

Universidad Católica de Santa María
Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales
Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica



Diseño e implementación de equipo portátil detector de gases (H₂S, CH₄, CO y O₂) con geolocalización, mediante un sistema automático de control de emergencias utilizando tecnología de modulación LoRa basado en IoT

Tesis presentada por el Bachiller:

Ramos Arias, Dennis Angel

ORCID: 0009-0004-3309-7950

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Electrónico con Especialidad en
Automatización y Control

Asesor:

Dr. Sulla Torres, Raul Ricardo

ORCID: 0000-0002-4435-3575

Arequipa – Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA
INGENIERIA ELECTRONICA
CON ESPECIALIDAD EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL
TITULACIÓN CON TESIS
DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 07 de Octubre del 2025

Dictamen: 008012-C-EPIE-2025

Visto el borrador del expediente 008012, presentado por:

2015223491 - RAMOS ARIAS DENNIS ANGEL

Titulado:

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE EQUIPO PORTÁTIL DETECTOR DE GASES (H₂S, CH₄, CO Y O₂)
CON GEOLOCALIZACIÓN, MEDIANTE UN SISTEMA AUTOMÁTICO DE CONTROL DE
EMERGENCIAS UTILIZANDO TECNOLOGÍA DE MODULACIÓN LORA BASADO EN IOT**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Titulo Profesional/Titulo de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

**INGENIERO ELECTRONICO CON ESPECIALIDAD EN
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**29267682 - RODRIGUEZ GONZALES PEDRO ALEX
DICTAMINADOR**



**29715414 - COAGUILA GOMEZ RONALD PERCING
DICTAMINADOR**



**29329443 - VALDIVIESO HERRERA DIANA ISABEL
DICTAMINADOR**



Diseño e implementación de equipo portátil detector de gases (H2S, CH4, CO y O2) con geolocalización, mediante un sistema automático de control de emergencias utilizando tecnología de modulación LoR

INFORME DE ORIGINALIDAD

16%	16%	4%	7%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	forum.arduino.cc Fuente de Internet	1 %
2	es.winsen-sensor.com Fuente de Internet	1 %
3	www.coursehero.com Fuente de Internet	1 %
4	hdl.handle.net Fuente de Internet	1 %
5	dspace.ups.edu.ec Fuente de Internet	1 %
6	repository.udistrital.edu.co Fuente de Internet	<1 %
7	repository.unab.edu.co Fuente de Internet	<1 %
8	repositorio.utn.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
9	tesis.unsm.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
10	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	<1 %
11	dspace.esPOCH.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
12	Submitted to Universitas Brawijaya Trabajo del estudiante	<1 %
13	es.slideshare.net Fuente de Internet	<1 %

DEDICATORIA

“A Dios, mi guía espiritual, quien con infinita sabiduría me ha brindado la fuerza y la resiliencia necesarias para culminar este sueño. Tu amor incondicional ha sido mi faro en los momentos más oscuros, y tu presencia constante, mi mayor consuelo. A ti, Padre Celestial, dedico con profundo agradecimiento este trabajo.

A mi madre, Modesta, quien es amable y trabajadora, y que con su amor incondicional me ha enseñado el valor de la perseverancia y la dedicación. A mi padre, Angel, cuyo recuerdo me llena de fortaleza y me inspira a seguir adelante. A mi hermano Renzo, mi cómplice y confidente, quien siempre ha creído en mí. Y a mi querido hermano Luigi, cuya ausencia siento profundamente, pero cuya memoria vive en mi corazón.

Ustedes, mi familia, han sido mi roca en la que siempre he podido apoyarme. Sus palabras de aliento, sus abrazos reconfortantes y su apoyo incondicional han sido fundamentales en este largo camino. Gracias por ser mi familia, por amarme tal como soy y por celebrar conmigo cada uno de mis logros.

Este trabajo es un homenaje a todos ustedes, un testimonio de su amor y de la huella imborrable que han dejado en mi vida. Los llevo siempre en mi corazón y espero que sientan este trabajo como propio”

AGRADECIMIENTOS

A mis seres queridos, cuyo amor incondicional ha sido mi faro en esta travesía, mi más profundo agradecimiento. Sus palabras de aliento, sus abrazos reconfortantes y su fe inquebrantable en mí me han impulsado a seguir adelante, incluso en los momentos más desafiantes. A cada una de las personas que, con una simple palabra de motivación, me recordaron mi propósito y me inspiraron a no rendirme, mi gratitud es eterna.

Creo firmemente que Dios puso en sus labios las palabras exactas que necesitaba escuchar en cada momento crucial de este proceso. Sus mensajes, aunque a veces breves, han resonado profundamente en mi alma y me han fortalecido. Hoy, al finalizar este capítulo de mi vida, siento una inmensa alegría y un profundo agradecimiento por haber tenido a su lado a personas tan especiales.

Esta tesis es el fruto de nuestro esfuerzo conjunto. Sus contribuciones, grandes o pequeñas, han sido fundamentales para que este sueño se hiciera realidad. Cada palabra escrita, cada idea compartida, cada gesto de apoyo ha dejado una huella imborrable en este trabajo.

Estoy convencido de que los logros más grandes se alcanzan cuando contamos con el apoyo de quienes nos quieren. Y ustedes, mis queridos amigos y familiares, han sido mi mayor apoyo. ¡Gracias por creer en mí!

RESUMEN

El proyecto aborda el diseño e implementación de un equipo portátil para la detección de gases peligrosos (H_2S , CH_4 , CO y O_2) con geolocalización, orientado a mejorar la seguridad en entornos industriales, particularmente en la minería. El equipo integra tecnología de modulación LoRa basada en IoT para la transmisión de datos a largas distancias, permitiendo la gestión eficiente de emergencias mediante un sistema automatizado. El principal objetivo fue desarrollar un sistema que permita la monitorización continua y en tiempo real de la concentración de gases y su ubicación, ofreciendo alertas inmediatas en caso de niveles peligrosos. La metodología incluyó el desarrollo de un circuito transmisor para la detección de gases y geolocalización, así como un circuito receptor para procesar y visualizar los datos en la estación base. Se realizaron pruebas en entornos controlados para validar la precisión de los sensores y la eficacia de la transmisión de datos. Los resultados muestran que el equipo es capaz de detectar con precisión concentraciones peligrosas de gases y alertar al personal de manera eficiente. En conclusión, el sistema portátil de detección de gases propuesto representa una solución para la industria minera, contribuyendo a reducir el riesgo de accidentes relacionados con la exposición a gases peligrosos. Además, el uso de la tecnología LoRa garantiza una comunicación eficiente a larga distancia, facilitando la respuesta rápida ante emergencias. Este desarrollo no solo mejora la seguridad laboral, sino que también optimiza la gestión de riesgos en entornos industriales.

Palabras Clave: Detección de gases, geolocalización, tecnología LoRa.

ABSTRACT

The project addresses the design and implementation of a portable equipment for the detection of hazardous gases (H₂S, CH₄, CO and O₂) with geolocation, aimed at improving safety in industrial environments, particularly in mining. The equipment integrates LoRa modulation technology based on IoT for data transmission over long distances, enabling efficient emergency management through an automated system. The main objective was to develop a system that allows continuous, real-time monitoring of gas concentration and location, providing immediate alerts in case of hazardous levels. The methodology included the development of a transmitter circuit for gas detection and geolocation, as well as a receiver circuit to process and display the data at the base station. Tests were conducted in controlled environments to validate the accuracy of the sensors and the efficiency of data transmission. The results show that the equipment is capable of accurately detecting hazardous gas concentrations and alerting personnel in an efficient manner. In conclusion, the proposed portable gas detection system represents an innovative solution for the mining industry, helping to reduce the risk of accidents related to exposure to hazardous gases. In addition, the use of LoRa technology ensures efficient long-distance communication, facilitating rapid emergency response. This development not only improves occupational safety, but also optimizes risk management in industrial environments.

Keywords: Gas detection, geolocation, LoRa technology.

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN..... 1

CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO 2

1.1. Identificación del problema 2

1.2. Descripción del problema 3

1.3. Alcances de la investigación..... 5

1.4. Objetivos..... 6

1.4.1. Objetivo general 6

1.4.2. Objetivos específicos 6

1.5. Antecedentes de la investigación..... 7

1.6. Técnicas e instrumentos 9

1.6.1. Revisión bibliográfica..... 9

1.6.2. Investigación de campo 9

1.6.3. Análisis de datos 9

1.7. Campo de verificación..... 9

1.7.1. Ubicación espacial..... 9

1.7.2. Ubicación temporal 10

1.7.3. Unidad de estudio 10

1.8. Estrategia 11

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO 12

2.1. Bases teóricas 12

2.1.1. Química de los gases 12

2.1.2. Tecnología de los sensores de gases..... 17

2.1.3. Geolocalización 21

2.1.4.	IoT (Internet de las cosas)	23
2.1.5.	Redes LPWAN	23
2.1.6.	Tecnología de Modulación LoRa (de “largo alcance”)	23
2.1.7.	Ventaja de tecnología de modulación LoRa frente a otras tecnologías..	27
2.1.8.	The Things Network (TTN)	29
2.1.9.	API.....	30
2.1.10.	AWS IoT para LoRaWAN	30
2.1.11.	Industria 4.0	31
2.1.12.	Automatización y mejora del proceso	31
2.1.13.	Esquema conceptual	33
CAPÍTULO III DESARROLLO DE INGENIERÍA		34
3.1.	Diseño del Sistema	34
3.1.1.	Arquitectura General del Sistema.....	34
3.1.2.	Diseño del Hardware	35
3.1.3.	Diseño del Software	47
3.2.	Selección de Componentes.....	49
3.2.1.	Comparativa de unidades de control	49
3.2.2.	Comparativa de módulos de comunicación.....	50
3.2.3.	Componentes adicionales del sistema	51
3.2.4.	Resumen de selecciones por equipo	51
3.3.	Proceso de la fabricación de tarjetas.....	52
3.4.	Sistema de geolocalización.....	56
3.4.1.	Inicialización de los componentes	56
3.4.2.	Lectura de los sensores de gases.....	57
3.4.3.	Conversión a valores de concentración	57
3.4.4.	Obtención de la ubicación GPS	59
3.4.5.	Transmisión de datos a la estación base	59

3.4.6. Implementación del algoritmo de control de emergencias	60
CAPÍTULO IV RESULTADOS	64
4.1. Interfaz de usuario	64
4.2. Pruebas de funcionalidad del equipo portátil detector de gases	66
4.2.1. Transmisor de detector de gases	66
4.2.2. Sistema de alarmas de gas receptor RF	68
4.2.3. Receptor LoRa con comunicación GSM	74
4.3. Evaluación del sistema	76
4.4. Pruebas de Detección de Gases	83
4.5. Pruebas de Geolocalización.....	83
4.6. Pruebas de duración de equipo	88
4.7. Comparación de los Programas de los Cuatro Intentos	89
4.8. Estudio de confiabilidad del sistema	91
4.8.1. Confiabilidad de medición de los sensores	91
4.8.2. Confiabilidad operativa del sistema	93
4.9. Costos de materiales y equipos.....	95
4.10. Especificaciones técnicas del diseño del sistema	99
4.11. Comparación entre el Detector de Gases desarrollado y el equipo MSA ALTAIR 4X.....	105
CONCLUSIONES.....	108
RECOMENDACIONES	110
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112
ANEXOS.....	114

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Ventajas de la tecnología LoRa	28
Tabla 2 Comparación entre tecnologías de comunicación inalámbrica: LoRa, Wi-Fi y ASK	29
Tabla 3 Comparativa entre Arduino Nano, Arduino Nano Every y ESP8266	49
Tabla 4 Comparativa entre módulos de comunicación	50
Tabla 5 Componentes adicionales NEO-6M, SIM800L Y Modulo LoRa (Reyax)	51
Tabla 6 Resumen de selecciones por equipo	51
Tabla 7 Resultados de las pruebas de detección de gases	83
Tabla 8	96
Tabla 9 Especificaciones generales del sistema	99
Tabla 10 Especificaciones del equipo portátil detector de gases.....	99
Tabla 11 Especificaciones del equipo de alarma de evacuación	101
Tabla 12 Especificaciones del circuito receptor LoRa/GSM	102
Tabla 13 Comparación entre el Detector De Gases Desarrollado y el equipo MSA ALTAIR 4X.....	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Influencia del pH en la generación de H ₂ S.....	2
Figura 2 Efectos del ácido sulfhídrico (H ₂ S) en los seres humanos	3
Figura 3 Efecto del oxígeno	13
Figura 4 Efecto del H ₂ S	15
Figura 5 Efecto del H ₂ S	16
Figura 6 Módulo de sensor GAS ZE03-H ₂ S.....	17
Figura 7 Módulo de sensor de gas ZE03-CO	19
Figura 8 Sensor de Gas MH-440D	20
Figura 9 Módulo de sensor de gas ZE03-O ₂	21
Figura 10 Módulo GPS NEO-6M	22
Figura 11 Comunicación LoRaWAN vs otras tecnologías de comunicación	24
Figura 12 Sistema Automático de Control de emergencias	32
Figura 13 Comunicación Entre equipos mediante tecnología de Comunicación LoRa	33
Figura 14 Diagrama de bloques de la arquitectura general del sistema	34
Figura 15 Diagrama del circuito electrónico del sistema	36
Figura 16 Diagrama del circuito transmisor.....	38
Figura 17 Circuito de Alarma y Señalización del Sistema.....	40
Figura 18 Diagrama del circuito receptor LoRa con comunicación GSM.....	41
Figura 19 Circuito de Comunicación GSM y Alerta Sonora	42
Figura 20 Diagrama del circuito receptor alarma - sirena.....	44
Figura 21 Diseño del PCB del Módulo Transmisor de datos.....	45
Figura 22 Diseño del PCB de la tarjeta receptora LoRa con comunicación GSM.....	46
Figura 23 Diseño del PCB de la tarjeta receptora alarma - sirena.....	47
Figura 24 Diagrama de flujo del firmware de los sensores de gases.....	48
Figura 25 Diseño físico del módulo receptor	53
Figura 26 Vista posterior del diseño físico del módulo receptor.....	54
Figura 27 Diseño físico del módulo transmisor	55
Figura 28 Vista posterior del diseño físico del transmisor	56
Figura 29 Diagrama de flujo del firmware	61
Figura 30 Interfaz de usuario de detección de gases	64
Figura 31 Dashboard Tiempo Real del sistema de geolocalización.....	65

Figura 32 Carcasa Modular del equipo detector de gases	66
Figura 33 Módulo Transmisor para Detección de Gases	67
Figura 34 Puesta en marcha del del equipo portátil de detección de gases.....	68
Figura 35 Tablero del módulo de Alarma Receptor RF	69
Figura 36 Receptor de Alarma con Sirena RF	70
Figura 37 Botón de Emergencia del Sistema RF.....	71
Figura 38 Sistema de alarma receptor RF activo	72
Figura 39 Prueba del módulo transmisor con sistema de alarma RF	73
Figura 40 Módulo receptor LoRa con comunicación GSM	74
Figura 41 Tablero del Receptor LoRa con Comunicación GSM	75
Figura 42 Centro de recepción de datos – edificio de 4 pisos	76
Figura 43 Recepción de Datos del Sistema	77
Figura 44 Pruebas en línea recta con tráfico moderado	78
Figura 45 Prueba de Alcance a 300 m del Sistema	79
Figura 46 Central de Recepción de Datos	80
Figura 47 Prueba de Alcance a 2 km del Sistema	81
Figura 48 Alertas de llamadas del sistema de detección de gases.....	82
Figura 49 Ubicación por geolocalización en el primer punto	84
Figura 50 Ubicación por geolocalización en el segundo punto.....	84
Figura 51 Ubicación por geolocalización en el tercer punto.....	85
Figura 52 Ubicación por geolocalización en el cuarto punto	86
Figura 53 Ubicación por geolocalización en el quinto punto.....	87
Figura 54 Ubicación por geolocalización en el sexto punto	88

ACRÓNIMOS

ADR:	Adaptive Data Rate (Tasa de Datos Adaptativa)
API:	Application Programming Interface
EEPROM:	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
GPS:	Global Positioning System (Sistema de Posicionamiento Global)
GSM:	Global System for Mobile Communications (Sistema Global para Comunicaciones Móviles)
IoT:	Internet of Things (Internet de las Cosas)
LoRa:	Long Range (Largo Alcance)
LoRaWAN:	Long Range Wide Area Network (Red de Área Amplia de Largo Alcance)
LPWAN:	Low Power Wide Area Network (Red de Área Amplia y Bajo Consumo)
NDIR:	Non-Dispersive InfraRed (Infrarrojo No Dispersivo)
RF:	Radio Frequency (Frecuencia de Radio)
TTN:	The Things Network
UART:	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (Receptor-Transmisor Asíncrono Universal)

INTRODUCCIÓN

El avance de la tecnología de Internet de las cosas (IoT) ha abierto nuevas posibilidades para mejorar la seguridad en la detección de gases peligrosos en la industria. El gas H_2S , al igual que otros gases nocivos, plantea una amenaza significativa si no se cumplen los estándares de calidad y los procedimientos adecuados de trabajo. En este sentido, la implementación de un equipo portátil detector de gases se vuelve aún más crucial para salvaguardar la vida y el bienestar de los trabajadores en los sectores mineros. Este dispositivo, además de contar con la capacidad de detectar gases como Ácido Sulfhídrico (H_2S), Monóxido de Carbono (CO), Metano (CH_4) y la falta de presencia de Oxígeno (O_2), aprovechará la tecnología IoT para ofrecer una solución más completa. Su función principal será alertar al usuario mediante alarmas de emergencia, tanto sonoras como visuales, con el objetivo de prevenir riesgos y minimizar las consecuencias asociadas a la exposición a estos gases peligrosos.

A través de la incorporación de tecnología de geolocalización, impulsada por IoT, este equipo portátil estará constantemente monitoreado en tiempo real. Esto permitirá identificar de manera precisa las áreas donde se registren niveles elevados de gases nocivos, facilitando una respuesta rápida y eficiente ante situaciones de emergencia. La comunicación inalámbrica de largo alcance proporcionada por la tecnología LoRa permitirá transmitir la información de detección de manera instantánea, facilitando la coordinación y el traslado oportuno de personal hacia las zonas de menos riesgo.

El cumplimiento de las normas y la implementación de un sistema automatizado de emergencias potenciado por IoT contribuirán a reducir significativamente el riesgo de incidentes relacionados con la emisión de estos gases y a mitigar las consecuencias derivadas de la inhalación de los mismos. Asimismo, se espera que esta implementación genere beneficios a nivel corporativo en los sectores mencionados, ya que se reducirán los costos asociados al mantenimiento preventivo y correctivo, las pérdidas económicas ocasionadas por fugas y, lo más importante, se mejorarán las condiciones laborales de los operadores, reduciendo los riesgos laborales de acuerdo a las normativas establecidas en el artículo 110 y artículo 132 del Capítulo XIV del Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería. Es por ello que el uso de la tecnología LoRa como parte integral del sistema de comunicación y monitoreo potenciará aún más la eficiencia y la precisión en la detección y alerta de los gases nocivos, fortaleciendo de esta manera las medidas de seguridad en la industria y promoviendo entornos laborales más seguros y saludables

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

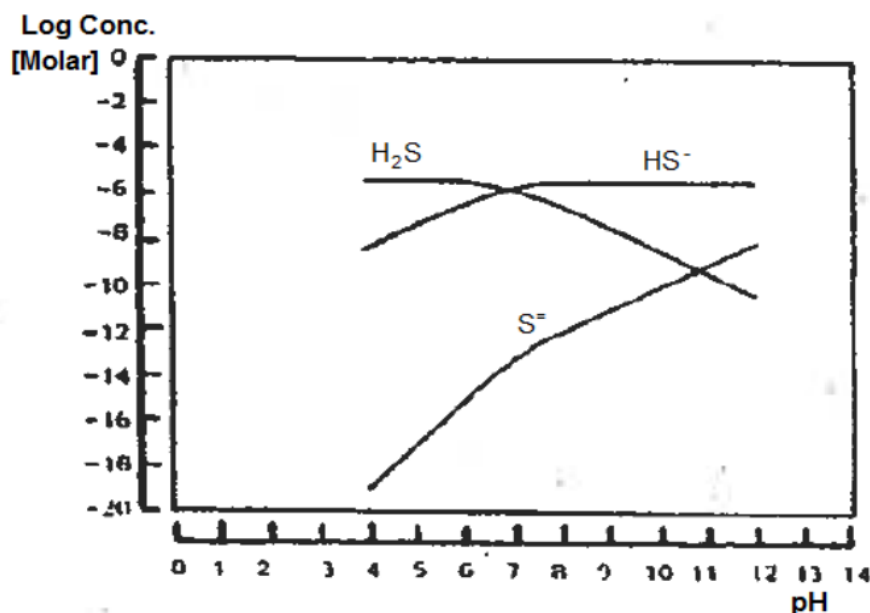
Este proyecto de investigación presentará un equipo portátil de detección de gases (H_2S , CH_4 , CO y O_2) con geolocalización, integrado a un sistema automático de control de emergencias. La tecnología LoRa basada en IoT se utilizará para garantizar una comunicación eficiente y segura en situaciones de emergencia.

1.1. Identificación del problema

Dado que en la producción industrial minera como es en la producción de cobre y molibdeno, existen procesos en las cuales se requiere producir NaHS para evitar la flotación de los sulfuros de cobre, por lo tanto, el nivel de pH en este proceso pasa a ser una variable fundamental en la acción de esta. El trabajar en rangos de pH altos favorece la flotabilidad de los sulfuros de cobre, mientras que operar con pH bajos (menor a 7) conlleva a un sobreconsumo de NaHS debido a la escasa presencia de iones HS^- , y además a la generación de H_2S (gas sulfhídrico), un compuesto altamente peligroso.

