hasta 15 [km] en áreas suburbanas y de hasta 5 [km] en áreas urbanas. - Interfaz de comunicación: UART. - Potencia de transmisión: 3[dBm] a 18.5[dBm]. - Transmisión: 120 [mA] y Sleep: 0.0013 [mA] - Protocolo: LoRaWAN Clase A - Precio: \$ 70.000 COP
STM32WLE5JCI6TR		- Rango de frecuencia: 150 a 960 [MHz]. - Rango de transmisión de larga distancia a 10[km] (valor ideal en área abierta). - Interfaz de comunicación: LPUART, USART/UART, I2C, SPI. - Potencia de transmisión • Alta potencia programable hasta +22 [dBm]. • Baja potencia programable hasta +15 [dBm]. - Transmisión: 15 [mA] a 10 [dBm]. 87 [mA] a 20 [dB] y Sleep: 31 [nA]. - Protocolo: LoRaWAN® v1.0 - Precio: \$ 38.500 COP

4.1.4. Microcontrolador La primera opción evaluada para el microcontrolador fue la Raspberry Pi Pico. Durante las pruebas de los modos de bajo consumo en MicroPython y Raspberry Pi, se observó que el 'Modo Dormant', presenta el menor consumo en comparación con otros modos de suspensión, requería de un impulso externo para reactivar el programa (Jorquera, 2023). Aunque el 'Modo DeepSleep' no presentaba esta limitación, estaba restringido a un tiempo máximo de suspensión de 1 hora.

Por estas razones, se decidió cambiar el microcontrolador y optar por el módulo ESP32-WROOM-32 (Espressif Systems, 2023), el cual tiene un doble núcleo que proporciona un rendimiento adecuado para procesar eficientemente las muestras de amoníaco. Su memoria SRAM es suficiente para gestionar tanto la captura de datos como su transmisión. Dispone de varias interfaces de comunicación, en particular UART, que facilita la conexión con el módulo LoRa. Los pines ADC permiten conectar el sensor de amoníaco para leer valores analógicos,

y sus pines GPIO programables garantizan flexibilidad en el control del sistema, incluyendo modos de bajo consumo para maximizar la duración de la batería (ver Tabla 7).

Tabla 7

Características microcontrolador.

Referencia	Imagen	Características
Módulo ESP32-WROOM-32		- Microprocesador: Xtensa® Dual-Core 32-bit LX6. - SRAM: 520 KB. - Flash/SRAM QSPI: Hasta 4 x 16 MBytes. - Alimentación: 3.3 a 5 V. - Interfaces de Comunicación: 3 × UART, 4 × SPI, 2 × I2C. - Oscilador de cristal: 32 kHz. - Regulador a 3.3 V. - 25 Entradas/Salidas digitales. - 15 ADC de 12 bits. - Compatible con Arduino IDE.

4.2. Sensor MQ-137

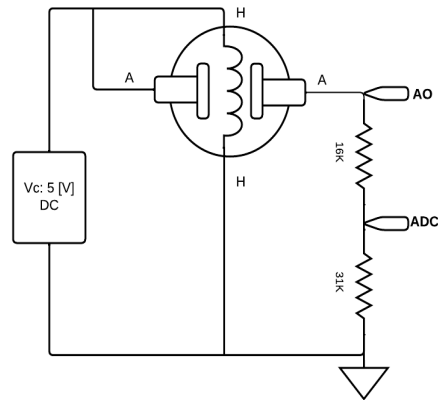
El MQ-137 es un sensor basado en semiconductores, diseñado para detectar amoníaco, que ajusta su resistencia interna (R_S) al entrar en contacto con este gas. Su funcionamiento se basa en un calentador interno, que eleva la temperatura del sensor para mejorar su sensibilidad y facilitar la reacción con el amoníaco, generando así cambios en la resistencia. El calentador requiere un suministro de 5 [V], y el sensor necesita una resistencia de carga (R_L) para formar un divisor de tensión, permitiendo que el microcontrolador lea la señal.

Para facilitar el montaje y manejo del sensor, se empleó el módulo MQ-137, el cual cuenta con una salida digital y una analógica. La salida digital es invertida, entregando un valor de 1 cuando no se detecta gas y de 0 cuando está presente. En cuanto a la salida analógica, ofrece una señal continua que permite medir distintos niveles de concentración de gas, siendo esta la elegida para este proyecto (Naylamp Mechatronics, 2023).

4.2.1. Hardware Dado que el módulo se alimenta con 5 [V], se emplea un divisor de tensión para asegurar que la salida analógica se mantenga en el rango aceptado por el microcontrolador de 0 a 3.3 [V] (ver Figura 3). El valor de R_L recomendado en la hoja de datos es de 47[kΩ]. Para diseñar el divisor de tensión, se usaron resistencias de 16[kΩ] y 31[kΩ], asegurando que la resistencia de carga (R_L) y el divisor operen correctamente.

Figura 3

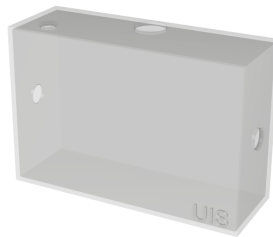
Esquemático del sensor con divisor de tensión.



4.2.2. Cálculo de resistencia en aire fresco Se construyó una cámara de acrílico inspirada en un modelo de caja de calibración (Kruakuanphet et al., 2022), como se muestra en la Figura 4.

Figura 4

Modelo de caja para toma de medidas.



Con base en la hoja de datos, se derivó la siguiente ecuación (Raj, 2018) para calcular R_S , donde V_C es el voltaje de alimentación, R_L es de $47[\text{k}\Omega]$, y V_{RL} es el voltaje analógico del sensor:

$$R_S = \left(\frac{V_C}{V_{RL}} - 1 \right) \cdot R_L \quad (1)$$

A partir de esta ecuación, se determinó que el valor de R_0 es aproximadamente $30[\text{k}\Omega]$ como se observa en la figura 5, utilizando la relación $R_S/R_0 = 3.6$. El sensor se precalentó durante 6 horas para estabilizar sus valores.

Figura 5*R₀ en aire fresco en la terminal de Arduino IDE.*

```

16:16:23.150 -> Rs = 101.86
16:16:23.150 -> Ro at fresh air = 28.29
16:16:23.182 -> -----
16:16:24.235 -> Rs = 101.85
16:16:24.235 -> Ro at fresh air = 28.29
16:16:24.265 -> -----
16:16:25.316 -> Rs = 101.85
16:16:25.347 -> Ro at fresh air = 28.29
16:16:25.347 -> -----
16:16:26.401 -> Rs = 101.85
16:16:26.434 -> Ro at fresh air = 28.29
16:16:26.434 -> -----
16:16:27.483 -> Rs = 101.85
16:16:27.516 -> Ro at fresh air = 28.29
16:16:27.516 -> -----

```

4.2.3. Definición de concentraciones en solución Para determinar la concentración de amoníaco en fase gaseosa en función de su concentración en solución acuosa, se utilizaron datos de un experimento realizado en la Universidad de Illinois (Wilson, 2007). En este experimento, se midieron las presiones parciales de amoníaco sobre soluciones acuosas de amoníaco en función de su porcentaje molar a diferentes temperaturas. Se analizaron estos datos específicamente a 80 [°F] (26.6 [°C]), correspondiente a la temperatura promedio en Bucaramanga, y considerando una presión atmosférica de aproximadamente 1 [atm] tanto en Chicago (Tabla de Mareas, 2024) como en Bucaramanga (The Tomorrow Companies Inc., 2024). Con estos datos y aplicando la ecuación de gases ideales 2, se obtuvieron los valores de concentración de amoníaco en fase gaseosa (ver (Apéndice A, s.f)).

$$PV = nRT \quad (2)$$

Dado que el mínimo porcentaje de concentración molar de amoníaco en solución es del 5%, que corresponde aproximadamente a 42300 [ppm] en fase gaseosa, se determinó la ecuación de la curva para obtener la concentración de amoníaco en solución necesaria para realizar las pruebas, teniendo en cuenta el rango de medición del sensor.

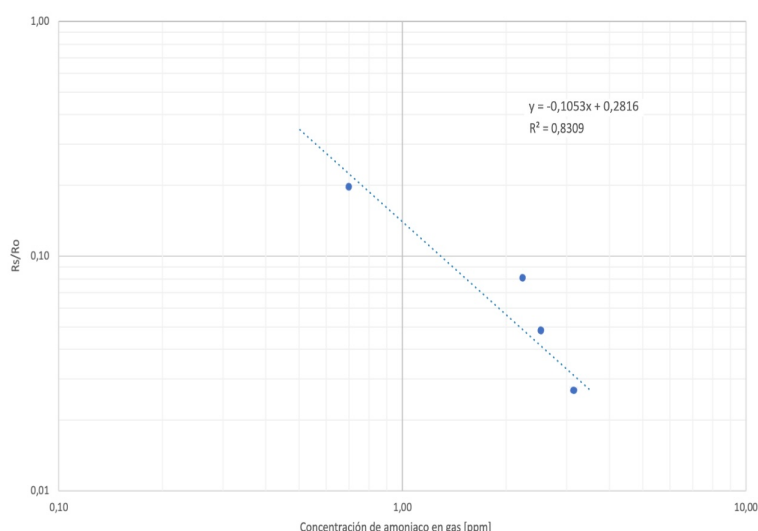
Usando la fórmula de dilución 3 y considerando que se empleará una solución de hidróxido de amonio al 30% (equivalente en molaridad a 15.87 [M]), se observan diferencias mínimas entre las concentraciones al expresarlas en volumen. Dado que no se contaba con instrumentos para medir estas concentraciones con suficiente precisión, se decidió iniciar con la concentración más baja de 189 [μL] en una solución acuosa de 100 [mL] y añadir 0.55 [μL] de amoníaco en tres incrementos, obteniendo así cuatro muestras de amoníaco (ver Tabla 8).

$$C_1 * V_1 = C_2 * V_2 \quad (3)$$

Tabla 8*Muestras de amoniaco.*

% Concentración	Amoniaco en gas [ppm]	Amoniaco en solución [mL]
3.008344	4.99063	0.189561
3.017072	172.00741	0.190111
3.025801	338.87320	0.190661
3.034529	505.54994	0.191211

4.2.4. Caracterización del sensor Se realizaron mediciones para cada muestra con el fin de obtener el $ratio = R_S/R_0$, estas se realizaron a 25.2[°C] y humedad del 69%. La relación entre la concentración de gas y el ratio sigue una curva exponencial; al representarla en una escala logarítmica, esta relación se vuelve lineal, lo que facilita el ajuste de la curva. A partir de este ajuste, se obtuvieron los valores de la pendiente (m) y la intersección (b) como se muestra en la Figura 6.

Figura 6*Curva de caracterización sensor.*

Estos parámetros permiten calcular la concentración en partes por millón de amoniaco en fase gaseosa, empleando la siguiente ecuación:

$$PPM = 10^{\left(\frac{\log(\text{ratio}) - b}{m}\right)} \quad (4)$$

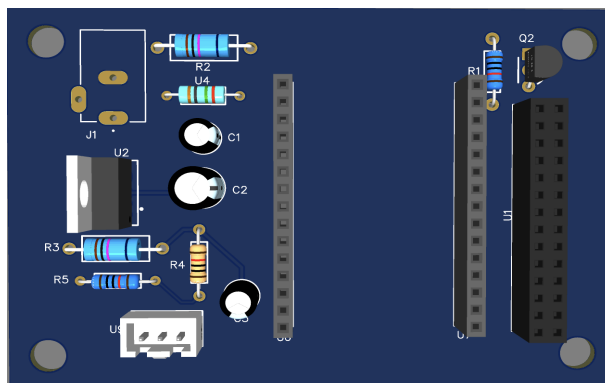
4.3. Diseño

4.3.1. Layout Se diseñó una PCB (Printed Circuit Board) de dos capas, con un plano de tierra en la capa inferior. El microcontrolador se ubicó en el centro, con los demás componentes distribuidos alrededor de él. Se utilizaron pistas de 0.254 [mm], mientras que para las conexiones seriales, la salida analógica y potencia se emplearon pistas de 0.4 [mm], para

asegurar mayor estabilidad y robustez en el envío de datos. Para la entrada al pin analógico del microcontrolador, se utilizó un capacitor de 100 [nF] (Espressif Systems, 2020), dado que la ESP32 es sensible al ruido. El diseño final tuvo un tamaño de 86.23 mm x 60.45 mm. En la Figura 7 se muestra el modelo 3D del diseño, realizado en EasyEDA.

Figura 7

Modelo 3D PCB .