Figura 1

Influencia del pH en la generación de H_2S



Nota. Elaboración Propia

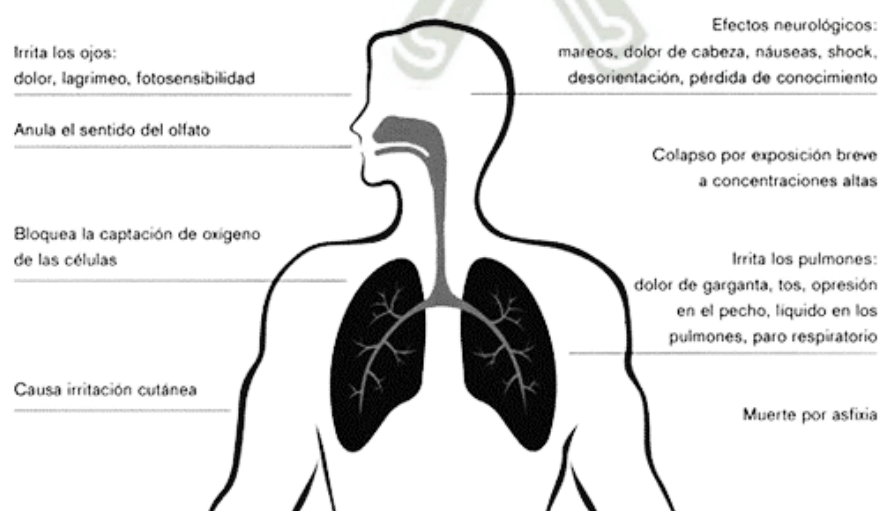
Como se puede ver en la gráfica sería de mucha utilidad pensar en crear un dispositivo que pueda monitorear de manera constante la concentración en el ambiente del gas tóxico ácido Sulfhídrico (H_2S), así como de otros gases y también la ausencia de oxígeno. sin exponer y arriesgar la salud de las personas.

1.2. Descripción del problema

En la industria del gas y el petróleo, el H_2S (ácido sulfhídrico) representa una amenaza significativa para la seguridad de los trabajadores. La exposición a este gas puede resultar en lesiones e incluso la muerte. A partir de concentraciones muy bajas, el H_2S ya es perceptible para el olfato humano, pero a niveles más altos puede causar daños al sistema cardiovascular y al sistema nervioso central. Además, puede paralizar los nervios olfativos, lo cual es especialmente peligroso ya que el sistema de alarma natural del cuerpo se ve afectado. Concentraciones aún mayores pueden provocar efectos potencialmente mortales, como colapso respiratorio, convulsiones y pérdida del conocimiento. Incluso una única inhalación a concentraciones de alrededor de 1000 ppm puede resultar en muerte instantánea. Es por ello que es crucial llevar a cabo una monitorización continua e individualizada de las concentraciones de H_2S en la industria del gas y el petróleo debido a su carácter incoloro y su tendencia a acumularse en el suelo. Además, las concentraciones extremadamente altas de H_2S , en combinación con fuentes de ignición, pueden dar lugar a explosiones.

Figura 2

Efectos del ácido sulfhídrico (H_2S) en los seres humanos



Nota. Elaboración Propia

Actualmente, existe la necesidad de monitorear constantemente los niveles de gases y la ausencia de oxígeno en el ambiente de trabajo en las industrias mineras. La falta de dicho monitoreo expone a los trabajadores a niveles peligrosos de gases, lo que puede resultar en problemas de salud e incluso la muerte.

Por lo tanto, se plantea como objetivo diseñar y construir un equipo portátil de detección de gases que pueda utilizarse en entornos industriales y de emergencia. Este equipo deberá ser constantemente monitoreado mediante geolocalización, permitiendo así una gestión más eficiente de emergencias y un seguimiento preciso de los usuarios. También se busca desarrollar un sistema de control de emergencias que permita a los usuarios solicitar ayuda y alertar a los servicios de emergencia en caso de detectar gases peligrosos.

La implementación exitosa de este sistema ayudará a reducir la cantidad de accidentes mortales por contacto con sustancias nocivas en los trabajadores, disminuyendo así la tasa de mortalidad en la industria minera. Para lograr este objetivo, se llevarán a cabo pruebas y experimentos en entornos controlados y situaciones reales, con el fin de validar la funcionalidad y precisión del equipo.

Método de la caja negra:

Situación actual

¿Qué se tiene?

La situación actual, en las industrias mineras, es que se requiere el monitoreo constante de los niveles de gases, en los procesos que se utilizan para la producción de cobre y molibdeno.

¿Qué está pasando?

Tan solo en el año 2022, según el Ministerio de Energía y Minas en Perú, hubo 4 casos de accidentes mortales por: Contacto por inhalación, por Ingestión o por Absorción con sustancias nocivas, en 4 empresas mineras. Esto quiere decir que debemos tomar en cuenta estos casos para que no continúen en un futuro dichos accidentes mortales.

¿Qué sucedería si la situación actual continúa?

- La falta de un monitoreo de estos gases, hace que los trabajadores se expongan a niveles altos de estas, provocando problemas en la salud, y en caso extremos la muerte.
- Si la situación actual continúa, es probable, que personal trabajador de la empresa minera se expongan a dichos gases, eso sería perjudicial a la empresa, tanto en la producción de la empresa y la integridad del trabajador.

Situación deseada

¿Qué aspira tener cuando finalice el trabajo?

- La situación deseada es diseñar y construir un prototipo funcional de un equipo portátil de detección de gases que pueda ser utilizado en entornos industriales y de emergencia.
- Implementar un sistema de geolocalización que permita identificar la ubicación del equipo y de los usuarios en tiempo real, lo que facilitará la gestión de emergencias y el seguimiento del equipo.
- Desarrollar un sistema de control de emergencias que permita a los usuarios solicitar ayuda y alertar a los servicios de emergencia en caso de detectar gases peligrosos.
- Validar la funcionalidad y la precisión del equipo a través de pruebas y experimentos en entornos controlados y en situaciones reales.
- Reducir la Cantidad de Accidentes mortales por Contacto por inhalación, por Ingestión o por Absorción con sustancias nocivas en los trabajadores para así reducir la tasa de mortalidad en estas mismas.
- Documentar todo el proceso de diseño e implementación, incluyendo la descripción detallada de los componentes, la metodología utilizada, los resultados obtenidos y las conclusiones.

1.3. Alcances de la investigación

El alcance de la presente investigación consiste en el diseño e implementación de un Equipo Portátil Detector de Gases (H_2S , CH_4 , CO y la falta de presencia de Oxígeno) con Geolocalización, mediante un sistema automático de control de Emergencias utilizando tecnología de modulación LoRa basado en IoT (Internet de las cosas). Este equipo estará destinado a garantizar la seguridad en sectores mineros donde la presencia de gases peligrosos pueda representar un riesgo para los trabajadores, además el equipo portátil estará equipado con sensores de alta precisión para la detección de los gases (H_2S , CH_4 , CO y O_2), permitiendo una monitorización continua y en tiempo real de las concentraciones presentes en el entorno, y mediante el uso de la tecnología de modulación LoRa y la integración con IoT permitirá (con una larga distancia) transmitir los datos recopilados por el equipo a un servidor web de una manera eficiente, lo que facilitará el monitoreo remoto de las concentraciones de gases y la ubicación de los trabajadores desde una ubicación central.

En caso de que se detecten niveles peligrosos, el sistema comunicará de manera automática a la brigada de control de emergencias y generará alarmas tanto audibles, como visuales para alertar al personal sobre la situación de emergencia, a su vez el equipo contará con capacidades de geolocalización con una buena duración de la batería del equipo, lo que permitirá rastrear la ubicación exacta de los trabajadores en caso de una situación que pueda perjudicar al personal, lo que será especialmente útil en entornos mineros, donde la localización precisa juega un papel crucial para la respuesta rápida y eficiente ante un incidente y accidente laboral.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Diseñar e implementar un equipo portátil detector de gases (H_2S , CH_4 , CO y O_2) con geolocalización, utilizando un sistema automático de control de emergencias y tecnología de modulación LoRa basada en IoT.

1.4.2. Objetivos específicos

- Realizar una investigación y análisis sobre las características y propiedades de los gases H_2S , CH_4 , CO y O_2 , así como los riesgos asociados a su presencia en entornos industriales.
- Diseñar un circuito electrónico para la detección de los gases H_2S , CH_4 , CO y O_2 , utilizando sensores adecuados, para ello se considerará la precisión, sensibilidad y tiempo de respuesta del equipo detector.
- Desarrollar un sistema de geolocalización eficiente (con una buena duración del equipo encendido) que permita identificar la ubicación exacta del equipo y de los usuarios en tiempo real, facilitando la gestión de emergencias, el seguimiento del equipo y la toma de decisiones basada en la información geográfica.
- Implementar una interfaz de usuario que permita la visualización de los datos de detección de gases y la información de geolocalización en una plataforma web, esto facilitará el monitoreo y la toma de decisiones en situaciones de emergencia.
- Integrar el sistema de detección de gases y geolocalización con una red de comunicación inalámbrica utilizando tecnología de modulación LoRa.
- Validar la funcionalidad y precisión del Equipo Portátil Detector de Gases mediante pruebas y experimentos en entornos controlados y situaciones reales, garantizando su efectividad y confiabilidad en la detección de gases peligrosos.

1.5. Antecedentes de la investigación

Como antecedentes internacionales de la presente investigación se tienen los siguientes:

Espinoza (2021) en su tesis “Plataforma basada en Internet de las cosas (IOT) para la medición y monitoreo remoto del nivel de Gas Sulfuro de Hidrógeno Generado por baterías de montacargas eléctricos en entornos logísticos”, tuvo como objetivo desarrollar una plataforma basada en Internet de las Cosas (IoT) para medir y monitorear de manera remota el nivel de gas sulfuro de hidrógeno (H₂S) generado por baterías de montacargas eléctricos en entornos logísticos. La metodología incluyó el diseño de una red de sensores inalámbricos utilizando tecnología LoRa/LoRaWAN y sensores MQ136 para la telemetría del gas. Además, se desarrolló una plataforma de visualización de datos basada en The Things Network (TTN) y TagoIO, que permite monitorear mediciones de H₂S en tiempo real. El sistema fue probado en estaciones de carga, siguiendo normas internacionales. Los resultados demostraron que el sistema es eficiente y confiable, logrando detectar condiciones peligrosas para la salud del personal y riesgos de incendios, aportando una solución innovadora y escalable para la gestión logística en Guayaquil.

Correa y Zavala (2020), estudiaron el “Diseño e implementación de un sistema de detección y monitoreo de gas metano en un modelo de planta de tratamiento de agua”. El propósito del proyecto es desarrollar e implementar un sistema para detectar y monitorear el metano, el cual es considerado un importante subproducto de la descomposición anaeróbica de la materia orgánica en las aguas residuales, es un combustible de alto valor energético, incoloro e inodoro. Por lo que generalmente no se encuentra en grandes cantidades en las aguas residuales, porque incluso pequeñas cantidades de oxígeno suelen a ser tóxicas. Para ello, se ha eliminado la exposición de incendio en la estación depuradora de aguas residuales por el alto rendimiento del metano a través de la digestión anaerobia. Asimismo, el tiempo se resolvió el problema de incendios generados por chispas que se encuentran alrededor de la piscina que se encuentra en el centro. Este investigador realizó un equipo que pueda detectar y monitorear la presencia de gas metano como parte de un proceso de tratamiento de agua, en cambio el equipo que he realizado tiene un enfoque más amplio abarcando la detección de cuatro gases en diferentes entornos mineros.

Nossa y Arias (2019), en su trabajo de investigación “Implementación red de sensores inalámbricos de bajo costo utilizando protocolo LORAWAN aplicada al

monitoreo de material particulado, monóxido de carbono y dióxido de nitrógeno como indicadores de calidad de aire en exteriores”, tuvo como objetivo principal las instalación de este sistemas de sensores inalámbricos para el monitoreo del material particulado, monóxido de carbono y dióxido de nitrógeno como indicadores de calidad de aire, la red instalada esta conformadas por dos nodos finales, sensores, como también de un módulo de comunicación LORAWAN, como resultado al usuario final se obtuvo un prototipo portátil de bajo costo comparado a las estaciones de medición que actualmente se tienen en la ciudad de Colombia, la medición de estos contaminantes es importantes para el cálculo del índice de calidad de aire que mediante este sistema puede ser visualizado desde cualquier dispositivo con acceso a internet.

Asimismo, como antecedentes nacionales de este estudio se tienen los siguientes:

Mendoza y De Los Santos (2023) en su tesis “Diseño e implementación de una red piloto LoRaWAN para el monitoreo remoto de cuatro parámetros médicos”, tuvieron como objetivo diseñar e implementar una red piloto LoRaWAN para el monitoreo remoto de cuatro parámetros médicos: temperatura corporal, frecuencia cardíaca, presión arterial y saturación de oxígeno, apoyando el desarrollo de la telemedicina en el Perú. La metodología consistió en la integración de sensores no invasivos conectados a un nodo LoRa que transmite los datos recopilados a un gateway. Esta puerta de enlace se conecta con el servidor de red The Things Network (TTN) y el servidor de aplicaciones UBIDOTS, donde los parámetros médicos son monitoreados en tiempo real. Se realizaron pruebas comparativas con equipos comerciales y pruebas de transmisión en distintos entornos para validar la eficacia y alcance del sistema. Los resultados mostraron un porcentaje de error menor al 6% y un alcance de transmisión de datos de hasta 4,61 km, demostrando su efectividad y escalabilidad.

Valqui (2019), investigó “Diseño e implementación de un sistema electrónico de monitoreo de gases tóxicos para minería subterránea con acceso remoto a través de servidor web”. Este informe de Suficiencia Profesional (ISP) se centra en el boceto y construcción de una estación de medición de gases tóxicos para minería subterránea peruana, ubicada en puntos estratégicos del túnel y cerca del sitio de la explosión. La estación de monitoreo cuenta con equipos que soporten condiciones extremas de vapor, presión y temperatura además está equipada con 1 alarma que tiene 3 etapas que les avisara acerca de las concentraciones con mayor peligro. Este proyecto tiene protocolo

de comunicación MODBUS TCP/IP para comunicarse con SDDCA o PLC y controlar el inversor del sistema de ventilación según sea necesario. Este investigador realizó un sistema de monitoreo y la alerta temprana de gases específicos en la minería subterránea utilizando un protocolo de comunicación MODBUS TCP/IP, en cambio el sistema de monitoreo que he realizado, este sujeto con la geolocalización y para la recepción de datos se está utilizando tecnología de modulación LoRa basada en IoT.

1.6. Técnicas e instrumentos

Estas serán las siguientes técnicas e instrumentos:

1.6.1. Revisión bibliográfica

Se realizará una revisión exhaustiva de la literatura existente sobre detección de gases, geolocalización y sistemas de control de emergencia en la industria minera.

1.6.2. Investigación de campo

Se realizarán pruebas en diferentes ambientes mineros para evaluar el desempeño de los detectores de gas, su precisión en el posicionamiento y la efectividad del sistema de control de emergencias.

1.6.3. Análisis de datos

Se analizarán los datos recopilados durante las pruebas y las encuestas utilizando herramientas estadísticas y de análisis de datos para evaluar el rendimiento de los dispositivos de detección de gases y la percepción de los empleados sobre su utilidad.

Estas técnicas e instrumentos ayudarán al investigador a llevar a cabo una investigación exhaustiva y detallada y le permitirán evaluar el desempeño del detector de gases, así como su potencial para aumentar la seguridad la eficacia de los equipos en la industria minera

1.7. Campo de verificación

1.7.1. Ubicación espacial

El lugar donde se tendrá planteado realizar el estudio del proyecto en cuestión será:

Mina a cielo abierto: Este tipo de mina se caracteriza por ser una excavación en la superficie de la tierra donde se extraen minerales. En este tipo de mina, la detección de gases no suele ser un problema tan crítico como en las minas subterráneas, sin embargo, la geolocalización puede ser útil para identificar áreas con concentraciones elevadas de minerales.

Planta de procesamiento: Una planta de procesamiento es un lugar donde se lleva a cabo la separación y concentración de los minerales extraídos en la mina. Aquí se pueden realizar pruebas para detectar los gases liberados durante la separación y el enriquecimiento de los minerales.

Laboratorios: En los laboratorios de análisis químicos se pueden realizar pruebas para detectar gases en muestras de rocas o minerales. Los detectores portátiles con geolocalización y control de emergencias también se pueden utilizar para identificar áreas de altas concentraciones elevadas de minerales en las muestras.

1.7.2. Ubicación temporal

El estudio se llevará a cabo durante el año 2025, considerando las pruebas que se realizarán para la validez del equipo portátil detector de gases.

1.7.3. Unidad de estudio

Una vez finalizado el proyecto y hayan realizado las pruebas necesarias en laboratorio, para confirmar el correcto funcionamiento de los equipos, será necesario trabajar con un equipo de personas representativas de los trabajadores que laboran en la industria minera. Este grupo de personas deberá de seleccionarse de acuerdo con ciertos criterios que pueden ser relevantes para la evaluación de grupo. Aquí algunos de los criterios que se pueden considerar para la futura selección de grupo de personas son:

- Experiencia laboral en la industria minera
- Conocimiento técnico en la detección de gases y uso de equipos de seguridad
- Edad y género
- Condición física y de salud

Después de haber seleccionado el grupo de personas, se podrán realizar las pruebas en diferentes situaciones de trabajo, como en espacios confinados, excavaciones, interior de minas, entre otros, con el objetivo de evaluar el desempeño del equipo en situaciones reales y observar su capacidad para detectar gases de manera precisa y oportuna. Además, se podrán recopilar opiniones y comentarios de los empleados sobre la facilidad de uso y la eficacia del sistema de notificación de emergencia. Es importante garantizar las medidas de seguridad adecuadas durante las pruebas, y se obtener el permiso de las autoridades correspondientes para realizar estas pruebas en un ambiente real de trabajo.

1.8. Estrategia

La estrategia para la realización de este proyecto se dividirá en varias fases. En la primera fase se realizará una revisión bibliográfica sobre la detección de gases en el rubro minero, las tecnologías existentes y los requerimientos de seguridad. En la segunda fase se desarrollará un prototipo de analizador de gases móvil con geolocalización y control de emergencias, definiendo los componentes, el software y la interconexión de estos. En la tercera fase se desplegará y probará en un entorno controlado Finalmente, en el punto 4 de la fase se evaluará el rendimiento del dispositivo en condiciones reales, midiendo el rendimiento en la detección de gases, la precisión geográfica y el rendimiento del sistema de alerta de campo en caso de emergencia.



CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Bases teóricas

El investigador incluirá las siguientes bases teóricas:

2.1.1. Química de los gases

Es importante tener un concepto base, de los diferentes gases, que el equipo va a detectar y que se puede encontrar en el rubro minero. Y entender los diferentes peligros agregados a su liberación.

2.1.1.1. Oxígeno (O₂)

Identificado por su símbolo O y número atómico 8, se presenta en estado gaseoso en condiciones normales y forma parte de la atmósfera terrestre en una proporción cercana al 21%. Este gas carece de color, olor y sabor. El oxígeno desempeña un papel esencial en el mantenimiento de la vida en nuestro planeta, ya que los organismos vivos utilizan este elemento para llevar a cabo la respiración celular, proceso a través el cual se genera energía a partir de la glucosa y otros nutrientes.

El oxígeno se utiliza en diversas aplicaciones de carácter industrial, desempeñando un papel fundamental en la fabricación de acero, la producción de combustibles y la elaboración de productos químicos. Además, se emplea en la medicina para el método de enfermedades respiratorias, como la hipoxia, que es la falta de oxígeno en los tejidos del cuerpo.

El oxígeno se encuentra en la Tierra en forma de gas, y se puede generar a través de la fotosíntesis, la descomposición del agua, la electrólisis y otros procesos químicos. También se halla de manera líquida y sólida a temperaturas extremadamente bajas.

2.1.1.2. ¿Qué Pasaría si faltaría oxígeno en nuestro cuerpo?

La falta de oxígeno, también conocida como hipoxia, puede ser perjudicial para los seres vivos y se genera cuando no hay bastante oxígeno apto para cubrir las obligaciones del cuerpo. Hay muchas causas de la hipoxia, que pueden estar relacionadas con problemas respiratorios, circulatorios o metabólicos. Por ejemplo, la hipoxia también puede ser causada por una enfermedad cardiovascular como la enfermedad coronaria que puede impedir la respiración y afectar el oxígeno que llega a los pulmones.

La hipoxia también puede ser causada por enfermedades circulatorias, como la enfermedad coronaria, que pueden impedir que la sangre llegue al corazón y al cerebro.

Además, ciertas condiciones metabólicas, como la anemia o el envenenamiento por monóxido de carbono. Asimismo, tienen la capacidad de disminuir la disponibilidad de oxígeno en los tejidos del organismo.

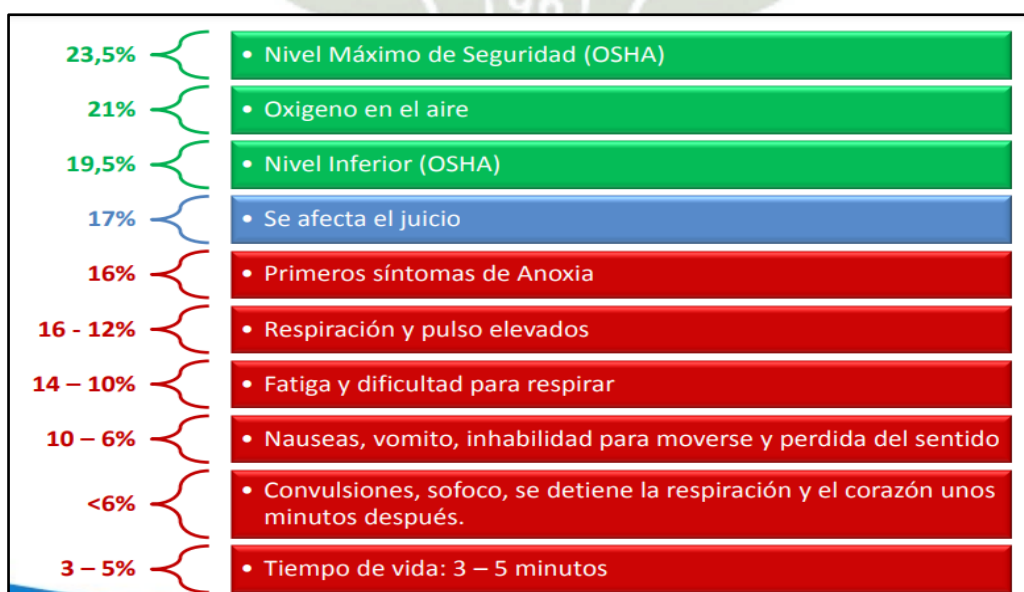
Los signos de la hipoxia pueden variar en función de la intensidad y el tiempo de exposición a la carencia de oxígeno. Los casos leves, pueden causar haber fatiga, mareos y dolor de cabeza, los más severos pueden ser confusión, pérdida del conocimiento y daño cerebral.