4.4. Comunicación

4.4.1. Hardware

Puerta de enlace (gateway) Se eligió el RAK7246G por su costo accesible, compatibilidad con LoRaWAN, bajo consumo energético y la disponibilidad previa del dispositivo. Es importante destacar que, aunque existe abundante información sobre este dispositivo, no siempre es fácil de encontrar, lo que requiere una búsqueda más dirigida. Sin embargo, la configuración del RAK7246G sigue siendo intuitiva al seguir los tutoriales disponibles, lo que lo convierte en una excelente opción para desarrolladores que buscan flexibilidad en sus proyectos (RAK-wireless Technology Limited, 2022). Adicionalmente, gracias a su capacidad para conectarse a la nube, el RAK7246G permite una integración eficiente entre dispositivos LoRa y redes en la nube, facilitando la gestión y transmisión de datos de manera sencilla y confiable.

LoRa El RN2903, previamente descrito, está integrado en la tarjeta PICTail™/PICTail Plus Daughter Board (Microchip Technology Inc., 2015b), la cual se utilizó principalmente por su disponibilidad. Para asegurar el funcionamiento de los protocolos LoRaWAN y la conectividad a la red LoRa, fue necesario instalar el firmware correspondiente. Se eligió la versión 1.03, que es comúnmente utilizada en la comunidad, y el proceso se realizó siguiendo un instructivo.

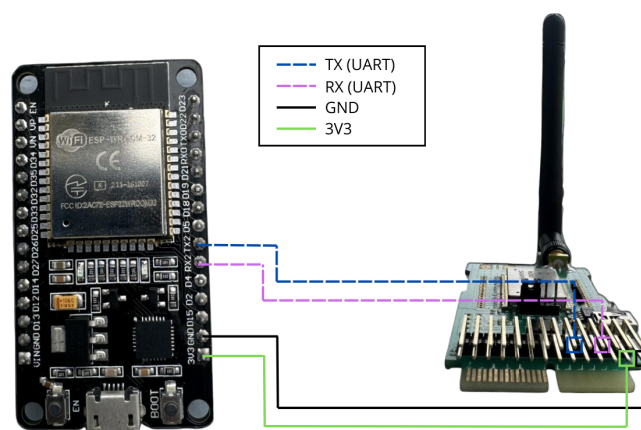
Una vez finalizada la instalación, se llevaron a cabo pruebas de comunicación utilizando los comandos AT básicos, según lo indicado en el manual del RN2903 ((Microchip Technology Inc., 2015a)), a través del software Tera Term. En cuanto al consumo energético

del dispositivo, se observó que tiene un impacto notable durante la transmisión de datos. Dado que este módulo permite la configuración de diversos niveles de potencia de transmisión para optimizar el consumo, se realizaron pruebas a distancias de 0, 10, 20 y 30 metros, evaluando todo el rango de valores especificados en la hoja de datos. Como resultado de estas pruebas (ver (Apéndice B, s.f)), se concluyó que el nivel de potencia de transmisión que ofreció el mejor rendimiento fue el valor 8, correspondiente a una potencia de salida de 9 [dBm].

Finalmente, es importante señalar que las pruebas se realizaron estableciendo la conexión USB entre el PC y la ESP-WROOM-32, la cual también estaba conectada a la tarjeta LoRa como lo muestra la Figura 8 . Esta, a su vez, se enlazó a la puerta de enlace.

Figura 8

Conexión ESP-WROOM-32 con el módulo LoRa.



4.4.2. Software

Registro y almacenamiento de datos en la nube Para la implementación del software, se evaluaron varias plataformas. Inicialmente, se eligió The Things Network (TTN) por su practicidad para conectar la puerta de enlace. Sin embargo, la versión gratuita de TTN tiene limitaciones, ya que permite cargar y visualizar los datos en la red, pero no ofrece opciones de almacenamiento. Esto hizo necesario buscar una plataforma complementaria para almacenar los datos en la nube e integrarla con una herramienta de visualización. Tras evaluar diferentes opciones, se decidió comparar dos plataformas para este propósito (véase Tabla 9):

Tabla 9*Comparación de bases de datos.*

Características	AWS	ThingSpeak
Facilidad de uso	Requiere conocimientos avanzados y puede ser complejo para nuevos usuarios.	Entorno sencillo y fácil para principiantes.
Costo	Modelo de precios escalonado; inicialmente gratis pero hay cargos elevados sin notificación.	Plan gratuito disponible con opciones de pago más asequibles.
Escalabilidad	Alta; adecuada para proyectos de IoT a gran escala con múltiples servicios y funciones avanzadas.	Moderada; adecuada para proyectos más pequeños o medianos.
Almacenamiento de datos	Ofrece almacenamiento en la nube para grandes volúmenes de datos, pero aplica cargos si se superan los límites de la versión gratuita, sin advertencias previas.	Permite enviar hasta 3 millones de datos a la nube, aproximadamente 8000 diarios, y acceder a ellos mediante la descarga de un archivo CSV desde la plataforma.

Después de evaluar todas las características, se optó por ThingSpeak, ya que resulta más asequible, considerando las limitaciones presupuestarias del proyecto. Además, los servicios que proporciona cubren adecuadamente los requerimientos del proyecto sin necesidad de funciones avanzadas.

Programación del Microcontrolador El código fue desarrollado en el entorno de Arduino IDE (ver (Apéndice C, s.f)) , utilizando dos bibliotecas: HardwareSerial y Math. Se declararon funciones para verificar el funcionamiento de la conexión UART del módulo LoRa y su integración con The Things Network (TTN) a través de comandos específicos.

Posteriormente, se implementó la captura de datos del sensor, en la que se recopilaban 30 muestras en un intervalo de un minuto. Se calculó el promedio de estas muestras y se leyó el porcentaje de carga de la batería. Los datos obtenidos fueron combinados y convertidos a formato hexadecimal para su transmisión mediante LoRa.

La alimentación del módulo LoRa y del sensor se controla a través del GPIO 23, garantizando que estos componentes se apaguen antes de que el microcontrolador entre en modo de bajo consumo. Al reactivarse, se logra el reinicio del programa. Para permitir periodos de bajo consumo de hasta 6 horas, se utilizó el sufijo ULL (unsigned long long) en las variables, lo que ayuda a evitar desbordamientos en los cálculos. Además, se realizó la conversión de tiempo de segundos a microsegundos.