El tratamiento para la hipoxia se determina en función de la raíz del problema y puede incluir el suministro de oxígeno suplementario, la administración de medicamentos que mejoran la respiración o el tratamiento de la afección subyacente. Es importante buscar atención médica inmediata si se presentan síntomas de hipoxia para evitar complicaciones graves (Clavijo, s.f).

- a) **Detección del Oxígeno.** El oxígeno se encuentra niveles normales a 20.9% en volumen, su deficiente puede traer consecuencias a la respiración de una persona (Clavijo, s.f.).
- b) **Efectos en la salud del Oxígeno.** El oxígeno dentro del 19.6 % a 23.5% se encuentra dentro del rango de las normas de seguridad y salud (OSHA), dentro del rango de 3 % a 17% ya observan efectos a la salud de la persona desde perder el conocimiento hasta incluso la muerte en los niveles más bajos (Clavijo, s.f.).

Figura 3

Efecto del oxígeno



Nota. Adaptado de Efectos del oxígeno. Fuente (Clavijo, s.f).

2.1.1.3.El ácido sulfhídrico (H₂S)

Se trata de una sustancia química compuesta por un par de átomos de hidrógeno y un átomo de azufre. Se presenta en estado gaseoso, es incoloro y posee un olor característico similar al de los huevos en descomposición.

El ácido sulfhídrico se halla de manera inherente en el petróleo crudo y en el gas natural, y también está presente en ciertas reservas geotérmicas y volcánicas. También puede formarse por procesos biológicos, como la descomposición de materia orgánica en ambientes anóxicos, como los pantanos y los sistemas de alcantarillado.

El ácido sulfhídrico se emplea en diversas industrias, como la producción de ácido sulfúrico, la refinación de petróleo y la minería. Además, se emplea en el ámbito de la industria química como un compuesto con capacidad reductora y en la industria alimentaria como un complemento destinado a realzar tanto el matiz como el gusto de productos comestibles (Clavijo, s.f).

No obstante, el sulfuro de hidrógeno es sumamente nocivo y presenta riesgos tanto para la salud humana como para el entorno. La exposición a concentraciones elevadas de este gas puede inducir a la irritación de los ojos, la nariz y la garganta, generando síntomas como cefaleas, vértigos, náuseas, y, en situaciones extremas, podría resultar letal. También puede dañar la vida acuática y la calidad del aire.

Es importante tomar precauciones adecuadas para evitar la exposición sulfuro de hidrogeno, lo cual abarca la utilización de indumentaria de protección personal y la correcta ventilación en las zonas donde se manipule este gas. Además, las empresas e industrias que utilizan sulfuro de hidrogeno en sus procesos deben seguir estrictamente normas y estándares para reducir las exposiciones asociados a su uso.

- a) El sulfuro de hidrógeno es un gas incoloro, denso y asfixiante que emana un distintivo olor a huevos en descomposición. Se origina a partir de la descomposición de materia orgánica y su concentración permitida es de 1 parte por millón (ppm). (Clavijo, s.f.).
- b) La concentración mínima para ser perceptible es 0.13ppm, a partir de 1ppm a 2000 ppm tiene efecto sobre la salud de la persona desde la irritación en los ojos hasta la muerte en sus concentraciones altas. (Clavijo, s.f.)

Figura 4*Efecto del H₂S*

Nota. Adaptado de Efectos del oxígeno. Fuente (Clavijo, s.f).

2.1.1.4.El monóxido de carbono (CO)

Es un gas es altamente tóxico y representa un riesgo para la salud humana; es inodoro, no tiene color ni sabor. Se genera en situaciones en las que hay una quema de combustibles, como la gasolina, el petróleo, el carbón, la madera y el gas natural, en entornos con una falta de oxígeno.

El monóxido de carbono representa un peligro debido a su afinidad por la hemoglobina en la sangre, lo que interrumpe el transporte de oxígeno a los tejidos del cuerpo. Los signos de intoxicación por monóxido de carbono pueden manifestarse de manera similar a los síntomas de la gripe, incluyendo cefaleas, vértigos, debilidad, náuseas y vómitos, y en situaciones graves, pueden dar lugar a episodios de convulsiones, pérdida de conocimiento e incluso resultar fatales. El monóxido de carbono se produce en una variedad de situaciones, incluidos incendios, explosiones y vehículos con motores de combustión interna. También puede acumularse en espacios confinados, como garajes, sótanos y estufas mal ventilados, donde el combustible se quema sin tener apto de oxígeno (Clavijo, s.f).

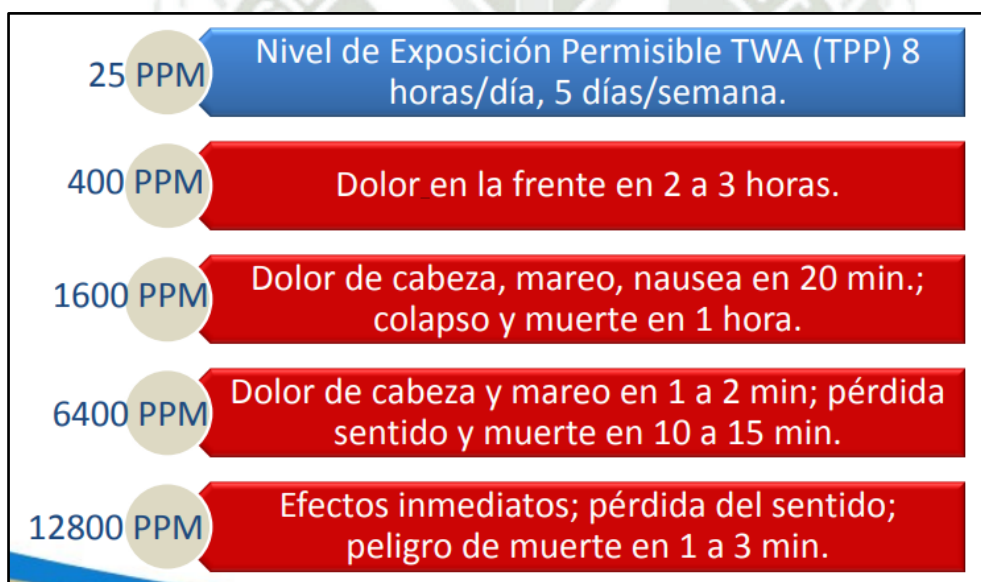
Para prevenir el envenenamiento por CO, es importante asegurarse de que los hogares y edificios estén equipados con detectores de monóxido de carbono y que los

equipos y los sistemas de calefacción se mantengan en buen estado de funcionamiento y sean revisado por profesionales. Además, es importante asegurarse de que los vehículos estén bien ventilados y no operen en funcionamiento en áreas confinadas, como garajes.

- a) El CO es un gas resultante de procesos de combustión, asfixiante e incoloro, sin olor denominado como asesino silencioso y presente un nivel permisible de 25 ppm (Clavijo, s.f.).
- b) La exposición permisible es de 8 horas por día en una concentración de 25 ppm, a partir de 400 ppm a 12800 ppm tiene efecto sobre la salud de la persona desde el dolor en la frente hasta la muerte en sus concentraciones altas. (Clavijo, s.f.).

Figura 5

Efecto del H₂S



Nota. Adaptado de Efectos del oxígeno. Fuente (Clavijo, s.f.).

2.1.1.5.El metano (CH₄)

Es un gas inflamable y explosivo que se encuentra en vetas de carbón y otros depósitos geológicos subterráneos. En la industria minera, el metano es un peligro potencial para la seguridad de los trabajadores debido a su capacidad para acumularse en espacios confinados y formar mezclas explosivas con el aire.

En entornos de minería de carbón, el metano se emite como subproducto de la extracción del mineral y tiene la capacidad de acumularse en las secciones subterráneas

de la mina. Para evitar explosiones, en la mina se utilizan sistemas de ventilación y drenaje en las minas para reducir la concentración de metano en el ambiente.

También se puede utilizar el metano como fuente de energía en la industria minera. Se puede capturar el metano liberado por las minas se puede capturar y utilizar para generar electricidad o maquinaria y equipos de minería. La captura y utilización del metano no solamente disminuye el peligro de incendios y explosiones, sino que también contribuye a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero que se liberan a la atmósfera (Clavijo, s.f).

2.1.2. Tecnología de los sensores de gases

El sensor de gas es un elemento clave en el diseño de un detector de gas portátil. Por lo tanto, es importante tener una sólida comprensión de la tecnología de detección de gases incluidos los principios de detección la selección del tipo de sensor correcto y los métodos de calibración (Clavijo, s.f).

2.1.2.1. Sensor de Gas de ácido sulfhídrico (H₂S)

El sensor de gas ZE03-H₂S es diseñado para aplicaciones industriales, se conecta sin dificultad a un microcontrolador y se emplea para la medición de la concentración de sulfuro de hidrógeno en el aire. Su funcionamiento se basa en un principio de detección electroquímica y está respaldado por un diseño de circuito avanzado (DNA Technology, 2015).

Figura 6

Módulo de sensor GAS ZE03-H₂S



Nota: adaptado de Módulo de sensor de GAS ZE03-H₂S, DNA Technology. Fuente: <https://www.dnatechindia.com/ZE-03-H2S-Hydrogen-sulfide-gas-sensor-module-buy-india.html>

Características.

- Alta sensibilidad y resolución
- Bajo consumo de energía
- UART y salida de voltaje analógico
- Buena estabilidad y excelente capacidad antiinterferente.

Aplicación. Ampliamente adecuado para la protección industrial, Minera y ambiental en la detección de H₂S.

Tipo de producto. Electroquímica de sensor de gas

Rango de detección. 0 - 100ppm

Límite máximo de medición. 100ppm

Esperanza de vida. 2 años

Sensibilidad. 0,7 + 0,15 uA/ppm

Definición de pines del módulo.

- GND: Tierra
- VCC: Fuente de alimentación (DC5±0.1V)
- VO: Voltaje de salida analógica
- RXD: Entrada de puerto serie (3 voltios)
- TXD: Salida del puerto serie (3 voltios)

2.1.2.2. Sensor de Gas de Monóxido de Carbono (CO)

El sensor de gas ZE03CO es de grado industrial y fácil conexión al microcontrolador, se emplea medir la concentración CO en el aire. Su funcionamiento se basa en un principio de detección electroquímica y está respaldado por un diseño de circuito avanzado (DNA Technology, 2015).

Figura 7

Módulo de sensor de gas ZE03-CO



Nota. adaptado de Módulo de sensor de GAS ZE03-CO, DNA Technology. Fuente: <https://www.dnatechindia.com/ZE-03-CO-Carbon-monoxide-sensor-module-buy-india.html?search=ze03-co>

Características. Bajo consumo, alta precisión, alta sensibilidad, amplio rango lineal, buena capacidad anti interferente, excelente repetibilidad y estabilidad.

Principales aplicaciones. Se utiliza para detectar monóxido de carbono en entornos industriales como la industria petrolera y petroquímica, la metalurgia, la minería y en aplicaciones relacionadas al cuidado del medio ambiente.

Tipo de producto. Electroquímica de sensor de gas

Rango de detección. 0 - 1000ppm

Límite máximo de medición. 1500ppm

Esperanza de vida. 2 años

Sensibilidad. $(0,080 \pm 0,02) \mu\text{A/ppm}$

2.1.2.3. Sensor de Gas de Metano (CH₄). El sensor de gas infrarrojo MH-440D es un sensor inteligente universal en miniatura que utiliza la teoría NDIR (Infrarrojo No Dispersivo) para detectar la concentración de CH₄ en el aire y tiene buena selectividad, rendimiento estable, larga vida útil y además no depende del oxígeno. El sensor de temperatura ambiente se puede utilizar para la compensación de temperatura, el gas se identificó a través del sensor infrarrojo en miniatura se

ha desarrollado integrando de cerca la tecnología avanzada de detección de gas de absorción infrarroja, el aprendizaje de micro máquinas y el diseño de circuito perfecto (DNA Technology, 2015). Por lo cual es conveniente de usar y también reemplaza directamente el componente catalizador, ampliamente utilizado en varios casos con gases inflamables y peligro de explosión.

Figura 8

Sensor de Gas MH-440D



Características.

- Alta sensibilidad, alta resolución, respuesta rápida
- Método de salida: UART, señal de voltaje analógico
- Compensación de temperatura, excelente salida lineal
- Excelente estabilidad, larga vida útil
- Anti- polución, interferencia anti- vapor
- Puede reemplazar el sensor de gas de tipo catalítico directamente

Aplicaciones. Ampliamente utilizado para refrigeración HVAC, monitoreo de aire interior control y protección de procesos industriales agrícolas y ganaderos.

Tipo de producto. Sensor Infrarrojo de gas

Rango de detección. 0 – 5% Vol.

Esperanza de vida. 5 años

Sensor de Gas de Oxígeno (O₂). El sensor de gas ZE03O₂ es de grado industrial y de fácil conexión al microcontrolador, se emplea para la medición de la concentración oxígeno en el aire, basado en principio de detección electroquímica y un diseño de circuito sofisticado (DNA Technology, 2015).

Figura 9

Módulo de sensor de gas ZE03-O2



Nota. adaptado de Módulo de sensor de GAS ZE03-O2, DNA Technology. Fuente: <https://www.dnatechindia.com/ZE-03-O2-oxygen-gas-sensor-module-buy-india.html?search=ZE03-O2>

Características.

- Alta sensibilidad y resolución
- Bajo consumo de energía
- UART y salida de voltaje analógico
- Buena estabilidad y excelente capacidad antiinterferente
- Rango de detección: 0~25%Vol, O2

Aplicaciones. Medición de oxígeno en sectores como la minería, la industria y el cuidado del medio ambiente.

Tipo de producto. Electroquímica de sensor de gas

Rango de detección. 0~25%Vol

Límite máximo de medición. 30%Vol

Esperanza de vida. 2 años

Sensibilidad. (0.08-0.25) mA (En Aire)

2.1.3. Geolocalización

La geolocalización es un elemento de diseño clave de un analizador de gas portátil ya que le permite localizar las concentraciones elevadas de gases. Por lo tanto, es importante comprender claramente los principios de geolocalización, abarcando aspectos como el funcionamiento del sistema de posicionamiento global (GPS), los principios de la triangulación y el proceso de georreferenciación (DNA Technology, 2015).

2.1.3.1. MÓDULO GPS NEO-6M

La serie modular NEO-6 es una línea de receptores GPS autónomos con capacidades de posicionamiento de alto rendimiento. Estos receptores versátiles y rentables ofrecen una variedad de opciones de conectividad en un paquete compacto. Utilizando el módulo GPS U-BLOX NEO-6M que incorpora una memoria EEPROM y una antena GPS, este dispositivo es adecuado para sistemas de control de vuelo que demandan capacidades de posicionamiento por GPS (DNA Technology, 2015).

Figura 10

Módulo GPS NEO-6M



Nota. Elaboración Propia

Características.

- Fuente de voltaje que varía entre 3 y 5 voltios.
- Se conecta mediante una interfaz serial UART con un nivel de voltaje de 5 voltios y tiene una velocidad de transmisión por defecto de 9600bps.
- Está equipado con una antena cerámica para recibir señales, incorpora una memoria EEPROM para almacenar datos de configuración y dispone de una batería de respaldo del tipo MS621FE.
- La frecuencia con la que actualiza su ubicación es de 5 hercios.

2.1.4. IoT (Internet de las cosas)

Este sistema involucra diversas tecnologías, como sensores, que capturan información del mundo real y la convierten en datos digitales; Dispositivos inteligentes que posibilitan el procesamiento de esta información, que se transfiere a plataformas donde se almacena, se procesa y se supervisa, llegando a una interconexión digital (Rios, 2020).

Características. Tenemos a la interconectividad, servicios relacionados con objetos, heterogeneidad, cambios dinámicos y estabilidad (Rios, 2020).

Arquitectura. Presenta 4 capas, la capa de dispositivos está relacionada con el medio físico del dispositivo, los puntos de accesos es una capa fundamental que permiten la conectividad de los dispositivos a internet, el procesamiento de datos capa donde se almacena y analizan los datos y finalmente la capa de aplicación donde se conectan los datos y mostrados a los usuarios (Rios, 2020).

2.1.5. Redes LPWAN

Las redes LPWAN presentan notables atributos, tales como una amplia cobertura, costos reducidos y eficiencia energética, esto asegura la obtención de mediciones en tiempo real necesarias en la supervisión de cultivos y otros procesos industriales; Estas redes operan en bandas de frecuencia con o sin licencia, lo que permite comunicaciones a larga distancia con velocidades de bits más bajas y un alcance considerablemente mayor (Peñaloza & Yupanqui, 2022).

2.1.6. Tecnología de Modulación LoRa (de “largo alcance”)

Método de modulación específica utilizada en las comunicaciones de radio de largo distancia y baja potencia, y no tiene versiones de sí misma, ya que se basa en un enfoque físico de comunicación por radio que emplea técnicas de modulación derivadas de la tecnología de espectro ensanchado basada en tecnología de “chirp” (CSS). El desarrollo de esta tecnología se atribuye a Cycleo (patente 9647718-B2), una empresa con sede en Grenoble, Francia, que posteriormente fue adquirida por Semtech.

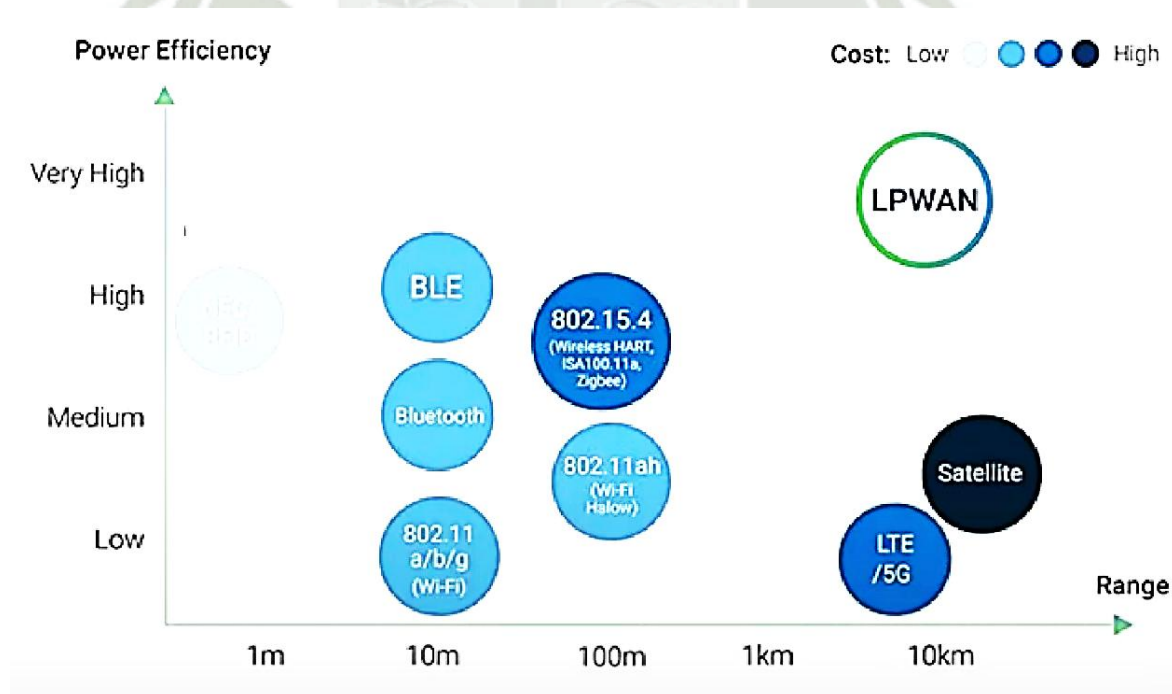
El protocolo LoRaWAN establece las directrices para la comunicación y la estructura del sistema. Cabe destacar que LoRaWAN es un estándar reconocido oficialmente por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), bajo la referencia ITU-T Y.4480. La evolución actual de este protocolo está bajo la administración de la LoRa Alliance, una entidad de naturaleza abierta y sin fines de lucro, cuyo grupo fundador incluye a SemTech (Nossa & Arias, 2020).

En conjunto, LoRa y LoRaWAN definen un protocolo de red de área amplia y bajo consumo (LPWA) que ha sido especialmente concebido para habilitar la conectividad inalámbrica de dispositivos alimentados por baterías con Internet, abarcando tanto redes regionales como globales. Este enfoque satisface la creciente demanda de la Internet de las Cosas (IoT) en áreas como la comunicación bidireccional, la garantía de seguridad extremo a extremo, la movilidad y los servicios de localización. Lo que distingue a esta red es su bajo consumo de energía, la velocidad de bits reducida y su orientación hacia el Internet de las Cosas, en contraste con las redes WAN inalámbricas diseñadas para la conectividad de usuarios o empresas, que requieren mayor potencia y manejan más datos. La velocidad de datos en una red LoRaWAN puede oscilar entre 0,3 kbit/s y 50 kbit/s por canal (Nossa & Arias, 2020).

La tecnología LoRa surgió en 2012 como resultado de los esfuerzos del startup Cycleo, con sede en Grenoble, Francia, y más adelante fue adquirida por Semtech, la empresa que desempeñó un papel fundamental en la fundación de la LoRa Alliance.

Figura 11

Comunicación LoRaWAN vs otras tecnologías de comunicación



Nota. Tomado de (Nossa & Arias, 2020).

2.1.6.1. Definición de LoRa

El nombre “LoRa” proviene de la abreviatura de “Long Range” que denota “Largo Alcance”. Esta tecnología, desarrollada por Semtech, se centra en la Capa 1 del modelo

OSI, que corresponde a la capa física. En esencia, LoRa se caracteriza como una técnica para modular y recibir datos utilizada en dispositivos con baja demanda de energía y una velocidad de transmisión de información reducida (Nossa & Arias, 2020).

2.1.6.2.Características de LoRa

La red LoRa presenta características clave, incluyendo el uso de la modulación de espectro ensanchado de chirp (CSS) en combinación con su funcionamiento en la banda de espectro libre ISM por debajo de 1 GHz., una topología en estrella comúnmente implementada con un Gateway que transmite datos a un servidor, la capacidad de configurar la tasa de bits (máximo de 37.5 Kbps), un alcance de alrededor 2 Km en zonas urbanas y hasta 10 Km en zonas rurales con menos interferencia, costos bajos y la variabilidad de parámetros como ancho de banda (BW), factor de dispersión (SF) y la tasa de codificación (CR) para determinar la velocidad, resistencia a interferencias y ocupación del canal. La sensibilidad del receptor se ve afectada por los parámetros de ancho de banda (BW) y factor de dispersión (SF), y su relación es inversamente proporcional al ancho de banda (BW) y directamente proporcional al factor de dispersión (SF); En topología de malla, se requiere mayor energía, lo que no califica como una red LPWAN de bajo consumo (Nossa & Arias, 2020).

2.1.6.3.Modulación LoRa

El LoRa es una técnica de modulación de espectro ensanchado que se basa en la tecnología Chirp Spread Spectrum (CSS), lo que le permite establecer comunicaciones de largo alcance manteniendo una alta sensibilidad y velocidad en la transmisión de datos. Su funcionamiento se lleva a cabo en ancho de banda constante de 125 KHz o 500 KHz (en el enlace ascendente) y 500 KHz (en el enlace descendente, además de aplicar principios de dispersión ortogonal, lo que resulta en una mayor duración de la batería en los nodos finales y un incremento en la velocidad de transferencia de datos (Peñaloza & Yupanqui, 2022)

Las características específicas de la modulación LoRa están normalizadas para cada región geográfica. Por ejemplo, en América del Norte, se dispone de 64 canales de enlace ascendente de 125 KHz, así como 8 canales de enlace ascendente y descendente de 500 KHz. Las puertas de enlace tienen la capacidad de soportar hasta 64 canales de enlace ascendente de 125 KHz y 8 canales de 500 KHz, y se les denomina “macro puertas de enlace” cuando se aplican en entornos exteriores (Peñaloza & Yupanqui, 2022).

2.1.6.4.LORAWAN

Se trata de un protocolo de comunicación en red que emplea la técnica de modulación LoRa para la administración y transmisión de datos entre dispositivos. Este protocolo consta de dos elementos fundamentales: gateways, que reciben y coordinan información hacia los nodos, y nodos, que son los dispositivos finales encargados de transmitir y recibir datos a través de los gateways (Nossa & Arias, 2020).

2.1.6.4.1. Características de LORAWAN

La Red LORAWAN presenta características distintivas, que abarcan una topología en estrella con uno o varios Gateways y sus respectivos nodos. Integra medidas de seguridad para asegurar la autenticidad, integridad y la privacidad de los datos. Está diseñada para su utilización en dispositivos que funcionan con baterías, independientemente de si son fijos o móviles. Su rango de cobertura varía entre 10 y 15 kilómetros en condiciones de línea de visión y emplea diversos factores de dispersión (SF) en canales de frecuencia con distintos anchos de banda. Para mejorar la eficiencia energética y la capacidad de la red, se aplica una tasa de bits variable y se permite controlar la potencia transmitida a cada nodo, lo que se conoce como Adaptive Data Rate (ADR) (Nossa & Arias, 2020).

2.1.6.4.2. Arquitectura de red de LORAWAN

En una red que utiliza el protocolo LORAWAN, por lo general se establece una configuración de topología en estrella, donde el gateway asume la posición central y los nodos finales ocupan las posiciones periféricas de la red. Además de estos elementos, la red está compuesta por un servidor de red y un servidor de aplicaciones. Específicamente, los nodos finales son responsables de capturar mediciones de las variables ambientales y transmitir esta información codificada al Gateway. El Gateway recibe los datos y los transmite al servidor de red, que se encarga de descifrar la información, administrar la red filtrando paquetes duplicados, llevar a cabo controles de seguridad, programar confirmaciones a través del Gateway y ajustar la velocidad de transmisión de datos según sea necesario. Por último, los datos precisos son enviados al servidor de aplicaciones, donde se interpretan y procesan para facilitar la comprensión por parte del usuario final de la red (Nossa & Arias, 2020).

2.1.6.4.3. Clases de Nodo

LORAWAN presenta tres tipos de nodos: Clase A, Clase B y Clase C. El Nodo Clase A es bidireccional con bajo consumo energético y solo se comunica cuando envía

datos al Gateway, con dos ventanas de recepción. El Nodo Clase B es también bidireccional, pero tiene ventanas de recepción predefinidas con el Gateway, sin necesidad de transmisión previa, y su alimentación puede variar según el tiempo programado. Por otro lado, el Nodo Clase C es el que más consume energía, permaneciendo encendido para recibir información y cerrando la recepción solo durante las transmisiones, lo que resulta en menor latencia entre el nodo y el Gateway (Nossa & Arias, 2020).

2.1.6.4.4. Módulo RYLR993_Lite

El módulo RYLR993_Lite es un dispositivo de comunicación inalámbrica basado en la tecnología LoRa, diseñado para la transmisión de datos a largas distancias con bajo consumo energético. Este componente utiliza frecuencias libres de 868/915 MHz y se comunica mediante la interfaz UART, lo que permite su integración sencilla con microcontroladores como Arduino. Además, emplea comandos AT para su configuración, facilitando la adaptación de parámetros de red y potencia de transmisión. Gracias a su tamaño compacto y eficiencia, resulta adecuado para aplicaciones de Internet de las Cosas, sistemas de monitoreo ambiental, agrícola, industrial y de seguridad, optimizando la conectividad en entornos rurales (Heltec Automation, 2020).

2.1.6.4.5. Características del Módulo

El RYLR993_Lite se distingue por combinar alcance extendido y bajo consumo de energía, lo que lo hace apropiado para proyectos que requieren autonomía prolongada. Incorpora un diseño ligero y versátil, capaz de integrarse en sistemas electrónicos sin demandar gran espacio. Su fiabilidad en la transmisión de datos asegura estabilidad en diversas condiciones ambientales (Nossa & Arias, 2020).

2.1.7. Ventaja de tecnología de modulación LoRa frente a otras tecnologías

La tecnología de modulación LoRa ofrece varias ventajas significativas sobre otras tecnologías de comunicación inalámbrica, especialmente cuando se trata de aplicaciones IoT y aplicaciones de red de área amplia. A continuación, se detallan algunas de las ventajas fundamentales de la tecnología LoRa en la tabla 1:

Tabla 1
Ventajas de la tecnología LoRa

Ventajas	Concepto
Larga distancia de comunicación	LoRa es famoso excepcional rango de transmisión que puede que puede extenderse a varios kilómetros en entornos urbanos y alcanzar distancias de varias decenas de kilómetros en zonas rurales. Esto proporciona una amplia cobertura con menos infraestructura de red y antenas, lo que reduce los costos de implementación.
Capacidad de manejar múltiples dispositivos	La tecnología LoRa permite que miles de dispositivos se comuniquen simultáneamente en la red, lo que hace que la red sea escalable y adecuada para implementaciones a gran escala. Esto es importante para las aplicaciones de IoT que requieren que muchos dispositivos estén conectados y monitoreados en un área grande.
Baja potencia y consumo de energía	La tecnología LoRa hace uso de la modulación de espectro ensanchado y bajo consumo de energía, lo que la hace ideal para aplicaciones IoT y dispositivos que funcionan con baterías.
Penetración en estructuras	Las señales de LoRa pueden atravesar obstáculos como paredes y edificios, mejorando la comunicación en entornos urbanos densos. Esto es especialmente útil en aplicaciones industriales y entornos mineras donde la comunicación interna es fundamental.
Seguridad de la comunicación	La tecnología LoRa utiliza cifrado de extremo a extremo para garantizar una comunicación segura entre los dispositivos y la infraestructura de red. Esto protege los datos que se transportan y asegura la integridad de la información en aplicaciones complejas y sensibles

Nota. Tomado de (Rueda, 2022)

Con la finalidad de sustentar técnicamente la elección de la tecnología LoRa frente a otras alternativas de comunicación inalámbrica utilizadas en sistemas IoT, se presenta a continuación una comparación entre LoRa, Wi-Fi y ASK, considerando criterios como alcance, consumo energético, seguridad y escalabilidad.

Tabla 2

Comparación entre tecnologías de comunicación inalámbrica: LoRa, Wi-Fi y ASK

Característica	LoRa	Wi-Fi	ASK (433 MHz típico)
Alcance	2 – 15 km	30 – 100 m	50 – 300 m
Consumo de energía	10-50 mA al transmitir <1mA en reposo	100-250 mA transmitiendo 15-30 mA en reposo	10-30 mA
Frecuencia	Sub-GHz (433 / 868 / 915 MHz)	2.4 / 5 GHz	315 / 433 MHz
Velocidad de datos	Baja (0.3 – 50 kbps)	Muy alta (Mbps)	Muy baja
Penetración de obstáculos	Excelente	Media – baja	Media
Confiabilidad	Alta (CRC- Comprobación de redundancia cíclica, corrección de errores)	Alta en corto alcance	Baja
Bidireccional	Sí	Sí	Generalmente no
Seguridad	Alta (AES-128) (algoritmo de cifrado avanzado utilizado para proteger datos)	Alta	Muy baja / nula
Topología de red	LPWAN	Red local (LAN)	Punto a punto
Escalabilidad	Alta (muchos nodos)	Media	Muy limitada
Interferencias	Bajas	Altas	Altas
Ideal para sensores	Sí, bajo consumo y largo alcance	No: consumo alto	Solo para señales simples
Uso típico	IoT industrial / monitoreo	Internet, video	Controles remotos

Nota. Elaboración propia

2.1.8. The Things Network (TTN)

Es configura como una red colaborativa y distribuida con una amplia presencia de gateways en todo el mundo, y es utilizada por una amplia comunidad de desarrolladores y empresas para desarrollar aplicaciones con valor agregado. En este proyecto específico, TTN desempeña el papel de servidor de red, asumiendo responsabilidades como la decodificación de datos, la implementación de medidas de

seguridad, la programación de confirmaciones a través del Gateway y, en última instancia, el envío de información precisa al servidor de aplicaciones mediante integraciones. Aunque es posible visualizar mensajes de enlace ascendente y descendente en este servidor de red, no se almacenan allí, por lo que resulta esencial contar con un servidor de aplicaciones. TTN permite su integración con diversas plataformas y facilita la transferencia de datos a sitios web mediante el protocolo HTTP (Nossa & Arias, 2020).

2.1.9. API

Interfaz de Programación de Aplicaciones, se describe como un conjunto de directrices y protocolos que facilitan la interacción y el intercambio de información o funcionalidades entre diversos sistemas informáticos. Funciona como un intermediario que posibilita que las aplicaciones accedan a servicios, recursos o información de otros sistemas de manera estructurada. Las API desempeñan un papel crucial en el ámbito digital al facilitar la interoperabilidad entre aplicaciones y permitir la creación de servicios más complejos al combinar funcionalidades de diversas fuentes. Son esenciales fundamentales en el proceso de creación de aplicaciones y en la interconexión de sistemas en el contexto tecnológico actual. Además, se utilizan tanto en aplicaciones web como en dispositivos móviles y conforman un componente central en la arquitectura de la mayoría de las aplicaciones contemporáneas. (Salesforce, 2023).

2.1.10. AWS IoT para LoRaWAN

Es un servidor de red completamente gestionado que facilita la conexión de dispositivos inalámbricos utilizando el protocolo LoRaWAN a la nube de AWS. Esto permite a los usuarios configurar una red LoRaWAN privada sin la necesidad de desarrollar, mantener o operar su propio servidor de red LoRaWAN (Amazon web services, 2023)

2.1.10.1. Conectividad de dispositivos LoRaWAN

AWS IoT Core para LoRaWAN admite dispositivos compatibles con las normas LoRaWAN 1.0.x o 1.1. Los dispositivos deben pasar por un proceso de activación (OTAA o ABP) antes de enviar datos al servidor de red. Se pueden utilizar tres clases de dispositivos (A, B, C) para equilibrar la escucha de mensajes descendentes y el consumo de batería. Además, AWS IoT Core para LoRaWAN permite la personalización de perfiles de dispositivos para configurar detalles de comunicación (Amazon web services, 2023).

2.1.10.2. Puerta de enlace LoRaWAN y monitoreo de dispositivos

AWS IoT Core para LoRaWAN proporciona una amplia visibilidad de su red, permitiéndole rastrear el estado de dispositivos y puertas de enlace, así como abordar problemas de conectividad. Ofrece datos detallados sobre la condición de las puertas de enlace y los dispositivos, incluyendo metadatos cruciales de la red LoRaWAN a través de mensajes de enlace ascendente (Amazon web services, 2023).

2.1.10.3.Desarrollo de aplicaciones

AWS IoT Core para LoRaWAN simplifica la integración de dispositivos LoRaWAN con servicios en la nube al permitir el enrutamiento automático y la transformación de datos según reglas predefinidas. Facilita la comunicación bidireccional entre dispositivos y aplicaciones en la nube (Amazon web services, 2023).

2.1.11. Industria 4.0

Representa un novedoso modelo industrial que simboliza la Cuarta Revolución Industrial. Este enfoque avanzado se caracteriza por la adopción de tecnologías inteligentes, virtuales y digitales en industrias a gran escala, lo que supone una alteración sustancial en comparación con las revoluciones industriales previas (IntechOpen, 2020).

La industria 4.0 implica una estructura de integración en toda la fábrica y tecnologías potenciales en diversas áreas de la actividad industrial. Estas tecnologías son intrínsecas a los principios de diseño de la industria 4.0, que impulsan la innovación en este nuevo paradigma industrial. El propósito del documento es proporcionar una comprensión sólida de la industria 4.0, su origen y sus principales características, lo que preparará a los lectores para explorar sus diversos potenciales en los capítulos subsiguientes del documento (IntechOpen, 2020).

2.1.12. Automatización y mejora del proceso

En el entorno actual, las organizaciones se ven comprometidas a adaptar sus procesos de producción para ser más flexibles, adaptables y ágiles en tiempo real debido a las cambiantes demandas del mercado. La automatización y la implementación de Fábricas Inteligentes, elementos clave de la "Industria 4.0," surgen como respuestas a este desafío. La digitalización y la interconexión de dispositivos aportan ventajas significativas, como la capacidad de crear modelos virtuales de procesos y la habilidad de analizar datos en tiempo real a través de sensores y el IoT. Cuando una empresa decide invertir en la "Industria 4.0", esto implica cambios en diversos aspectos tecnológicos, procesos de desarrollo de productos, estrategias de marketing, logística, fabricación y servicios posventa, lo que conlleva a ventajas en la mejora de la calidad, mayor

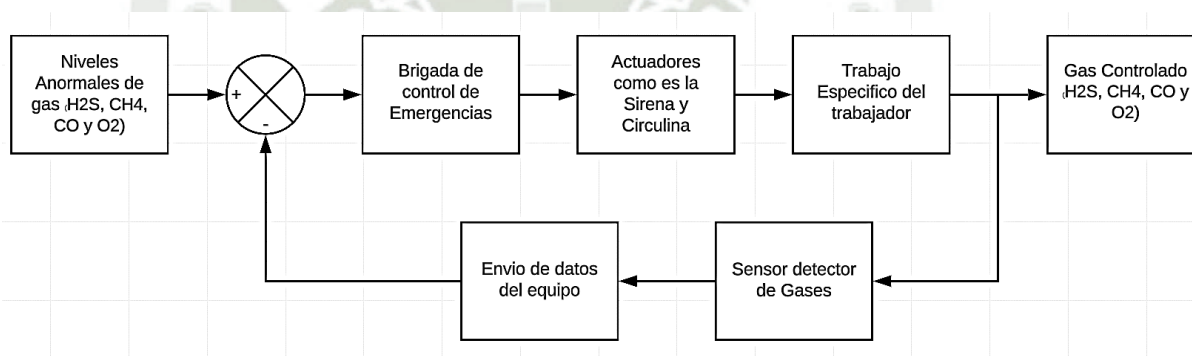
flexibilidad en la producción y la capacidad de reaccionar de manera ágil ante variaciones en la demanda, entre otros beneficios (IntechOpen, 2020).

2.1.12.1. Sistema automático de control de emergencias

Si se detectan gases tóxicos en la mina, es importante contar con un sistema de protección de emergencia automatizado de que pueda alertar a los trabajadores y tomar medidas para mantener a salvo. En consecuencia, resulta fundamental adquirir un conocimiento preciso de los principios del sistema de gestión de crisis incluidos los protocolos de seguridad y las técnicas de respuesta ante crisis (IntechOpen, 2020).

Figura 12

Sistema Automático de Control de emergencias



Nota. Elaboración Propia

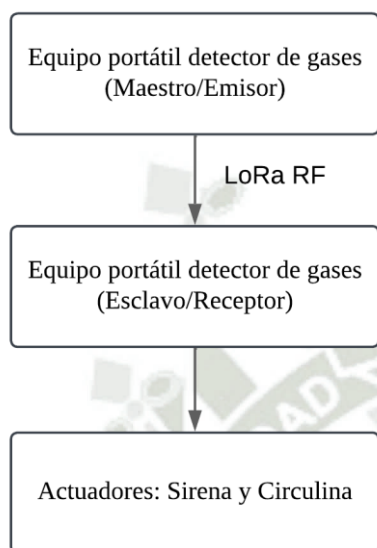
Legislación y normativas:

Es importante conocer las leyes y reglamentos relacionados con la seguridad en el trabajo en la minería y la prevención de riesgos laborales. Esto asegurará que su detector de gas portátil cumpla con los requisitos legales y pueda usarse en minería sin ningún problema.

2.1.13. Esquema conceptual

Figura 13

Comunicación Entre equipos mediante tecnología de Comunicación LoRa



Nota. Elaboración Propia

CAPÍTULO III

DESARROLLO DE INGENIERÍA

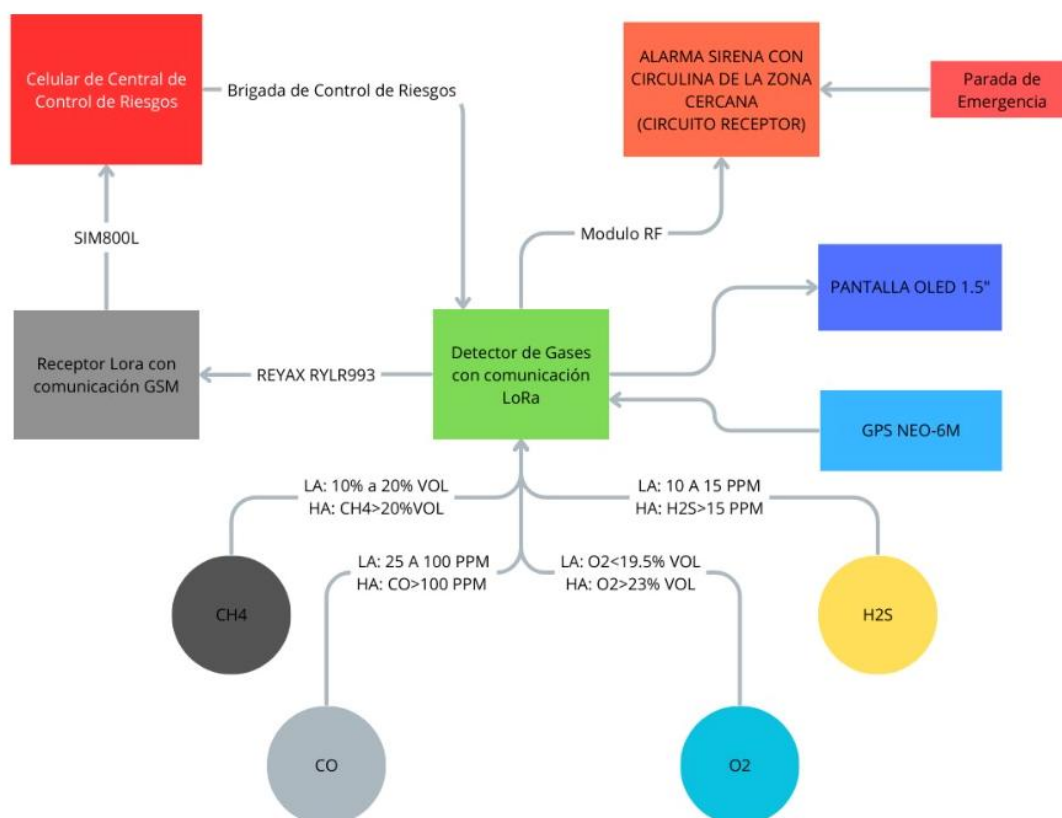
3.1. Diseño del Sistema

3.1.1. Arquitectura General del Sistema

La arquitectura general del sistema está organizada en bloques funcionales que integran tanto la detección de gases como la transmisión y geolocalización de la información. En la Figura 14 se muestra el diagrama que resume la interacción entre sensores, microcontrolador y módulos de comunicación, lo que permite comprender el flujo de datos desde la captura hasta la alerta final.