Enlace del gateway y el módulo LoRa a TTN Para establecer la conexión entre el dispositivo LoRa y el gateway, se comienza creando una cuenta en The Things Network (TTN)

y seleccionando el clúster de Norteamérica, acorde al rango de frecuencias utilizado. A continuación, se configura el gateway extrayendo la tarjeta SD y siguiendo el manual correspondiente (RAKwireless Technology, s.f), lo que permite obtener el EUI o ID del gateway para su registro en TTN.

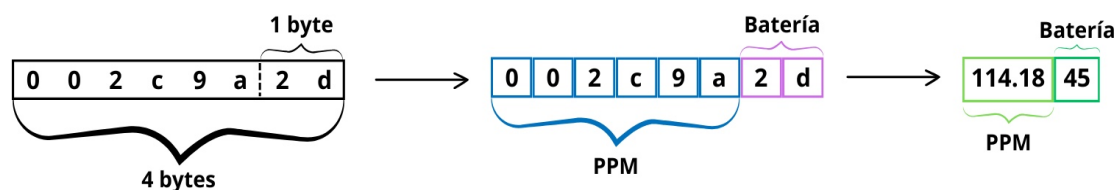
Una vez registrado el gateway en TTN con su ID y la frecuencia de 902-928 MHz, se procede a registrar el dispositivo LoRa como "End device". Se crea una aplicación y se asocia el dispositivo, eligiendo la misma frecuencia del gateway y la versión del firmware instalada. Las credenciales del dispositivo, como AppEUI y DevEUI, se obtienen mediante comandos AT y se ingresan junto con una AppKey generada en TTN. Finalmente, se configura el payload del mensaje para garantizar que los datos recibidos sean procesados correctamente por TTN y se visualicen adecuadamente.

- Payload

El programa desarrollado para la configuración del payload se encuentra en el Apéndice H ((Apéndice D, s.f)). Este programa fue implementado en The Things Network (TTN), ya que éste es el encargado de recibir los datos provenientes del módulo LoRa en formato hexadecimal y convertirlos a decimal. Una vez obtenida la cadena en formato hexadecimal, el valor de ppm es dividido entre 100 para su visualización en la plataforma, mientras que el porcentaje de la batería se muestra tal como es recibido, sin modificaciones (ver Figura 9).

Figura 9

Decodificación del Payload.



Enlace con ThingSpeak Para conectar The Things Network (TTN) con ThingSpeak, se inicia creando una cuenta en ThingSpeak y configurando un canal para recibir datos de TTN. Es esencial anotar el ID del canal y el Write API Key, ya que estos datos vinculan ambas plataformas. Luego, en TTN, se integra el webhook de ThingSpeak ingresando las credenciales obtenidas. Por último, se adapta una parte del payload para que se facilite la recepción de los datos y la visualización en ThingSpeak.

Enlace con Grafana Cloud Para enlazar ThingSpeak con Grafana, primero se debe crear una cuenta en Grafana Cloud y configurar dos paneles de control: uno para los niveles de

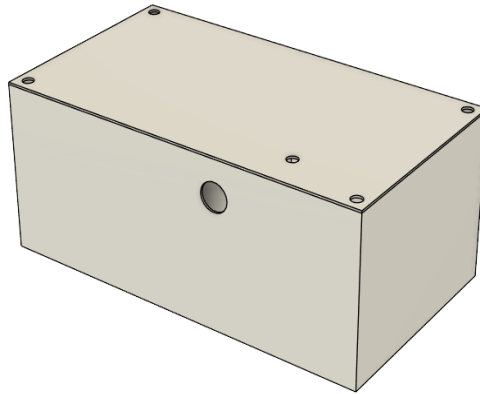
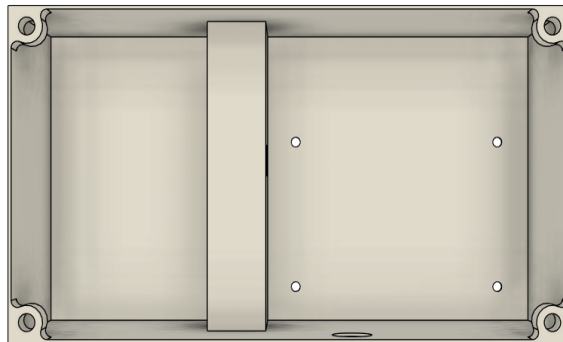
partes por millón [ppm] y otro para el estado de la batería. Luego, se agrega la conexión con la fuente de datos de Infinity, que permite a Grafana leer datos de ThingSpeak en formato JSON. Una vez establecida la conexión, se regresa a los paneles de control. En ambos, al configurar las consultas, es necesario ingresar el enlace proporcionado por ThingSpeak, que permite acceder a la lectura del canal completo. A partir de ahí, se extrae la información específica que se desea mostrar en cada panel: los niveles de ppm en uno y los datos de la batería en el otro. Este proceso permite una visualización efectiva de los datos, facilitando el análisis y el monitoreo en tiempo real.

- Configuración de alarma

Para la configuración de las alarmas, se definieron dos umbrales en el panel de control del amoniaco: uno para alertar sobre una concentración superior a 25 ppm en el caso de los pollos, y otro para los seres humanos, fijado en 100 ppm. Además, se programó una alarma en el panel de la batería que se activa cuando el nivel de carga cae por debajo del 50% . Estas alarmas están programadas para evaluar la información cada hora, con el objetivo de detectar cualquier superación o descenso de los límites establecidos. Si se registra un exceso o una disminución, se enviará un aviso al usuario del sistema a través de correo electrónico, lo que le permitirá estar al tanto de la situación y tomar medidas oportunas para corregir el problema (véase (Apéndice E, s.f)). Posteriormente, se podrá ajustar el funcionamiento de las alarmas según sea necesario.

4.5. Estructura

Para la estructura, se diseñó una caja con los espacios necesarios para cada componente. Se planificaron los orificios necesarios para la salida de la cúpula del sensor y la antena del módulo LoRa, asegurando su correcta disposición. Además, se incluyeron orificios específicos para fijar la PCB, que fueron considerados desde su diseño. Adicionalmente, se previeron orificios para facilitar la remoción y sujeción de la tapa. En la Figura 10 se muestran los orificios correspondientes al sensor y al módulo LoRa, y en la Figura 11 se puede observar la estructura desde una vista superior (sin la tapa) donde se aprecian los espacios destinados a la PCB y la batería.