Figura 14

Diagrama de bloques de la arquitectura general del sistema



Nota. Elaboración Propia

En la etapa de detección, se emplean sensores electroquímicos y de tipo NDIR (Infrarrojo No Dispersivo) para medir concentraciones de H₂S, CH₄, CO y O₂. La elección de estos sensores obedece a su confiabilidad, rango de operación y tiempo de respuesta,

lo cual resulta fundamental en ambientes mineros donde las variaciones de concentración pueden poner en riesgo la seguridad de los trabajadores. Los valores obtenidos son procesados por un microcontrolador, encargado de digitalizar las señales y expresarlas en unidades estándar (ppm y % de volumen). La selección de este dispositivo responde a criterios de eficiencia energética y versatilidad en el manejo de múltiples entradas analógicas, lo que favorece la autonomía del sistema y la estabilidad en la operación.

En la etapa de comunicación y localización, se integran dos tecnologías: el módulo GPS, que proporciona la ubicación precisa del dispositivo en tiempo real, y el módulo LoRa, que asegura la transmisión de datos a largas distancias con bajo consumo energético. La decisión de utilizar LoRa, en lugar de alternativas como Wi-Fi o Bluetooth, se justifica en la necesidad de mantener la comunicación en entornos de difícil acceso o de baja cobertura, donde las tecnologías convencionales presentan limitaciones. Asimismo, se incorpora un módulo GSM (SIM800L), el cual permite enviar notificaciones a través de la red celular indicando las alarmas provenientes del equipo detector portátil de gases, para así poder avisar al personal de emergencias para que pueda ir a resguardar la vida del trabajador.

3.1.2. Diseño del Hardware

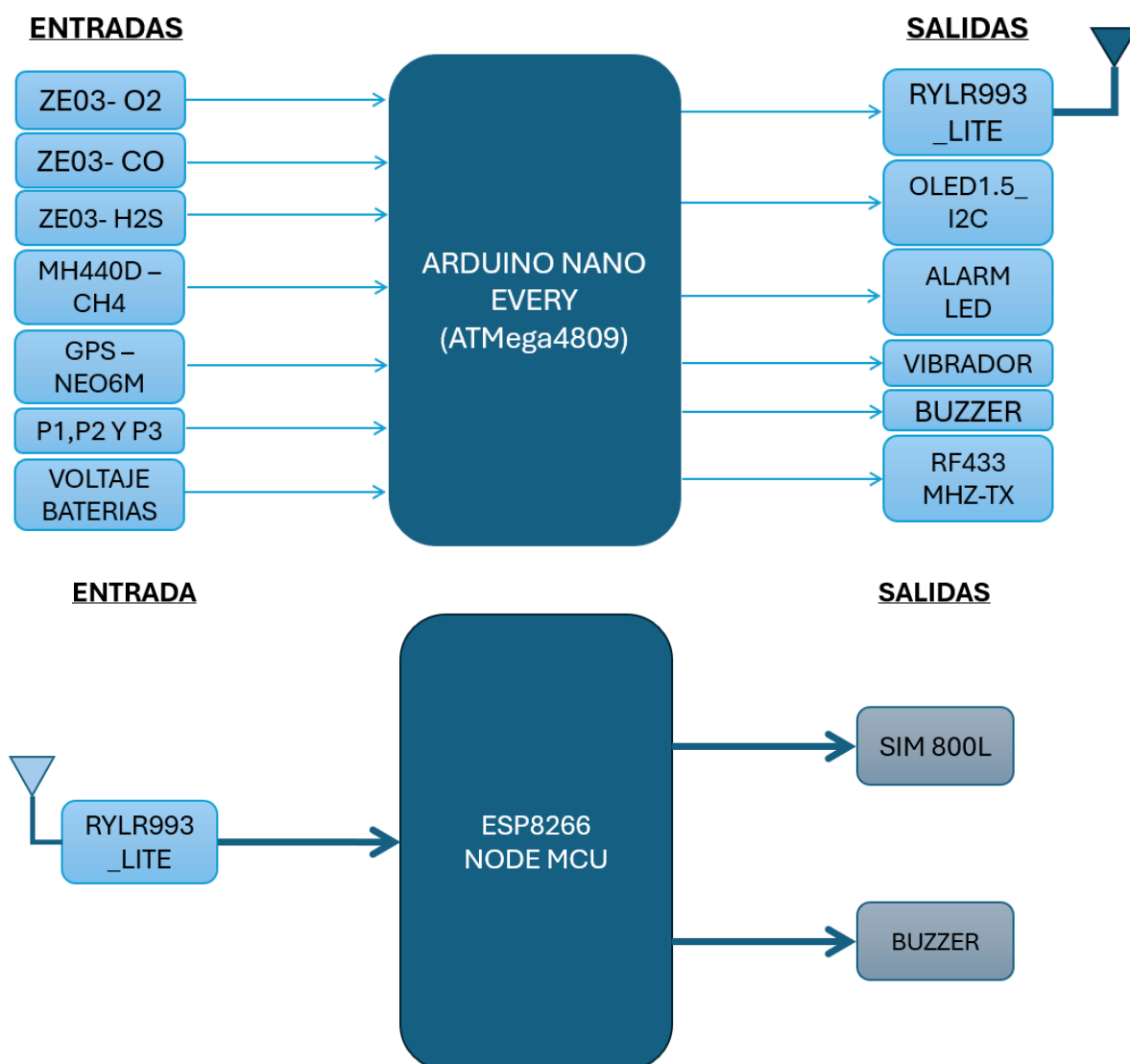
El diseño del hardware del sistema de monitoreo de gases se plantea a partir de la integración de dos bloques principales que permiten la operación conjunta del dispositivo: el transmisor y el receptor. En el primer caso, el circuito transmisor cumple la función de captar las concentraciones de gases mediante un conjunto de sensores, cuyos valores son digitalizados a través de un conversor analógico-digital (ADC). Posteriormente, la información es procesada en un módulo Arduino Nano Every, el cual incorpora también los datos de geolocalización obtenidos mediante el módulo GPS. Una vez consolidada la información, el sistema la transmite de manera inalámbrica utilizando el módulo LoRa, lo que asegura un enlace confiable y de largo alcance en entornos industriales o de difícil acceso.

Por su parte, el circuito receptor se encarga de recibir la información enviada por el transmisor y procesarla a través del microcontrolador ESP8266, que aporta conectividad Wi-Fi y permite la integración con plataformas IoT. De manera complementaria, el receptor se enlaza con un módulo GSM que cumple la función de

generar notificaciones y alertas en tiempo real hacia dispositivos móviles o plataformas remotas, contribuyendo a una respuesta inmediata ante situaciones de riesgo.

Figura 15

Diagrama del circuito electrónico del sistema



Nota. Elaboración Propia

El sistema utiliza una placa de desarrollo Arduino Nano como microcontrolador principal para leer los datos de los sensores de gases a través de un convertidor analógico-digital (ADC). Estos datos serán enviados mediante los módulos de comunicación LoRa. La recepción de los datos estará a cargo de una placa ESP8266, que procesará la información recibida a través de su interfaz serial para su posterior gestión y transmisión

a la plataforma correspondiente. A continuación, se describe cada circuito con mayor detalle.

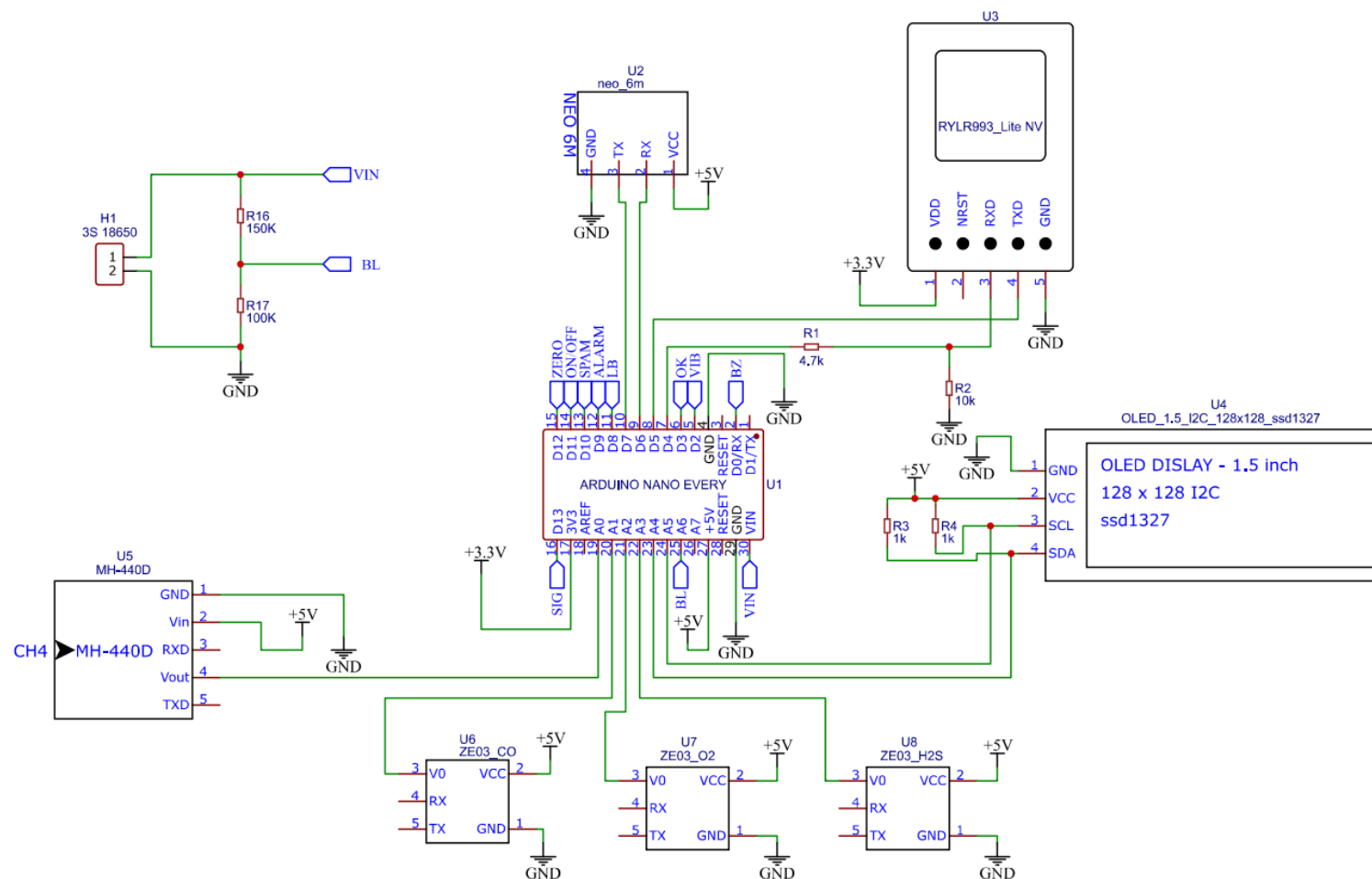
3.1.2.1. Circuito Transmisor

La Figura 16 muestra la disposición de los componentes electrónicos que conforman el nodo principal encargado de la detección y transmisión de datos. El diseño integra sensores de gases, un microcontrolador, módulos de comunicación y visualización, además del sistema de alimentación, los cuales interactúan para garantizar un monitoreo confiable en tiempo real.

En el núcleo del circuito se encuentra el Arduino Nano Every, que actúa como unidad de procesamiento central. Este dispositivo recibe las señales provenientes de los distintos sensores y las procesa para obtener valores de concentración en unidades estándar. Para la medición de gases, se incluyen los siguientes sensores: MH-440D para la detección de metano (CH_4), ZE03-CO para monóxido de carbono, ZE03- O_2 para oxígeno y ZE03- H_2S para sulfuro de hidrógeno. La elección de estos sensores responde a su alta sensibilidad, precisión y facilidad de integración mediante salidas digitales (UART) y analógicas, características que permiten una detección oportuna en ambientes mineros. El sistema incorpora un módulo GPS NEO-6M, cuya función es proporcionar la localización geográfica en tiempo real, de manera que cada lectura de gases quede asociada a una posición específica. Este módulo se comunica directamente con el microcontrolador a través de la interfaz serie, garantizando un bajo consumo y una rápida adquisición de coordenadas. Para la transmisión de datos hacia el receptor se utiliza el módulo LoRa RYLR993, el cual opera en la banda ISM y fue seleccionado debido a su capacidad de alcanzar largas distancias con bajo consumo energético, superando limitaciones de tecnologías convencionales como Wi-Fi o Bluetooth en espacios de difícil acceso. De este modo, se asegura que las concentraciones registradas por los sensores puedan enviarse con confiabilidad hasta la estación base.

Figura 16

Diagrama del circuito transmisor

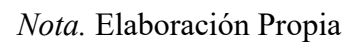


El circuito de la Figura 17 corresponde al subsistema de alarma y señalización, encargado de generar alertas visuales, sonoras y mecánicas ante la detección de condiciones críticas de gases o fallas en el sistema. Su función principal es garantizar que el usuario reciba notificaciones inmediatas y redundantes, tanto en campo como a través de sistemas remotos.

En la parte superior del diagrama se encuentra el conjunto de indicadores LED (LED1-LED4) asociados a resistencias limitadoras, controlados mediante un contador CD74HC4017E, el cual permite activar las salidas de forma secuencial. Este circuito integrado se conecta a un optoacoplador CT817B, encargado de aislar y accionar la salida ALARM, que puede enlazarse con dispositivos externos de mayor potencia, como sirenas o sistemas de paro de emergencia. Adicionalmente, se incluyen los indicadores LED5 (ámbar) y LED6 (verde), los cuales cumplen la función de mostrar el estado del sistema (alerta y operación correcta, respectivamente). En la parte inferior se observa la sección de actuadores de señalización física. Se integra un motor vibrador de 3 V, controlado por un MOSFET de potencia IRLZ44NPBF, que genera una alerta háptica para aplicaciones portátiles. Asimismo, se incluye un buzzer piezoeléctrico (12×9 mm), también controlado por un MOSFET, que emite una señal acústica de alta intensidad. La combinación de vibración y sonido asegura la percepción de la alarma incluso en entornos con ruido ambiental elevado.

El circuito también incorpora un conjunto de pulsadores (ZERO, ON/OFF y SPAM), asociados a resistencias pull-up de $10\text{ k}\Omega$, que permiten al usuario realizar operaciones de reinicio, encendido/apagado y pruebas del sistema. Estas entradas garantizan la interacción directa con el equipo en situaciones de mantenimiento o verificación de funcionamiento. Finalmente, se incluye un módulo transmisor RF433 destinado al envío de la señal de alarma a otros dispositivos receptores en la misma frecuencia, lo que amplía la cobertura del sistema y permite la integración con unidades adicionales de monitoreo o con centrales de control de riesgos.

Circuito de Alarma y Señalización del Sistema



El circuito receptor, cuyo diagrama se muestra en la Figura 18, se compone de los siguientes módulos:

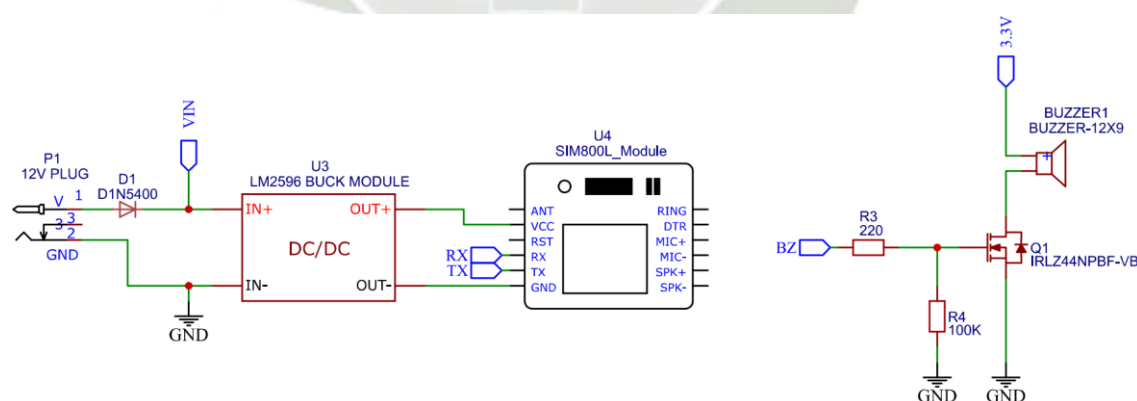
- **Módulo de recepción LoRa:** Este módulo utiliza un módulo LoRa RYL993_Lite idéntico al utilizado en el circuito transmisor para recibir los datos provenientes de los dispositivos transmisores.
- **Microcontrolador ESP8266:** Este microcontrolador se encarga de recibir los datos del módulo LoRa y enviarlos a la plataforma IoT para su almacenamiento y visualización. Se eligió el ESP8266 por su bajo costo y su conectividad Wi-Fi, que permite una fácil integración con la plataforma IoT.

Al igual que el circuito transmisor, el circuito receptor incluye componentes pasivos como resistencias y condensadores que aseguran la estabilidad y el correcto funcionamiento del circuito.

El circuito mostrado en la Figura 19 corresponde al módulo de comunicación GSM y alerta sonora, cuya función es enviar notificaciones a distancia mediante red celular y, de manera complementaria, generar un aviso acústico local.

Figura 19

Circuito de Comunicación GSM y Alerta Sonora



Nota. Elaboración Propia

La alimentación del sistema se realiza a través de una entrada de 12 V regulada por un módulo LM2596 (buck converter), el cual reduce y estabiliza la tensión de entrada para adecuarla a los requerimientos del módulo SIM800L. Previamente, se incorpora un diodo D1N5400 que actúa como protección contra inversión de polaridad. El SIM800L

constituye el núcleo de comunicación, permitiendo el envío de mensajes de texto o llamadas a una central de control de riesgos o a un dispositivo móvil. Este módulo fue seleccionado por su bajo costo, amplio soporte y compatibilidad con redes GSM, características que lo convierten en una solución eficiente para garantizar la transmisión de alertas en tiempo real, incluso en zonas sin cobertura de tecnologías como LoRa. De manera complementaria, el circuito integra un buzzer piezoeléctrico, controlado por un transistor IRLZ44NPBF-VB en configuración de conmutación, acompañado de resistencias que aseguran el correcto polarizado de la base. Este componente emite una señal acústica que refuerza la advertencia en campo, proporcionando redundancia en la notificación al usuario.

El diseño del circuito asegura una doble vía de alerta: por un lado, la comunicación remota a través de la red GSM, y por otro, la señalización local mediante el buzzer, aumentando la confiabilidad y eficacia del sistema en situaciones de riesgo.

3.1.2.2.2. Circuito receptor alarma - sirena

El circuito mostrado en la Figura 20 corresponde al módulo receptor encargado de activar la alarma sonora y visual en caso de detección de gases o condiciones críticas. Su funcionamiento se basa en la recepción de una señal inalámbrica mediante el módulo RF de 433 MHz (U2), el cual transmite la orden de activación hacia el microcontrolador Arduino Nano (U1).

La etapa de alimentación está compuesta por una fuente de 12 V DC y el módulo MT3608, que junto con los diodos de protección 1N4007, aseguran una correcta regulación de tensión y protección frente a inversión de polaridad. El Arduino Nano procesa la señal recibida desde el módulo RF y controla la activación de la sirena a través de un transistor MOSFET de potencia IRLB3034PBF (Q1), el cual permite conmutar la carga de mayor corriente correspondiente a la circulina con sirena (P4). De esta manera, el microcontrolador no se ve afectado por el consumo elevado del sistema de alarma.

Además, se incluye un pulsador de paro de emergencia (P3) con resistencia de pull-down, el cual permite al operador desactivar manualmente el sistema en caso de ser necesario, añadiendo una capa extra de seguridad operativa.

Diagrama del circuito receptor alarma - sirena

Nota. Elaboración Propia

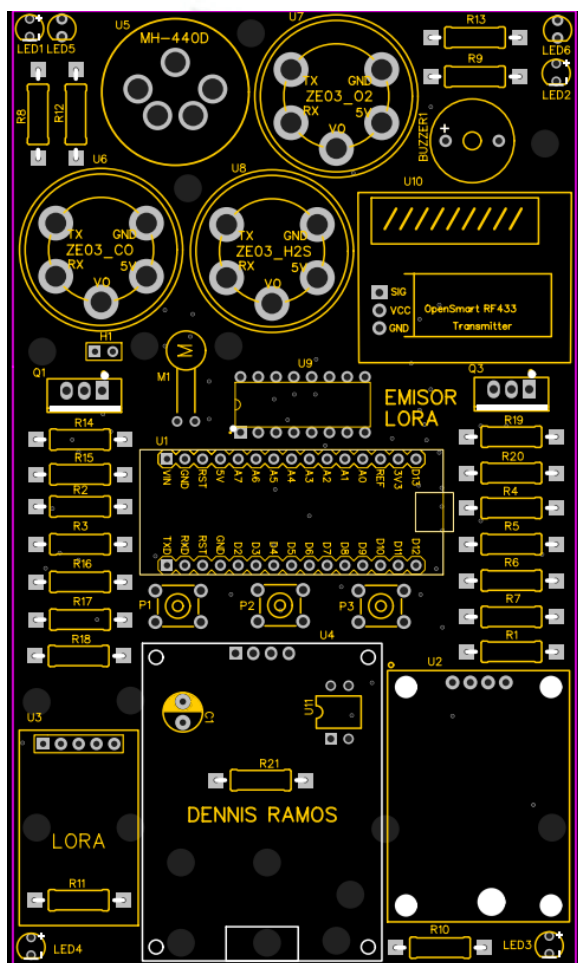
En el marco del desarrollo del sistema de monitoreo propuesto, la tarjeta receptora constituye uno de los dos bloques principales que permiten la funcionalidad completa del equipo. Mientras el módulo transmisor realiza la detección de gases y la geolocalización en campo, el receptor se encarga de recibir los datos enviados por LoRa, procesarlos y transmitirlos a una plataforma digital mediante conexión Wi-Fi. Este módulo fue diseñado tomando en cuenta la necesidad de una recepción robusta, de bajo consumo

energético y compatible con plataformas IoT, permitiendo la visualización remota de información ambiental relevante para la toma de decisiones ante una emergencia.

El diseño del PCB del transmisor integra en una sola tarjeta todos los elementos necesarios para la detección y envío de información (Ver Figura 21).

Figura 21

Diseño del PCB del Módulo Transmisor de datos

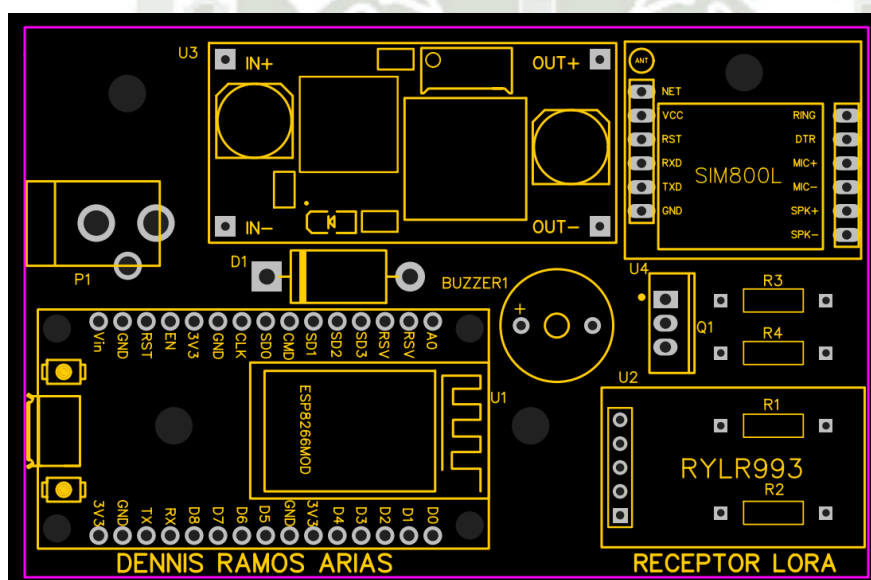


Nota. Elaboración Propia

En su parte principal se ubican los sensores de gases (CH_4 , O_2 , CO y H_2S), conectados al microcontrolador Arduino Nano Every, el cual procesa las señales y las convierte en valores digitales de concentración. El PCB también incluye el módulo LoRa para la transmisión de datos a largas distancias, el módulo GPS NEO-6M para registrar la ubicación, y una pantalla OLED para mostrar la información en tiempo real. Además, incorpora un buzzer y un motor vibrador como mecanismos de alerta local, controlados

El PCB receptor (Ver Figura 22) está orientado a la recepción de datos provenientes del transmisor y su posterior retransmisión hacia la nube y la red celular.

Diseño del PCB de la tarjeta receptora LoRa con comunicación GSM

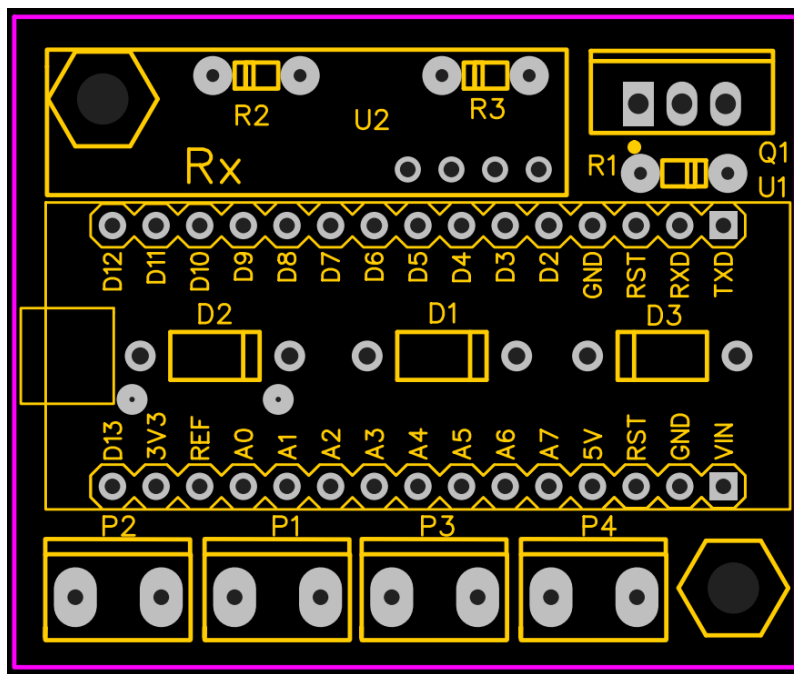


Se centra en el módulo LoRa RYLR993, encargado de recibir las concentraciones de gases y la ubicación GPS, los cuales son procesados por el ESP8266 (NodeMCU). Este microcontrolador se seleccionó por su compatibilidad con Arduino Cloud, lo que permite visualizar los datos en tiempo real en un dashboard en la nube. Adicionalmente, el PCB integra el módulo GSM SIM800L, que actúa como canal de respaldo para enviar alertas a teléfonos móviles en caso de que la red LoRa no esté disponible. El diseño incluye también un buzzer de aviso, encargado de reforzar la notificación local al personal de control de riesgos. Para la alimentación, el circuito utiliza un módulo convertidor de voltaje que adapta la entrada de 12 V a los niveles requeridos por los componentes, asegurando estabilidad y operación continua en un punto fijo con energía disponible.

Este PCB (Ver Figura 23) corresponde al receptor encargado de activar la sirena y la circulina como alerta local ante niveles críticos de gases.

Figura 23

Diseño del PCB de la tarjeta receptora alarma - sirena



Nota. Elaboración Propia

El diseño se basa en un módulo RF de 433 MHz, que recibe la señal desde el transmisor portátil y la envía al Arduino Nano, encargado de gestionar la lógica de activación. La etapa de potencia incluye un MOSFET que conmuta la corriente necesaria para encender la sirena, protegido con diodos para evitar corrientes inversas. El circuito contempla dos modos de alimentación: mediante una fuente estable de 12 VDC o a través de un módulo elevador MT3608, que permite operar el sistema en lugares donde no existe disponibilidad de red eléctrica de 220 V. Asimismo, incorpora un pulsador de parada de emergencia, que puede ser accionado únicamente por personal autorizado para detener manualmente la alarma en caso necesario.

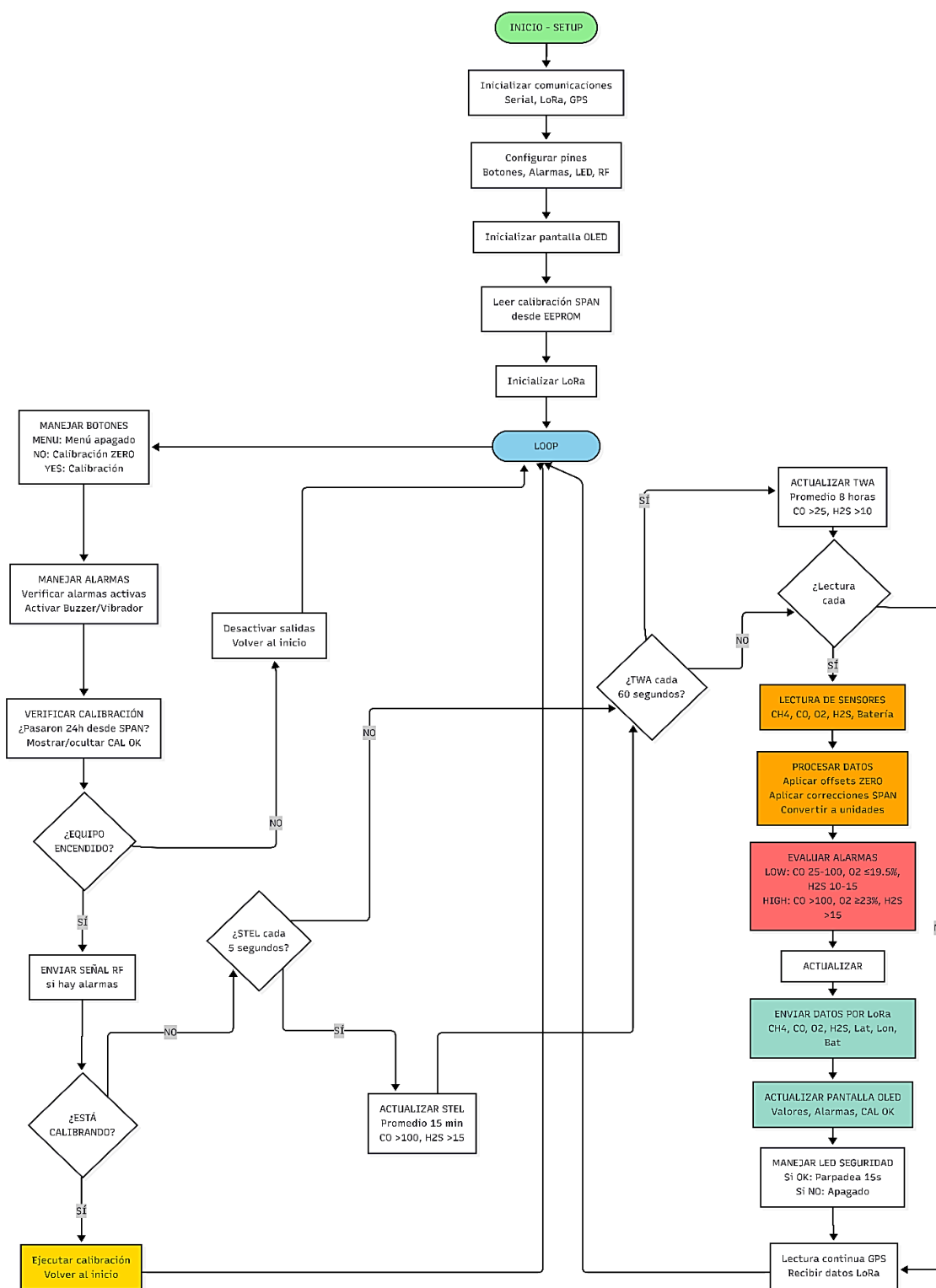
3.1.3. Diseño del Software

Se desarrollará un firmware para la placa Arduino Nano Every utilizando el lenguaje de programación C++. El firmware se encargará de leer los datos de los sensores de gases, procesarlos y transmitirlos a la estación base a través del módulo LoRa.

También se implementará un algoritmo de control de emergencias que activará una alarma si se detectan niveles peligrosos de gases.

Figura 24

Diagrama de flujo del firmware de los sensores de gases



Nota. Elaboración Propia

3.2. Selección de Componentes

La selección de componentes se basó en criterios técnicos: precisión de medición, eficiencia energética, capacidad de procesamiento, costo y disponibilidad comercial, para garantizar funcionamiento confiable en entornos industriales. Se priorizaron dispositivos compatibles con IoT y monitoreo continuo. Los sensores de gases se eligieron por su capacidad para detectar H_2S , CH_4 , CO y O_2 en rangos relevantes para ambientes mineros, con tiempos de respuesta adecuados y estabilidad en condiciones exigentes.

3.2.1. Comparativa de unidades de control

Tabla 3

Comparativa entre Arduino Nano, Arduino Nano Every y ESP8266

Característica	Arduino Nano	Arduino Nano Every	ESP8266
Microcontrolador	ATmega328P	ATmega4809	ESP8266
Memoria Flash	32 KB	48 KB	4 MB (externa)
RAM	2 KB	6 KB	80 KB
Velocidad de Procesamiento	16 MHz	20 MHz	80-160 MHz
Pines Digitales	14	14	17
Compatibilidad Física	Estándar	100% compatible	Diferente formato
Aplicación en el Sistema	Equipo de Alarma	Detector Portátil	Receptor LoRa/GSM

Nota. Elaboración propia

Selección: Arduino Nano Every para Equipo Portátil Detector de Gases

Justificación: Se optó por el Arduino Nano Every porque incorpora el microcontrolador ATmega4809, que ofrece:

- Mayor capacidad de memoria: 48 KB de Flash y 6 KB de RAM (vs 32 KB y 2 KB del Nano estándar)
- Mayor velocidad de procesamiento: 20 MHz vs 16 MHz
- Mejor gestión de la programación: facilita la integración de múltiples sensores, módulos LoRa, GPS y rutinas de control
- Compatibilidad física: mantiene el formato Nano, facilitando la integración sin modificaciones estructurales

Estas características permiten integrar múltiples sensores, módulos LoRa, GPS y rutinas de control sin comprometer la estabilidad del sistema.

Selección: Arduino Nano para Equipo de Alarma de Evacuación

Justificación: Para el equipo de alarma con sirena y circulina se seleccionó el Arduino Nano estándar porque:

- No requiere mayor potencia de procesamiento
- Las funciones son más simples: activación de alarmas y control básico
- Menor costo sin sacrificar funcionalidad
- Suficiente capacidad para las tareas requeridas

3.2.2. Comparativa de módulos de comunicación

Tabla 4

Comparativa entre módulos de comunicación

Característica	Arduino Nano + Módulo GSM	ESP8266 + SIM800L
Procesador	ATmega328P (16 MHz)	ESP8266 (80-160 MHz)
Comunicación WiFi	No integrada	Integrada (802.11 b/g/n)
Comunicación GSM	Requiere módulo externo	SIM800L compatible
Integración Arduino Cloud	Limitada	Excelente compatibilidad
Protocolos IoT	Básicos	MQTT, HTTP, TCP/IP nativos
Fiabilidad GSM	Depende del módulo	Alta con SIM800L
Aplicación	No seleccionado	Circuito Receptor LoRa/GSM

Nota. Elaboración propia

Selección: ESP8266 para Circuito Receptor LoRa con Comunicación GSM

Justificación: Se escogió el ESP8266 porque:

- Mayor adaptabilidad con Arduino Cloud: integración nativa y simplificada con servicios IoT
- Mayor fiabilidad para comunicación GSM: mejor gestión de protocolos y manejo de errores
- Capacidades integradas: WiFi integrado permite comunicación dual (GSM + WiFi)

- Protocolos IoT nativos: soporte para MQTT, HTTP y TCP/IP sin librerías adicionales complejas
- Compatibilidad con SIM800L: excelente integración con el módulo GSM seleccionado

3.2.3. Componentes adicionales del sistema

Tabla 5

Componentes adicionales NEO-6M, SIM800L Y Modulo LoRa (Reyax)

Componente	Modelo Seleccionado	Aplicación	Características Principales
Módulo GPS	NEO-6M	Equipo Portátil Detector	• Precisión: ~ 2.5 m (CEP) • Frecuencia de actualización: 1 Hz • Bajo consumo energético • Comunicación UART
Módulo GSM	SIM800L	Circuito Receptor LoRa/GSM	• Banda: Quad-band (850/900/1800/1900 MHz) • Protocolos: GPRS, SMS, voz • Bajo consumo • Compatible con ESP8266
Comunicación LoRa	Módulo LoRa (Reyax)	Equipo Portátil y Receptor	• Alcance: ≤ 5 km (línea de vista) • Bajo consumo energético • Ideal para transmisión a larga distancia

Nota. Elaboración propia

3.2.4. Resumen de selecciones por equipo

Tabla 6

Resumen de selecciones por equipo

Equipo	Unidad de Control	Módulos de Comunicación	Justificación Técnica
Equipo Portátil Detector de Gases	Arduino Nano Every	• Módulo LoRa (transmisión) • GPS NEO-6M (geolocalización)	Requiere mayor capacidad de procesamiento para múltiples sensores, comunicación simultánea LoRa y GPS, y rutinas de control complejas

Equipo de Alarma de Evacuación	Arduino Nano	•Receptor RF (recepción)	Funciones simples de activación de alarmas no requieren mayor potencia de procesamiento
Circuito Receptor LoRa/GSM	ESP8266	•Módulo LoRa (recepción) • SIM800L (comunicación GSM)	Mayor adaptabilidad con Arduino Cloud y mayor fiabilidad para comunicación GSM, con capacidades IoT integradas

Nota. Elaboración propia

La selección de componentes se realizó mediante un análisis comparativo que consideró las necesidades específicas de cada subsistema:

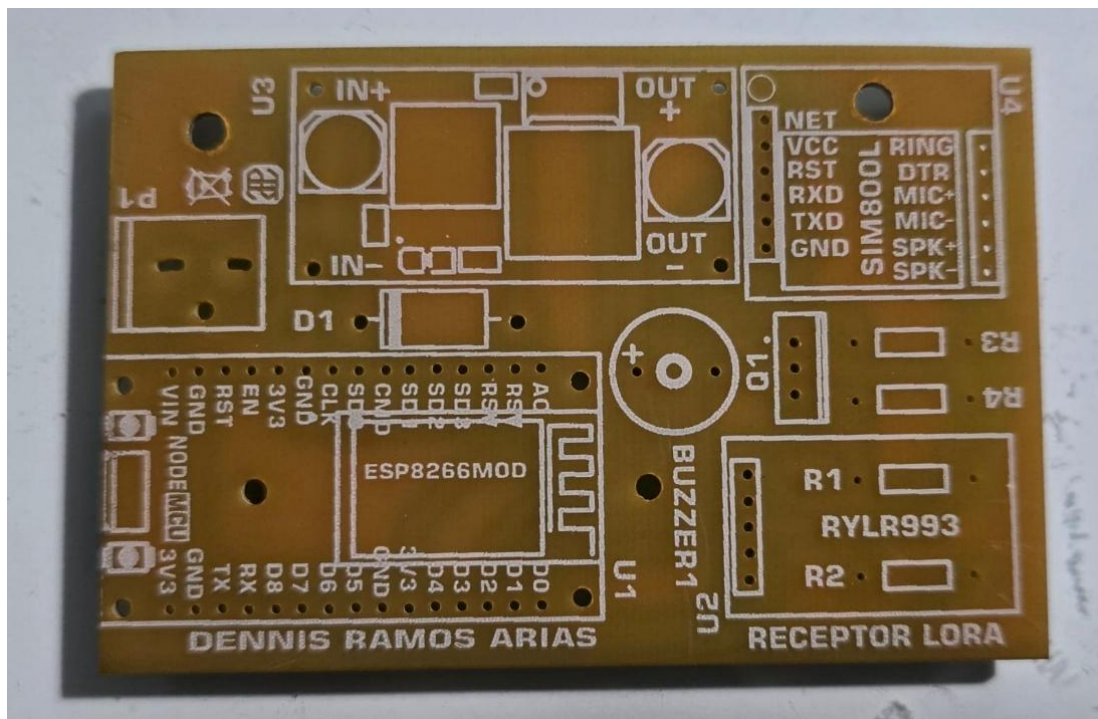
- Equipo Portátil: Requiere procesamiento intensivo → Arduino Nano Every con GPS NEO-6M
- Equipo de Alarma: Funciones simples → Arduino Nano estándar
- Receptor LoRa/GSM: Necesita integración IoT y fiabilidad GSM → ESP8266 con SIM800L

Esta estrategia optimiza el costo-beneficio, asignando recursos de procesamiento donde son necesarios y utilizando componentes más económicos donde las funciones son más simples, garantizando un funcionamiento confiable en entornos industriales mineros. Asimismo, se seleccionaron módulos de comunicación inalámbrica y geolocalización que aseguran transmisión confiable de datos a larga distancia y bajo consumo energético, en concordancia con los requerimientos del sistema automático de control de emergencias propuesto.

3.3. Proceso de la fabricación de tarjetas

La fabricación de las tarjetas PCB corresponde a una fase técnica importante dentro del desarrollo del equipo. A partir de los esquemas generados digitalmente, se construyeron las placas que permiten integrar los módulos transmisor y receptor en una estructura organizada y funcional. El proceso incluyó el diseño de rutas eléctricas, la disposición de componentes, la perforación para pines y la aplicación de máscaras de soldadura. Se priorizó una distribución adecuada de los elementos para asegurar conexiones estables entre sensores, microcontroladores y módulos de comunicación.