Figura 10*Estructura final.***Figura 11***Vista superior de la estructura.*

Finalmente, en la Figura 12 se muestra el montaje final del proyecto, y en la lista de componentes (ver (Apéndice L, s.f)) se detallan los precios de todos los elementos usados.

Figura 12*Montaje final del sistema.*

5. Resultados

5.1. Parámetros en las mediciones de amoniaco

Se llevaron a cabo 12 mediciones para cada una de las 4 concentraciones de amoniaco especificadas en la Tabla 7 (ver (Apéndice F, s.f)); éstas fueron realizadas bajo las mismas condiciones ambientales, las cuales fueron tomadas por un termohigrómetro, que registró una temperatura de 23.6 °C y una humedad del 66 % . Las concentraciones se incrementaron desde 189 [μ L] en pasos de 55 [μ L], hasta alcanzar 191 [μ L]. A partir de estas mediciones, se calcularon parámetros clave en MATLAB (ver (Apéndice G, s.f) como la media, error absoluto y relativo, precisión, repetitividad, sensibilidad, así como la incertidumbre (Mapro Ingeniería, s.f).

1. Media

La media de las mediciones representa el valor promedio de cada conjunto de datos y se calcula como (5):

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (5)$$

Donde n es el número de mediciones y x_i cada valor individual. Las medias obtenidas fueron las siguientes (ver Tabla 10):

Tabla 10

Mediciones de concentración de amoniaco en ppm.

	5 [ppm]	172 [ppm]	338 [ppm]	505 [ppm]
$\bar{x}$	5.995	191.2592	361.9992	532.6908

2. Desviación Estándar (Precisión)

La precisión se evalúa mediante la desviación estándar, que mide la dispersión de los datos en torno a la media. Se calcula usando la fórmula (6):

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

Donde s es la desviación estándar muestral. Los resultados fueron los siguientes (ver Tabla 11):

3. Repetitividad

Tabla 11*Desviación estándar de las mediciones de concentración de amoniaco.*

	5 [ppm]	172 [ppm]	338 [ppm]	505 [ppm]
s	0.1733	3.0416	9.3034	15.0567

La repetitividad refleja la consistencia de las mediciones bajo las mismas condiciones experimentales. Aunque no se calcula directamente, se utiliza la desviación estándar para aproximar la repetitividad, ya que esta refleja la variabilidad de las mediciones respecto a la media. Las gráficas que muestran la dispersión de los datos pueden consultarse en el Apéndice H ((Apéndice H, s.f)). Las desviaciones estándar, al representar un porcentaje pequeño del valor medio, sugieren que las mediciones son consistentes.

4. Sensibilidad

La sensibilidad del sensor indica la relación entre el cambio en la señal de salida y el cambio en la concentración de amoniaco. Se calcula de la siguiente manera (7):

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta C} \quad (7)$$

Donde ΔV es el cambio en la señal del sensor y ΔC es el cambio en la concentración. Los valores obtenidos fueron (ver Tabla 12):

Tabla 12*Sensibilidad en diferentes rangos de concentración de amoniaco.*

	5 - 172 [ppm]	172 - 338 [ppm]	338 - 505 [ppm]
S	1.1094	1.0286	1.0221

Finalmente se obtuvo la sensibilidad general, 1.053 unidades del sensor por ppm.

5. Error Absoluto

El error absoluto se define como la diferencia entre el valor promedio medido y el valor real esperado. La fórmula es (8):

$$\epsilon_a = \bar{x} - x_v \quad (8)$$

Los resultados específicos de cada conjunto de datos se encuentran en el Apéndice I ((Apéndice I, s.f)). Se halló el error absoluto promedio para cada concentración, los resultados se presentan en la Tabla 13:

6. Error Relativo

Tabla 13*Errores absolutos promedios por concentración.*

	5 ppm	172 ppm	338 ppm	505 ppm
$\varepsilon_{a\text{prom}}$	0.1367	2.2325	6.6126	11.6144

El error relativo se expresa como el porcentaje del error absoluto respecto al valor real.

Se calcula con 9:

$$\epsilon_r = \frac{\bar{x} - x_v}{x_v} \times 100\% \quad (9)$$

Los valores obtenidos se encuentran en el Apéndice J ((Apéndice J, s.f)). En la Tabla 14 se muestra el error relativo promedio para cada concentración:

Tabla 14*Errores relativos promedios por concentración.*

	5 [ppm]	172 [ppm]	338 [ppm]	505 [ppm]
$\varepsilon_{r\text{prom}}$	2.2797	1.1673	1.8267	2.1803

7. Incertidumbre estándar (tipo A)

La incertidumbre estándar se calcula dividiendo la desviación estándar entre la raíz cuadrada del número de mediciones como lo muestra la ecuación 10:

$$U = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (10)$$

Los valores de incertidumbre calculados fueron (ver Tabla 15):

Tabla 15*Incertidumbre de las mediciones en ppm.*

	5 [ppm]	172 [ppm]	338 [ppm]	505 [ppm]
U	0.0500	0.8780	2.6857	4.3465

5.2. Parámetros de la transmisión y recepción de datos

Con base en las pruebas realizadas para determinar la potencia de transmisión óptima del módulo LoRa, se encontró que, de las cuatro distancias evaluadas, a 10 metros se obtenía la mejor recepción de datos. Por ello, se realizaron cuatro pruebas de envío de 15 mensajes: dos en protoboard y dos en PCB, con intervalos de deep sleep de 5 minutos y 30 minutos, manteniendo siempre 10 metros de distancia sin obstáculos entre el módulo LoRa y la puerta de enlace (ver (Apéndice K, s.f)). También se dejó por defecto un factor de dispersión (SF)

10 que aunque ocupa más tiempo en el aire en comparación con un SF7 es más robusto en cuanto a interferencias y alcanzará mayores distancias, también se tuvo un ancho de banda de 125 [kHz].

A partir de los resultados obtenidos, se calculó la Tasa de Recepción de Paquetes (PRR) empleando la ecuación 11, en la tabla 16.

$$PRR = \left(\frac{\#paquetesrecibidos}{\#paquetesenviados} \right) \times 100 \quad (11)$$

Tabla 16

PRR en protoboard y PCB, para intervalos de 30 y 5 minutos.