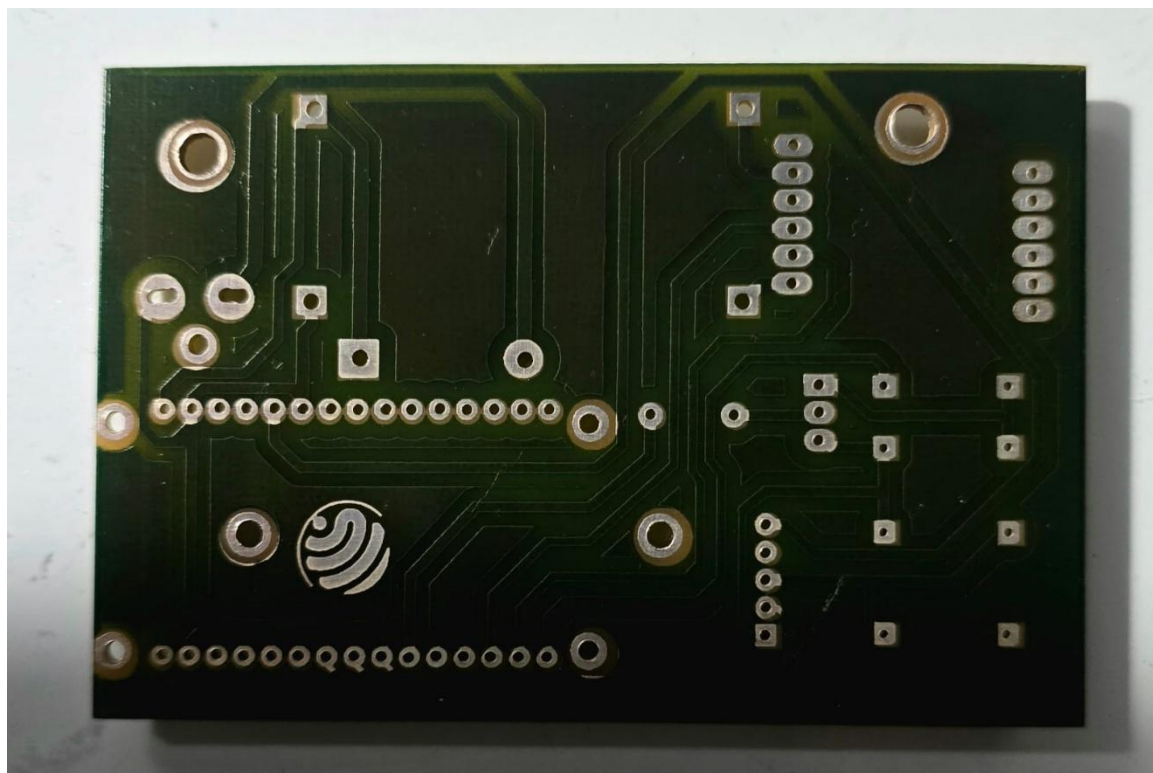
Diseño físico del módulo receptor



Nota. Elaboración Propia

La figura 25 muestra la vista superior de la tarjeta del módulo receptor. Se ha dispuesto el espacio para el microcontrolador ESP8266MOD y el módulo LoRa RYLR993_LITE, junto a componentes pasivos que permiten adaptar las señales. La organización de los pines facilita el montaje y el cableado. Este módulo se encarga de recibir los datos transmitidos desde el equipo portátil y reenviarlos hacia una plataforma en la nube.

En esta vista se observan las pistas que conectan los distintos elementos del circuito receptor. La distribución permite mantener la continuidad de señales y voltajes sin interferencias, y los puntos de soldadura visibles corresponden a los pines de conexión. El diseño fue planteado para lograr un montaje preciso y una lectura confiable de los datos recibidos.

Figura 26*Vista posterior del diseño físico del módulo receptor**Nota. Elaboración Propia*

La figura 27 muestra el diseño físico de la placa del módulo transmisor, fabricada para integrar los distintos componentes encargados de la captura, procesamiento y envío de datos del sistema portátil. En la parte superior se observa el espacio destinado para los sensores de gases (H_2S , CO , CH_4 y O_2), alineados en la zona frontal para una mejor exposición al entorno.

En el centro de la tarjeta se ubica el microcontrolador, encargado de recibir las señales de los sensores y coordinar la comunicación con los demás módulos. En la parte inferior derecha se encuentra la zona de montaje del módulo GPS NEO-6M, que permite registrar la ubicación geográfica del equipo en tiempo real. Junto a este, se incluye un display OLED que proporciona una visualización local de los valores detectados. El módulo LoRa RYLR993 se posiciona en una esquina para facilitar la conexión de la antena externa, mejorando el alcance de la transmisión inalámbrica. La placa ha sido diseñada con una distribución eficiente de componentes y rutas de conexión, permitiendo

un ensamblaje funcional en espacios reducidos y asegurando un desempeño estable en condiciones operativas reales.

Figura 27

Diseño físico del módulo transmisor

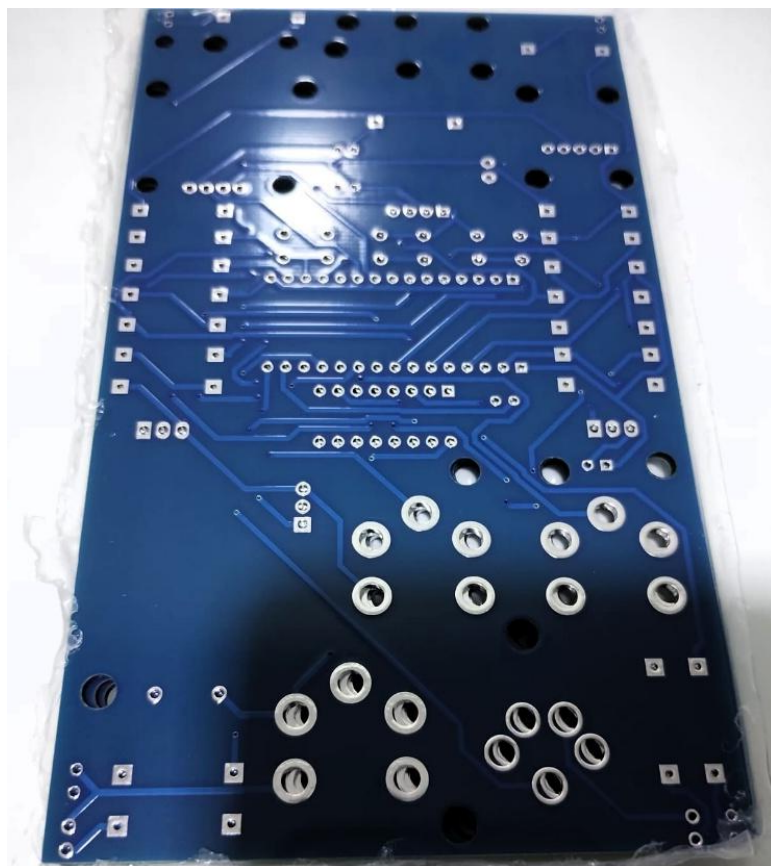


Nota. Elaboración Propia

La figura 28 corresponde al reverso de la tarjeta del módulo transmisor. Las pistas de cobre permiten la conexión entre sensores, botones, microcontrolador y el módulo de comunicación. La separación entre rutas de datos y alimentación contribuye a mantener una señal limpia y sin interferencias en el funcionamiento del sistema.

Figura 28

Vista posterior del diseño físico del transmisor



Nota. Elaboración Propia

3.4. Sistema de geolocalización

Se decidió utilizar el lenguaje de programación C++ para el desarrollo del firmware de la placa Arduino Nano Every, ya que ofrece eficiencia y flexibilidad en la gestión de recursos de hardware. A continuación, se detalla el proceso de desarrollo del firmware, explicando cada etapa y su importancia en el funcionamiento del sistema:

3.4.1. Inicialización de los componentes

Al encender el dispositivo, el firmware inicia un proceso de configuración de los componentes de hardware. Este proceso incluye:

- **Configuración de los pines GPIO:** Se establecen los pines de la placa Arduino Nano Every que se conectan a los sensores de gases, el módulo GPS y el módulo LoRa. Se definen los pines como entrada o salida según su función.

- **Inicialización de la comunicación serial:** Se configura la comunicación serial para la interacción con el módulo GPS y el módulo LoRa. Se establecen los parámetros de velocidad de transmisión (baud rate) y otros ajustes necesarios.
- **Configuración de los sensores:** Se inicializan los sensores de gases de acuerdo con las especificaciones del fabricante. Esto puede incluir el ajuste de parámetros de calibración o el establecimiento de rangos de medición.
- **Inicialización del módulo GPS:** Se configura el módulo GPS para la obtención de la ubicación. Se establecen los parámetros de frecuencia de actualización y otros ajustes relevantes.
- **Configuración del módulo LoRa:** Se configura el módulo LoRa para la comunicación con la estación base. Se establecen los parámetros de frecuencia, la potencia de transmisión y otros ajustes de la red LoRaWAN.

3.4.2. Lectura de los sensores de gases

Una vez inicializados los componentes, el firmware procede a la lectura de los datos de los sensores de gases. Para ello, se utiliza el convertidor analógico-digital (ADC) integrado en la placa Arduino Nano Every. El ADC convierte las señales analógicas de los sensores en valores digitales que pueden ser procesados por el microcontrolador

3.4.3. Conversión a valores de concentración

Las lecturas digitales del ADC se convierten a valores de concentración de gases utilizando fórmulas específicas para cada sensor. Estas fórmulas se obtienen de las hojas de datos de los sensores y relacionan los valores digitales con las unidades de concentración correspondientes (ppm o porcentaje de volumen).

A continuación, se presentan las fórmulas de conversión para cada gas:

CONVERSIÓN BASE (ADC → VOLTAJE):

$$\text{voltage} = (\text{valor_raw} \times 5.0) / 1023.0$$

CH4 (%LEL):

$$\text{voltage_corregido} = \text{voltage} - \text{offset_CH4}$$

$$\text{CH4_PERCENTVOL} = (\text{voltage_corregido} - 0.4) / 0.804 \times 50.0$$

CO (ppm):

$$\text{voltage_corregido} = \text{voltage} - \text{offset_CO}$$

$$\text{co_ppm} = (\text{voltage_corregido} - 0.690) / 0.0024 \times \text{span_gain_CO}$$

$$\text{CO_PPM} = \text{round}(\text{co_ppm})$$

$$\text{Si } -5 < \text{CO_PPM} < 5: \text{CO_PPM} = 0$$

O2 (%):

$$\text{voltage_corregido} = \text{voltage} - \text{offset_O2} - \text{span_offset_O2}$$

$$\text{O2_PERCENTVOL} = 16.667 \times (1.5 - \text{voltage_corregido})$$

$$\text{O2_PERCENTVOL} = \text{round}(\text{O2_PERCENTVOL} \times 10.0) / 10.0$$

H2S (ppm):

$$\text{voltage_corregido} = \text{voltage} - \text{offset_H2S}$$

$$\text{Si SPAN: voltage_corregido} = 0.645 + (\text{voltage_corregido} - 0.645) \times \text{span_gain_H2S}$$

$$\text{H2S_PPM} = \text{round}((\text{voltage_corregido} - 0.645) \times 41.6667)$$

$$\text{Si H2S_PPM} < 3: \text{H2S_PPM} = 0$$

VALORES DE REFERENCIA DE LOS SENSORES

CO (ZE-03):

- Voltaje a 0 ppm: 0.690V
- Sensibilidad: 0.0024V/ppm
- Offset ZERO: voltage_promedio - 0.690V
- Factor ganancia SPAN: 60 ppm / ppm_medido_en_SPAN

O2:

- Voltaje a 0% O2: 1.5V
- Voltaje a 25% O2: 0V
- Voltaje a 20.8% O2 (aire): 0.252V
- Voltaje a 15% O2 (SPAN): 0.6V
- Offset ZERO: voltage_promedio - 0.252V
- Offset SPAN: voltage_promedio_SPAN - 0.6V

H2S (ZE-03):

- Voltaje a 0 ppm: 0.645V
- Sensibilidad: 0.024V/ppm (1/41.6667)
- Voltaje a 20 ppm: 1.125V
- Offset ZERO: voltage_promedio - 0.645V
- Factor ganancia SPAN: 0.48 / (voltage_SPAN_corregido - 0.645)

CH4:

- Voltaje a 0% LEL: 0.4V
- Voltaje a 50% LEL: 1.204V

Estas fórmulas se implementan en el firmware del Arduino Nano Every para convertir las lecturas de los sensores en valores de concentración que puedan ser interpretados y utilizados para la toma de decisiones.

3.4.4. Obtención de la ubicación GPS

El firmware se comunica con el módulo GPS a través de la interfaz serial para obtener la ubicación del dispositivo. Se decodifican los datos recibidos del módulo GPS para extraer la latitud, la longitud y otros datos relevantes de la posición.

3.4.5. Transmisión de datos a la estación base

La transmisión de datos hacia la estación base se realiza a través del módulo LoRa RYLR993_LITE, que permite enviar tanto los valores de concentración de gases como la ubicación del dispositivo en tiempo real. Estos datos son empaquetados en un mensaje que viaja por la red de largo alcance LoRa, asegurando una comunicación confiable incluso en escenarios de difícil cobertura, como se muestra en el código de transmisión:

```
// Verifica si la interfaz está disponible.
AT
// El valor predeterminado es 0 (modo LoRaWAN).
// En este proyecto se usa el modo propietario, por lo tanto
"AT+OPMODE=1".
AT+OPMODE=1 --> 1 : modo propietario , 0 : modo LoRaWAN

// Obtiene o verifica el modo de operación.
AT+OPMODE=?

// Configura la frecuencia central de la banda inalámbrica. El
transmisor y el receptor deben usar la misma frecuencia para
comunicarse entre sí.
// El valor predeterminado es 915000000Hz.
AT+BAND=915000000 --> Alianza LoRa para la región de America (plan
de frecuencias): 915 MHz (US915). Ver "AT+BAND - Active region" en
el archivo "RYLR993_AT_Command.pdf" para otras regiones.

// Verifica la banda de frecuencia actual.
AT+BAND=?

// Establece la dirección ID del módulo LoRa.
(Maestro) :
- AT+ADDRESS=1 --> 0~65535(default 0). Cuando la <Address> es 0,
Este enviará datos a todas las direcciones (Desde 0 hasta 65535).
- AT+SEND=2,36, Este mensaje es del maestro (Addr 1)
  > 2 : Dirección de destino.
  > 36 : Longitud del mensaje
(máximo 240 bytes). La longitud del mensaje "Este mensaje es del
maestro (Addr 1)" es 36.
```



```
> This message is from Master (Addr 1) : Datos o mensaje.

(Esclavo) :
- AT+ADDRESS=2 --> 0~65535(default 0). Cuando la <Address> es 0,
Este enviará datos a todas las direcciones (Desde 0 hasta 65535).
- AT+SEND=1,35, Este mensaje es del Esclavo (Addr 2)
  > 1 : Dirección de destino.
  > 35 : Longitud del mensaje
(máximo 240 bytes). La longitud del mensaje "Este mensaje es del
esclavo (Addr 2)" es 35.
  > This message is from Slave (Addr 2) : Datos o mensaje.

// Verifica la dirección actual.
AT+ADDRESS=?
```

En este proyecto se ha configurado el módulo en modo propietario mediante el comando `AT+OPMODE=1`, debido a que ofrece mayor flexibilidad en aplicaciones personalizadas, en contraste con el modo estándar LoRaWAN. Esta elección tecnológica permite un control más directo sobre las direcciones, la frecuencia de transmisión y la estructura de los mensajes. Por otro lado, la banda de frecuencia fue seleccionada de acuerdo con el plan de frecuencias de la Alianza LoRa para la región de América (US915). Esta configuración, realizada con el comando `AT+BAND=915000000`, asegura que transmisor y receptor operen en el mismo rango, evitando pérdidas de comunicación.

La identificación de los nodos se establece a través del comando `AT+ADDRESS`. Cada módulo recibe una dirección única dentro de un rango de 0 a 65535. En este sistema, el módulo maestro puede configurarse con `AT+ADDRESS=1` y el módulo esclavo con `AT+ADDRESS=2`. De esta manera, se logra una comunicación punto a punto, donde los mensajes son dirigidos específicamente al nodo correspondiente y no a toda la red. El envío de datos se realiza con el comando `AT+SEND`, que incluye tres parámetros: la dirección de destino, la longitud del mensaje y el contenido del mismo.

Este esquema asegura que tanto los datos de concentración de gases como las coordenadas GPS sean transmitidos correctamente a la estación base o al dispositivo de monitoreo. La correcta asignación de direcciones evita interferencias y garantiza que cada mensaje sea recibido por el destinatario previsto.

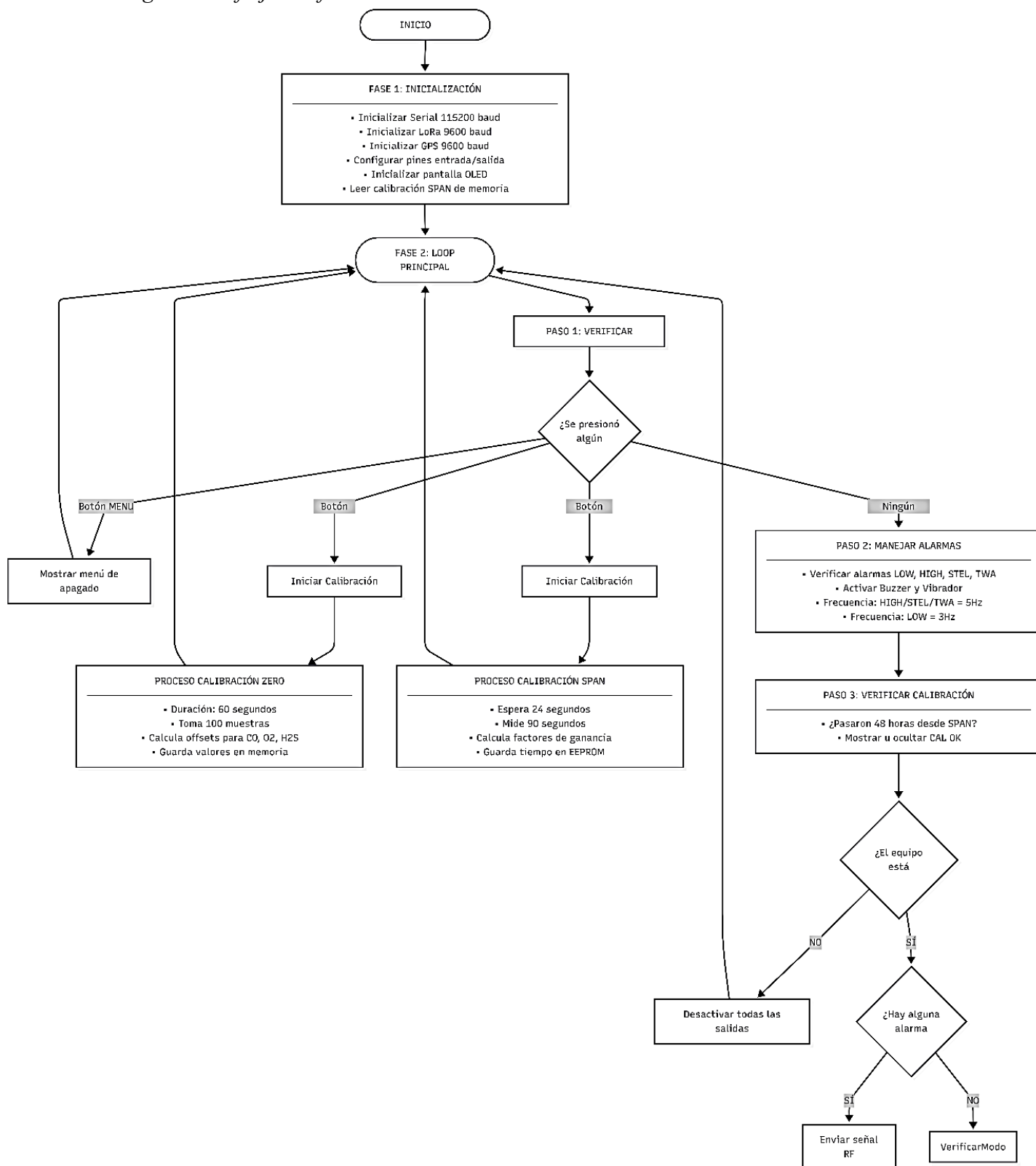
3.4.6. Implementación del algoritmo de control de emergencias

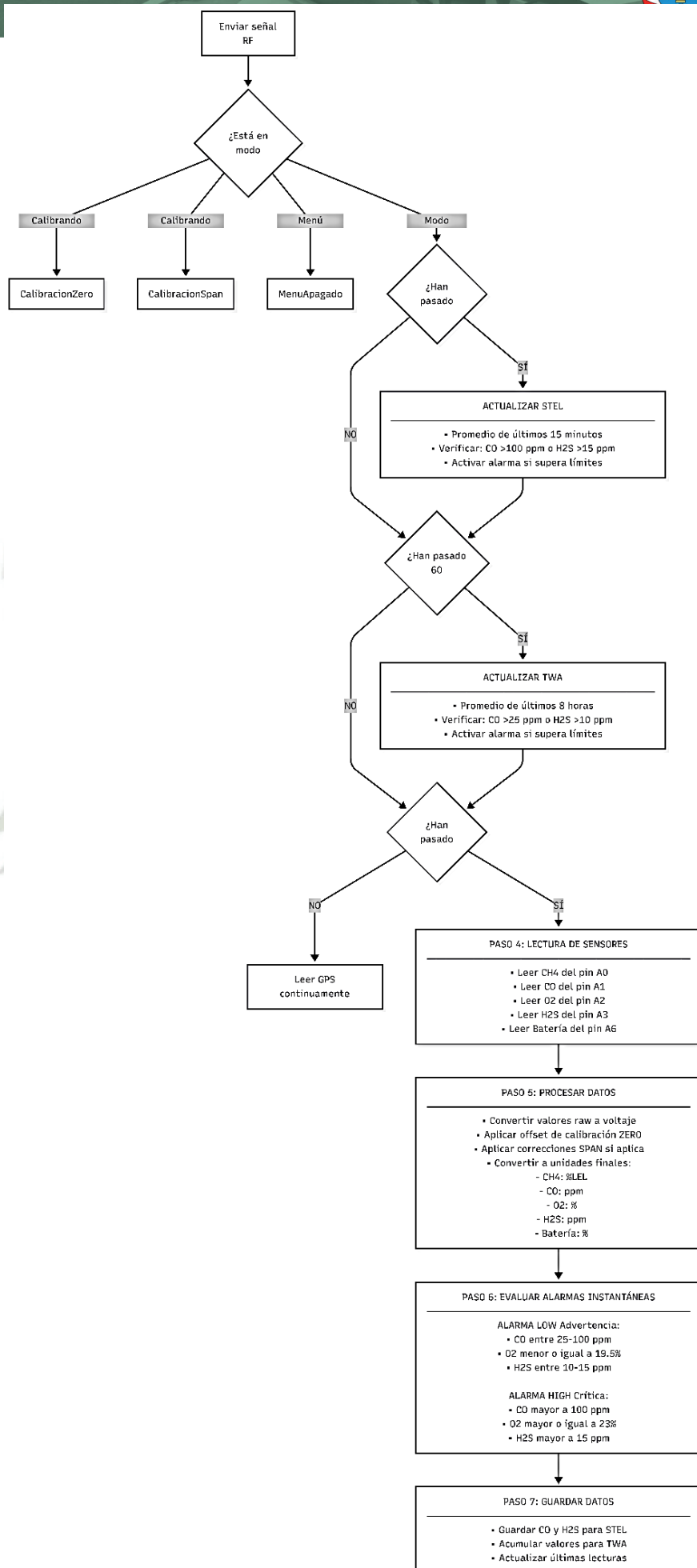
El firmware implementa un algoritmo de control de emergencias que se ejecuta de forma continua. Este algoritmo verifica si los valores de concentración de gases