Montaje	Intervalo de Tiempo	Paquetes Recibidos	PRR (%)
Protoboard	30 minutos	8	53.33
	5 minutos	5	33.33
PCB	30 minutos	11	73.33
	5 minutos	6	40

Adicionalmente, cada mensaje recibido en TTN incluye información sobre el SNR y el RSSI. En las Tablas 17 y 18 se muestran los valores promedio, así como los máximos y mínimos de SNR y RSSI obtenidos en cada intervalo de deep sleep.

Tabla 17

Resumen de SNR en protoboard y PCB, para intervalos de 30 y 5 minutos.

Montaje	Intervalo de Tiempo	Promedio SNR [dB]	Mínimo SNR [dB]	Máximo SNR [dB]
Protoboard	30 minutos	7.79	-14	13
	5 minutos	-0.42	-15.8	10.2
PCB	30 minutos	9.39	6.8	12
	5 minutos	-0.017	-11.8	12

Tabla 18

Resumen de RSSI en protoboard y PCB, para intervalos de 30 y 5 minutos.

Montaje	Intervalo de Tiempo	Promedio RSSI [dBm]	Mínimo RSSI [dBm]	Máximo RSSI [dBm]
Protoboard	30 minutos	-56	-118	-45
	5 minutos	-76.8	-119	-48
PCB	30 minutos	-47.45	-60	-38
	5 minutos	-78	-119	-36

6. Conclusiones

6.1. Conclusiones

Para la selección de la batería, se consideraron los datos obtenidos en las pruebas de bajo consumo realizadas con la Raspberry Pi Pico. Sin embargo, al cambiar de microcontrolador, se observó que los valores de consumo medidos con la Raspberry Pi Pico eran menores en comparación con los de la ESP-WROOM-32. Como consecuencia, la duración estimada de la batería se redujo a aproximadamente 17 días, en lugar del mes inicialmente previsto. A pesar de este ajuste, se logró mantener el consumo energético dentro de parámetros aceptables, garantizando así un funcionamiento eficiente del sistema.

Se comprobó el correcto funcionamiento de las notificaciones preventivas de las alarmas luego de que se excedieran de los límites establecidos para las concentraciones de amoníaco, además de que se incluyó una alarma para avisar si el porcentaje de batería desciende a tal punto de que necesite ser recargada, esto también es comunicado a través del correo electrónico.

Las mediciones de amoníaco muestran que los valores promedio están cercanos a los de referencia, confirmando la buena correspondencia del sensor con la concentración real. La baja desviación estándar en todas las concentraciones indica alta precisión y consistencia en las mediciones, lo que refuerza la fiabilidad del sensor. La sensibilidad del sensor, con un promedio de 1.053 unidades por ppm, sugiere una respuesta adecuada a los cambios de concentración de amoníaco. Aunque hubo pequeñas variaciones entre los rangos, pero estas fueron mínimas y el comportamiento se mantiene predecible. Los errores absolutos y relativos son bajos, con un error relativo promedio entre 1.16% y 2.28% lo que indica una medición precisa. La incertidumbre también fue baja, con 0.0500 para 5 ppm y 4.3465 para 505 ppm, en este caso se puede decir que se presenta más precisión al medir bajas concentraciones. Dado que las mediciones se realizaron en condiciones controladas (23.6 °C y 66% de humedad), se concluye que el sensor es confiable para su uso en entornos similares. A pesar de que no se realizó una calibración al sensor, los resultados mostrados en el análisis de los datos obtenidos en la caracterización fueron bastante aceptables.

Los resultados presentados en la tabla indican que el uso de PCB en lugar de Proto-board mejora significativamente la Tasa de Recepción de Paquetes (PRR) en ambas condiciones de tiempo evaluadas. En intervalos de 30 minutos, la PRR fue del 73.33% en la PCB frente al 53.33% en el Protoboard, mientras que en intervalos de 5 minutos, la PRR también

fue superior en la PCB (40%) en comparación con el Protoboard (33.33%). Este patrón sugiere que la PCB ofrece una mayor estabilidad y fiabilidad en la recepción de datos. Además, se observa que la reducción del intervalo de tiempo impacta negativamente en la PRR en ambos montajes, lo que implica que la transmisión de datos en periodos más cortos podría estar sujeta a más pérdidas de información.

El análisis de la relación señal/ruido (SNR) y la intensidad de señal recibida (RSSI) en los montajes de protoboard y PCB muestra que, a intervalos de 30 minutos, el montaje en PCB presenta un SNR promedio de 9.39 [dB] y un RSSI de -47.45 [dBm]. Estos valores sugieren una calidad de señal aceptable; sin embargo, para lograr una comunicación efectiva, el SNR debería superar idealmente los 10 [dB] y el RSSI mantenerse por encima de -50 [dBm]. Por otro lado, en ambos montajes, el SNR fue negativo en intervalos de 5 minutos, indicando una calidad de señal deficiente, aunque el RSSI se mantuvo en niveles relativamente buenos. Además, se observó que los intervalos de muestreo afectan la estabilidad de los resultados, revelando que periodos de 30 minutos ofrecen un rendimiento más consistente que los de 5 minutos.

En conclusión, se comprobó el correcto funcionamiento de las notificaciones preventivas de alarmas por exceso de concentraciones de amoníaco y batería baja, con avisos también por correo electrónico. El sensor demostró consistencia con valores de medición cercanos a los de referencia y una baja desviación estándar. La sensibilidad del sensor es adecuada, con errores e incertidumbre bajos, lo que garantiza la fiabilidad del sistema en condiciones controladas. Además, se concluye que al implementar el montaje en PCB y en intervalos de sueño más largos mejoran la estabilidad de la transmisión y la calidad de la señal, manteniendo una recepción más confiable.

6.2. Trabajos futuros

- Para incrementar la duración de la alimentación del sistema, se sugiere, según el presupuesto disponible, evaluar la posibilidad de adquirir una batería de mayor capacidad. Alternativamente, se puede considerar reemplazar la tarjeta PICtail™/PICtail Plus Daughter Board por solo el módulo RN2903 con el fin de reducir los costos finales del sistema.
- Se sugiere elegir un microcontrolador con arquitectura ARM o el modelo ESP-WROOM-32D, ya que ambos permiten la implementación de un modo "DeepSleep" con un consumo menor que el del modelo usado, lo que permite una gestión energética más eficiente.

MONITOREO DE AMONIACO EN LA PRODUCCIÓN AVÍCOLA

- Para optimizar la fiabilidad de las mediciones del sensor, se recomienda llevar a cabo un proceso de calibración. Además, durante la caracterización del sensor una vez calibrado, es recomendable tomar un número significativo de muestras a lo largo de todo su rango de medición. Esto permitirá evaluar el comportamiento del sensor en diferentes condiciones operativas, identificar posibles desviaciones y ajustar los parámetros de medición para obtener resultados más precisos y confiables.
- Se recomienda realizar una caracterización más detallada sobre los comandos del módulo LoRa para así mejorar la tasa de recepción de paquetes dentro de la red LoRaWAN.
- Una mejora adicional al sistema sería la incorporación de sensores de humedad y temperatura, dado que estas variables tienen un impacto directo en la medición del amoníaco. Monitorear estas condiciones ambientales permitiría un análisis más completo del comportamiento del amoníaco.
- Para su uso en campo, se podría modificar la estructura del dispositivo para añadir un soporte que permita fijarlo a superficies como columnas, evitando el contacto del sensor con partículas sólidas como tierra. Además, sería útil integrar un domo protector para resguardarlo de condiciones ambientales adversas, como lluvia o vientos fuertes.

Referencias Bibliográficas

- Alfaiot-Webmaster. (s.f). The things network (ttn), una red iot global para la sociedad. <https://alfaiot.com/iot/the-things-network-ttn-una-red-iot-global-para-la-sociedad/>
- Amazon Web Services Inc, A. (s.f). ¿qué es iot? - explicación del internet de las cosas - aws. <https://aws.amazon.com/es/what-is/iot/>
- Apéndice A, A. (s.f).
- Apéndice B, B. (s.f).
- Apéndice C, C. (s.f).
- Apéndice D, D. (s.f).
- Apéndice E, E. (s.f).
- Apéndice F, F. (s.f).
- Apéndice G, G. (s.f).
- Apéndice H, H. (s.f).
- Apéndice I, I. (s.f).
- Apéndice J, J. (s.f).
- Apéndice K, K. (s.f).
- Apéndice L, L. (s.f).
- AviNews. (2023). Avicultura colombiana registra un crecimiento sostenido de 1,2% en el 2023. <https://avinews.com/avicultura-colombiana-registra-un-crecimiento-sostenido-de-12-en-el-2023/>
- Bastidas Marin, J. (2020). Estimación de las emisiones de amoníaco en galpones avícolas, usando un modelo neuronal artificial. *Universidad Nacional de Colombia*.
- Becolve Digital, B. (2020). Glosario de la tecnología lorawan. <https://becolve.com/blog/glosario-de-la-tecnologia-lorawan/>
- Electrosena. (2024). Super batería 9v litio 18650 5600ma con cargador. <https://www.electrosena.com/super-bateria-9v-litio-cargador-alta-eficiencia-2800ma>
- Espressif Systems, E. (2020). Analog to digital converter - esp32 - esp-idf programming guide v4.2.3 documentation. <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/v4.2.3/esp32/api-reference/peripherals/%09adc.html>
- Espressif Systems, E. (2023). Esp32wroom32 datasheet. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf
- Federacion Nacional de Avicultores de Colombia (FENAVI) y Fondo Nacional Avícola (FONAV), F. (2014). *Guía ambiental para el subsector avícola*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

- Gerencia Corporativa de Analítica y Estudios Económicos. (2023). *Análisis de producto: Sector avícola* (Informe analítico). Bolsa Mercantil de Colombia. https://www.bolsamercantil.com.co/sites/default/files/2024-05/Informe_sector_avicola_final.pdf
- Grafana Labs, G. (s.f). Grafana cloud — observability platform overview. <https://grafana.com/products/cloud/>
- Hidalgo y León, M. K. (2021). Diseño e implementación de un sistema mecatrónico para el control y monitoreo de temperatura, humedad y amoniaco en la sala de recría porcina de la empresa italimentos cia. ltda. ubicado en santa rosa. *Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana*. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21449>
- Jiménez, M. R. (2019). *Determinación de la producción de amoniaco en galpones de pollo de engorde por medio de un detector de gases portátil* [Trabajo de grado de pregrado]. Universidad de Sucre. <https://repositorio.unisucra.edu.co/handle/001/1037>
- Jorquera, T. (2023). Github - workaround for low power support in micropython for the raspberry pico. <https://github.com/tomjorquera/pico-micropython-lowpower-workaround>
- Kaspersky. (s.f). ¿qué es la internet de las cosas (iot) y qué son los dispositivos de iot? <https://acortar.link/JqCfwq>
- Kruakuanphet, A., Phongwisit, P., Yindeesuk, W., Kamoldilok, S., & Srinuanjan, K. (2022). Multi-range ammonia gas sensor control and monitor via iot system. *2022 26th International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC)*, 182–185. <https://doi.org/10.1109/ICSEC56337.2022.10049351>
- Kuan, F. (s.f-a). What is lora technology and how it works – an in-depth guide. <https://www.mokosmart.com/lora-technology/>
- Kuan, F. (s.f-b). What is lorawan technology and how does it works. <https://www.mokosmart.com/lorawan-technology/>
- Lumitos AG, A. (s.f). Amoniaco. <https://www.quimica.es/enciclopedia/Amon%C3%ADaco.html>
- Mapro Ingenieria, S. (s.f). Conceptos básicos para la valoración de un dispositivo de medida. <https://maprosensor.com/pubimg/files/Conceptos%20clave%20dispositivos%20medida.pdf>
- Microchip Technology Inc., M. (2015a). Rn2903 lora® technology module command reference user's guide. <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/40001811A.pdf>
- Microchip Technology Inc., M. (2015b). Rn2903 lora™ technology pictail™/pictail plus daughter board user's guide. <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/OTH/ProductDocuments/UserGuides/50002424A.pdf>
- Microchip Technology Inc., M. (2021). Low-power long range lora® technology transceiver module. <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/WSG/>

- ProductDocuments/DataSheets/RN2903-Low-Power-Long-Range-LoRa-Technology-Transceiver-Module-DS50002390K.pdf
- Mohammed-Nour, A., Al-Sewailem, M., & El-Naggar, A. H. (2019). The influence of alkalization and temperature on ammonia recovery from cow manure and the chemical properties of the effluents. *Sustainability*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/su11082441>
- Naylamp Mechatronics, N. (2023). Tutorial sensores de gas mq2, mq3, mq7 y mq135. https://naylampmechatronics.com/blog/42_tutorial-sensores-de-gas-mq2-mq3-mq7-y-mq135.html
- Raj, A. (2018). Interfacing mq137 sensor with arduino to measure ammonia in ppm. <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/arduino-mq137-ammonia-sensor>
- RAKwireless Technology, L. (s.f). Rak7246g quick start guide — rakwireless documentation center. <https://docs.rakwireless.com/Product-Categories/WisGate/RAK7246G/Quickstart/#configuring-the-gateway>
- RAKwireless Technology Limited, R. (2020). Rak4200 wisduo lpwan module datasheet overview. <https://dl-docs.rakwireless.com/api/render/?emulateScreenMedia=false&pdf.format=legal&url=https%3A%2F%2Fdocs.rakwireless.com%2FProduct-Categories%2FWisDuo%2FRAK4200-Module%2FDatasheet%2F>
- RAKwireless Technology Limited, R. (2022). Rak7246g wisgate developer d0 — rakwireless documentation center. <https://docs.rakwireless.com/Product-Categories/WisGate/RAK7246G/Overview/#product-background>
- Ramírez, I. N. L., Mejía, M. R. R., Márquez, B. T. M., Alvarado, L. J. F., & Enríquez, S. S. (2015). Metabolismo de compuestos nitrogenados. In *Manual de prácticas de laboratorio de bioquímica, 3e*. McGraw-Hill Education. accessmedicina.mhmedical.com/content.aspx?aid=1117646988
- Seclèn Effio, O. (2017). Impactos residuales avícolas en el ambiente. https://www.engormix.com/avicultura/manejo-efluentes-residuos-avicolas/impactos-residuales-avicolas-ambiente_a40936/
- Sensortech, A. S. (2014). Datasheet mics-5914. https://www.sgxsensortech.com/content/uploads/2014/07/1108_Datasheet-MiCS-5914.pdf
- STMicroelectronics. (2020). Datasheet tstm32wle5jci6tr. <https://co.mouser.com/datasheet/2/389/stm32wle5c8-1903151.pdf>
- Tabla de Mareas, T. (2024). Presión atmosférica en chicago con indicador de tendencia. <https://tablademareas.com/gt/suchitepequez/chicago/prevision/presion-atmosferica>
- The MathWorks, I. (s.f). Thingspeak - matlab & simulink. <https://la.mathworks.com/products/thingspeak.html>

The Things Network, T. (s.f-a). Lorawan architecture. <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/architecture/>

The Things Network, T. (s.f-b). What is lora technology and how it works - an in-depth guide. <https://www.mokosmart.com/lora-technology/>

The Tomorrow Companies Inc., T. (2024). El tiempo en bucaramanga, departamento de santander, colombia — tomorrow.io. <https://weather.tomorrow.io/es/CO/SAN/Bucaramanga/020603/>

Wang, K., Shen, D., Dai, P., & Li, C. (2023). Particulate matter in poultry house on poultry respiratory disease: A systematic review. *Poultry Science*, 102(4), 102556. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.102556>

Wilson, T. A. (2007). *The total and partial vapor pressures of aqueous ammonia solutions*. University of Illinois.

Winsen Electronics Technology Co., W. (2018). User's manual v2.5 model:ze03). https://www.winsen-sensor.com/d/files/ze03-electrochemical-module-manualv2_5.pdf

Winsen Electronics Technology Co., W. (2021). Ammonia gas sensor(model:mq137). <https://www.winsen-sensor.com/d/files/manual/mq137.pdf>

Apéndices

Apéndice A

Caracterización y pruebas del sensor

Apéndice B

Pruebas de potencia

Apéndice C

Código general del proyecto

Apéndice D

Código Payload

Apéndice E

Funcionamiento de alarma en Grafana Cloud

Apéndice F

Tabla 19

Comparación de Concentraciones Teóricas y Experimentales

Concentraciones Teóricas	Concentraciones Experimentales											
5 [ppm]	6.16	6.25	6.22	6.02	6.14	5.92	5.72	5.93	6.00	5.81	5.99	5.78
172 [ppm]	192.81	192.38	193.86	196.75	190.44	188.56	190.47	191.10	193.65	191.50	188.66	184.93
338 [ppm]	384.36	363.95	364.75	368.11	356.21	351.83	364.41	364.09	348.28	364.00	354.35	359.65
505 [ppm]	519.44	558.08	524.40	530.42	517.25	541.53	520.40	524.21	526.94	536.58	528.78	564.26

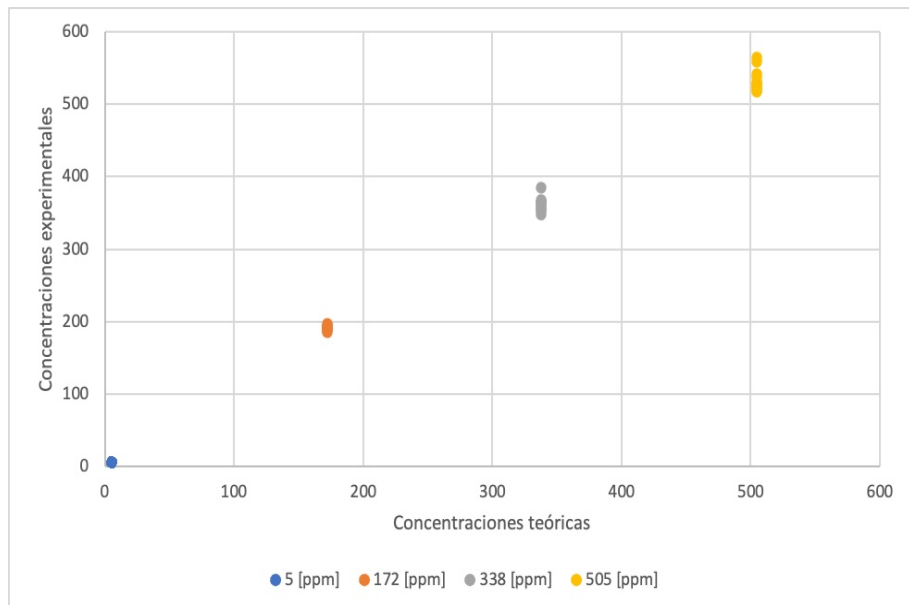
Apéndice G

Características de mediciones

Apéndice H

Figura 13

Dispersión de datos experimentales en referencia a los teóricos.



Apéndice I

Matriz de error absoluto

Apéndice J

Matriz de error relativo

Apéndice K

Pruebas de transmisión

Apéndice L

Lista de materiales