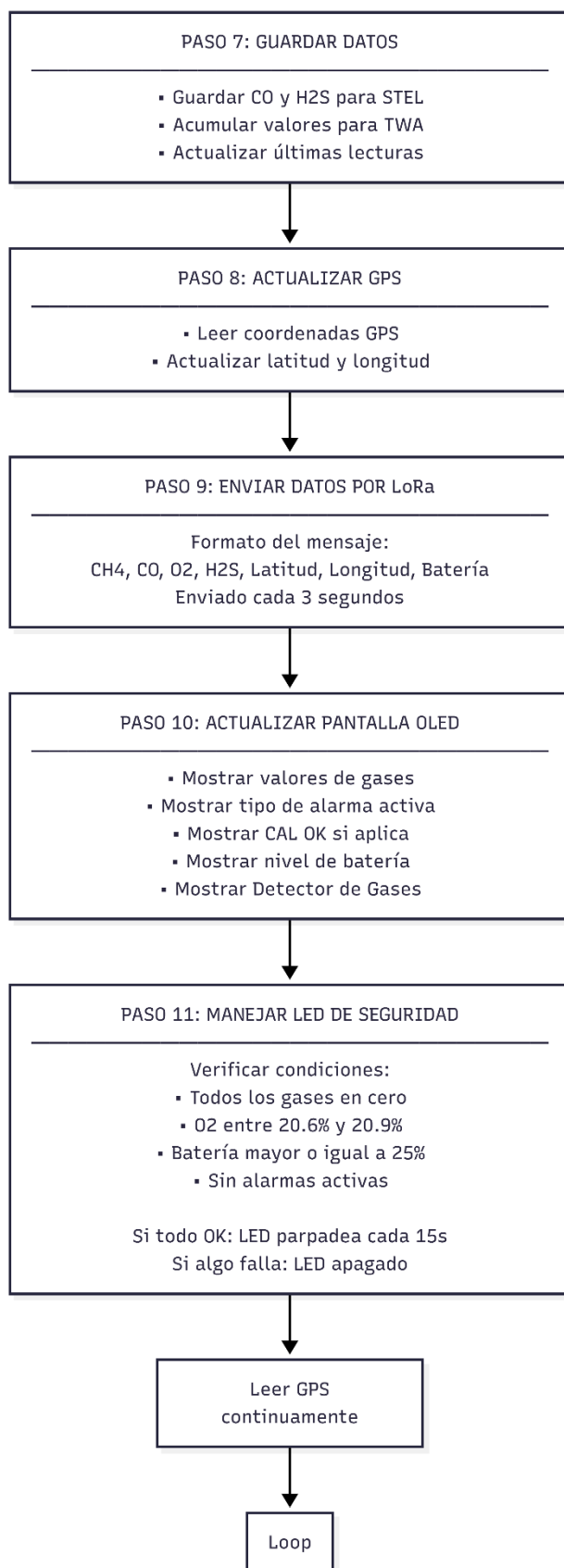
superan los umbrales de seguridad definidos. En caso afirmativo, se activa una alarma sonora y visual en el dispositivo y se envía una notificación de emergencia a la estación base a través de la red LoRa.

Figura 29

Diagrama de flujo del firmware







Nota. Elaboración Propia

CAPÍTULO IV

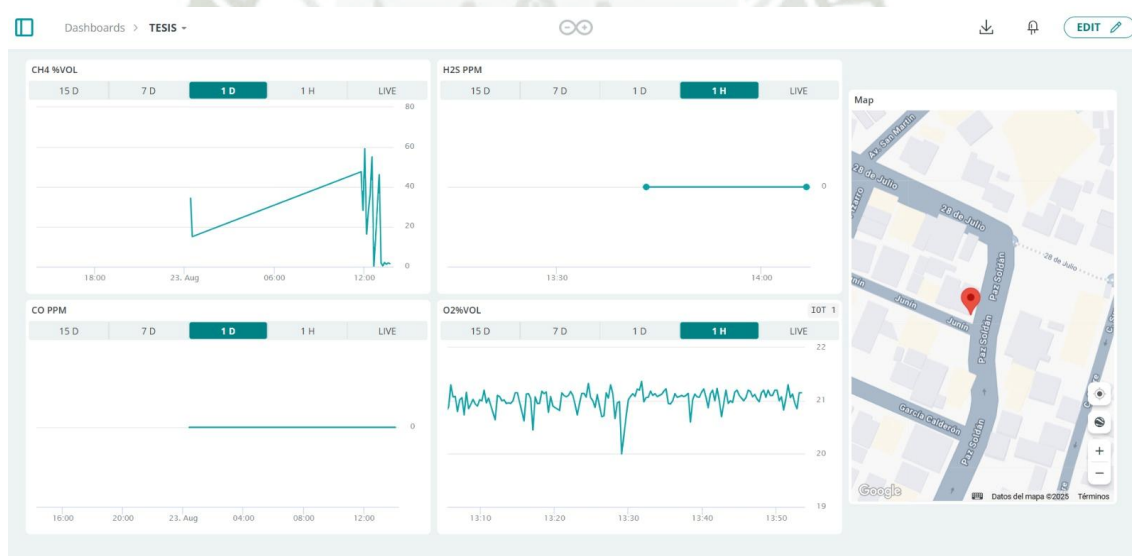
RESULTADOS

4.1. Interfaz de usuario

La interfaz de usuario desarrollada para el sistema de detección de gases constituye el punto de acceso central para la visualización y monitoreo de los datos recolectados por los sensores del equipo portátil. Esta plataforma permite al usuario supervisar en tiempo real las concentraciones de gases como CH₄, H₂S, CO y O₂, así como su geolocalización, desde diversos dispositivos, incluidos computadoras, laptops y teléfonos móviles. Al integrarse con tecnologías IoT y el sistema de comunicación LoRa, la interfaz garantiza que la información sea accesible de forma remota, lo que mejora la respuesta ante situaciones de riesgo y facilita la toma de decisiones en tiempo real.

Figura 30

Interfaz de usuario de detección de gases



Nota. Elaboración Propia

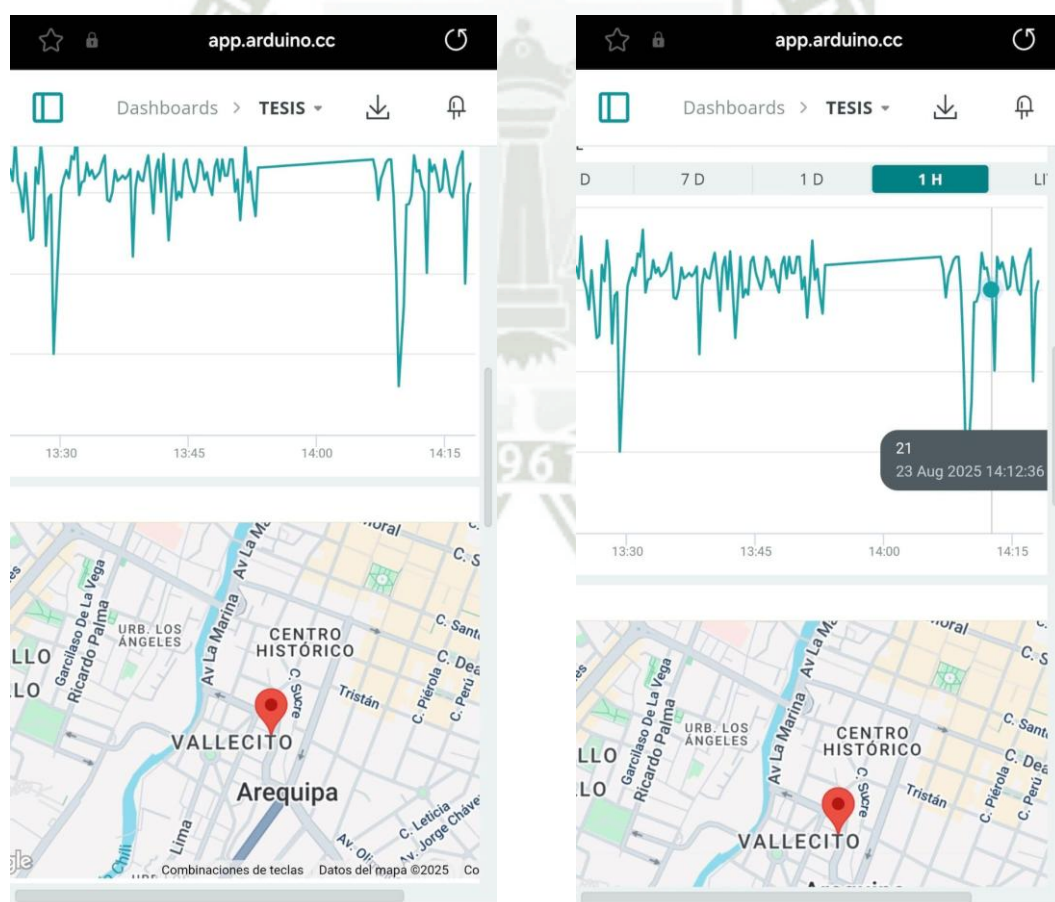
La Figura 30 muestra el panel principal de monitoreo implementado para el sistema. En el lado izquierdo, se presentan gráficos en tiempo real de las concentraciones de gases medidos: metano (CH₄), sulfuro de hidrógeno (H₂S), monóxido de carbono (CO) y oxígeno (O₂). Cada gráfico ofrece opciones de visualización por intervalos de tiempo (1 hora, 1 día o 15 días), lo que permite analizar tanto tendencias históricas como condiciones actuales. En la parte derecha de la figura, se observa un mapa con la ubicación geográfica del dispositivo, lo cual permite identificar la posición exacta en caso

de que se detecten concentraciones peligrosas. Esta funcionalidad de geolocalización, junto con la transmisión inalámbrica de datos mediante LoRa, asegura la vigilancia continua de las condiciones ambientales en el área de operación.

El dashboard en tiempo real del sistema de geolocalización permite monitorear de manera continua la ubicación del dispositivo y la variación de las lecturas captadas por los sensores en un intervalo definido. Esta herramienta facilita la supervisión del rendimiento del sistema y la identificación de eventos relevantes en el momento en que ocurren. La plataforma puede ser accedida desde diferentes dispositivos, lo que asegura la disponibilidad de la información para la toma de decisiones rápidas en escenarios críticos.

Figura 31

Dashboard Tiempo Real del sistema de geolocalización



Nota. Elaboración Propia

La Figura 31, muestra la interfaz donde se registran en vivo los datos de geolocalización y las lecturas del sistema. En la parte superior, se observa el gráfico que

representa los datos captados en tiempo real, con la posibilidad de seleccionar distintos rangos temporales, como 1 hora o 1 día. En la parte inferior, se presenta el mapa con la ubicación exacta del dispositivo, lo que permite correlacionar la información geográfica con las mediciones obtenidas. Es importante destacar que el margen de error del GPS es de aproximadamente 3 metros, lo que proporciona una precisión adecuada para la localización en escenarios de monitoreo ambiental.

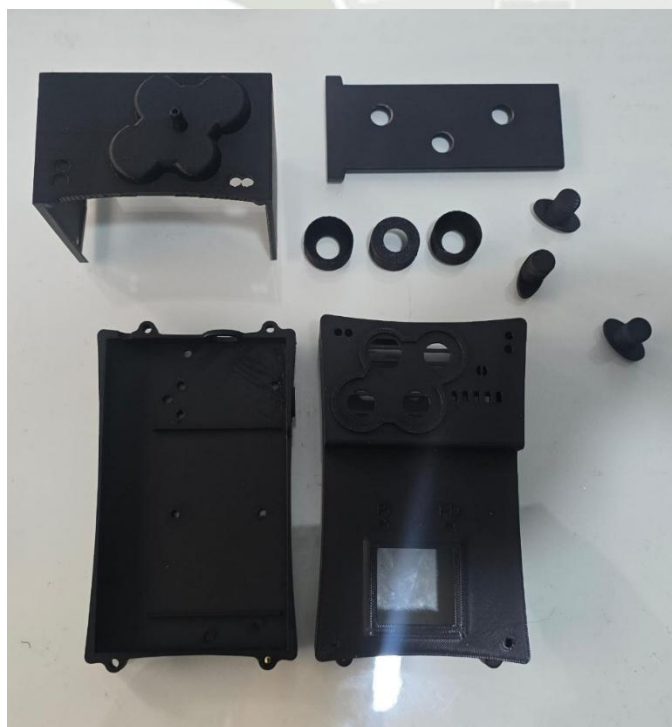
4.2. Pruebas de funcionalidad del equipo portátil detector de gases

4.2.1. Transmisor de detector de gases

El transmisor del detector de gases requiere de una estructura física que permita proteger adecuadamente los componentes electrónicos y, al mismo tiempo, facilite su ensamblaje y mantenimiento. Por ello, se diseñó una carcasa modular que brinda soporte y protección frente a condiciones externas, asegurando la integridad del sistema y prolongando su vida útil. La Figura 32, muestra el diseño físico del alojamiento del transmisor. Se observan las piezas que conforman la carcasa, incluyendo la tapa frontal, la base principal y los accesorios de ensamblaje.

Figura 32

Carcasa Modular del equipo detector de gases

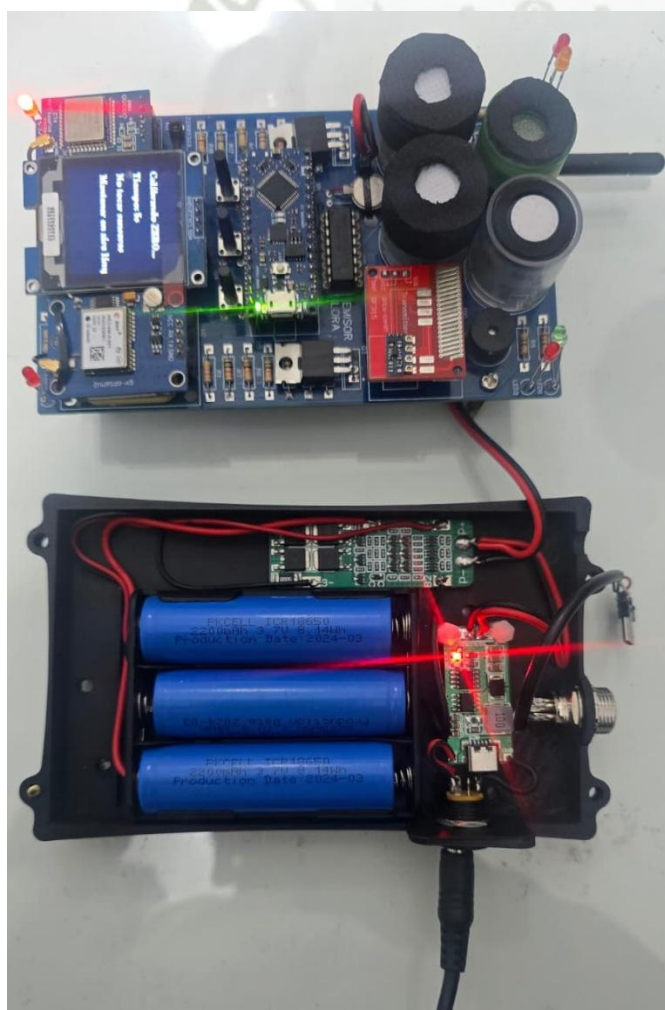


Nota. Elaboración Propia

La Figura 33 muestra el módulo transmisor implementado en una tarjeta electrónica, el cual integra un sistema de comunicación LoRa para la transmisión y recepción de datos, junto con un módulo RF destinado al reenvío de alertas hacia el receptor RF más cercano. Asimismo, se observa la presencia de un Arduino Nano Every, encargado del procesamiento de la información y del control general del sistema. Este diseño permite la adecuada gestión de emergencias al activar alertas sonoras y visuales, además de garantizar la transmisión de notificaciones en tiempo real. Es importante señalar que el equipo cuenta con un sistema de carga de 2 amperios, ubicado en las placas inferiores, además de incorporar un módulo de protección de carga (BMS) para 3 celdas 18650, que suministra un voltaje de salida de 12 VDC, asegurando la correcta administración y protección de las baterías recargables.

Figura 33

Módulo Transmisor para Detección de Gases



Nota. Elaboración Propia

La Figura 34, muestra el prototipo completamente ensamblado y operativo. En la parte superior del equipo se observan las entradas de aire para los sensores de gases, mientras que en la parte frontal se ubica la pantalla donde se despliegan en tiempo real las concentraciones de metano (CH_4), monóxido de carbono (CO), oxígeno (O_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S).

Figura 34

Puesta en marcha del del equipo portátil de detección de gases



Nota. Elaboración Propia

4.2.2. Sistema de alarmas de gas receptor RF

El sistema de alarmas de gas receptor RF es una parte fundamental del proyecto, ya que permite recibir la señal enviada por el módulo transmisor y activar de manera inmediata las alertas visuales y sonoras en caso de detección de gases peligrosos. Este sistema garantiza que las personas en el área puedan tomar acciones preventivas

oportunas, aumentando la seguridad en entornos industriales. La Figura 35, muestra el interior del módulo de alarma encargado de la recepción de datos y la activación del sistema de advertencia. En la parte superior se observa la sirena con luz estroboscópica, mientras que en la parte interior del tablero se encuentran los circuitos electrónicos responsables de la comunicación y activación de la alarma

Figura 35

Tablero del módulo de Alarma Receptor RF



Nota. Elaboración Propia

El receptor de alarma con sirena RF es un componente clave del sistema, diseñado para proporcionar alertas sonoras y visuales de manera inmediata cuando se detectan gases peligrosos. Este módulo recibe las señales enviadas por el transmisor y, al procesarlas, activa la sirena y la luz estroboscópica para advertir a las personas cercanas, garantizando así una respuesta rápida y efectiva en situaciones de riesgo.

La Figura 36, muestra la carcasa externa del sistema de alarma, donde se observan dos elementos principales:

- **Sirena con luz estroboscópica:** ubicada en la parte superior, diseñada para emitir señales acústicas y visuales de alta intensidad, permitiendo que la alerta sea percibida en entornos ruidosos o con baja visibilidad.
- **Tablero receptor:** alojado en la parte inferior, protegido en una caja metálica con advertencias de seguridad, encargado de recibir las señales inalámbricas del transmisor y activar la alarma de manera automática.

Figura 36

Receptor de Alarma con Sirena RF



Nota. Elaboración Propia

El botón de emergencia del sistema RF es un elemento de seguridad adicional que permite la activación manual de la alarma en situaciones críticas. Su función es

complementar el sistema automático de detección, brindando al personal la posibilidad de emitir una alerta inmediata cuando identifique condiciones peligrosas, incluso antes de que los sensores lleguen a los umbrales configurados.

La Figura 37, muestra el dispositivo instalado en un soporte externo y conectado al sistema receptor. Su diseño incluye:

- **Botón tipo hongo de gran tamaño:** de color rojo para una rápida identificación, que al presionarse envía una señal RF al módulo de alarma para activar la sirena y la luz estroboscópica.
- **Caja de protección amarilla:** resistente a condiciones ambientales adversas y diseñada para asegurar la durabilidad del dispositivo en entornos industriales.

Figura 37

Botón de Emergencia del Sistema RF



Nota. Elaboración Propia

El sistema de alarma receptor RF activo es el encargado de recibir la señal enviada por el módulo transmisor o por el botón de emergencia para activar las alertas sonoras y visuales. Su principal función es advertir de manera inmediata a las personas en el área cuando se detectan concentraciones peligrosas de gases o se presenta una emergencia manualmente reportada. La Figura 38, muestra el módulo de alarma instalado en campo, ya operativo. En la parte superior se aprecia la sirena con luz estroboscópica, encargada de emitir las señales acústicas y visuales de advertencia. La estructura está montada sobre un mástil para asegurar la visibilidad y el alcance del sonido en un entorno abierto.

Figura 38

Sistema de alarma receptor RF activo



Nota. Elaboración Propia

La prueba del módulo transmisor con el sistema de alarma RF es una fase crucial para validar la correcta comunicación entre ambos dispositivos. Su propósito es garantizar

que las señales enviadas desde el transmisor, ya sea por detección automática o activación manual, sean recibidas con precisión por el módulo de alarma para activar las alertas sonoras y visuales. La Figura 39, muestra el equipo portátil de detección de gases durante la verificación de su enlace con el sistema de alarma. En la imagen se observa el módulo transmisor en primer plano y, en el fondo, el sistema de alarma receptor RF montado en su estructura. Esta prueba permitió confirmar la cobertura de la señal inalámbrica, la correcta activación de la sirena y la luz estroboscópica, así como la estabilidad de la comunicación en un entorno real, asegurando la funcionalidad integral del sistema

Figura 39

Prueba del módulo transmisor con sistema de alarma RF



Nota. Elaboración Propia

4.2.3. Receptor LoRa con comunicación GSM

El receptor LoRa con comunicación GSM integra la capacidad de recibir datos transmitidos mediante la red LoRa y reenviarlos a través de la red GSM hacia la plataforma de monitoreo remoto. Este módulo asegura que la información de detección de gases llegue a dispositivos móviles o estaciones remotas, incluso en áreas donde la red local de datos pueda ser limitada. La Figura 40, muestra la carcasa externa del dispositivo encargado de la recepción y retransmisión de datos. Su diseño compacto y sellado protege la electrónica interna contra polvo, humedad y condiciones adversas en campo, garantizando la fiabilidad del sistema. Este módulo permite que la información captada por el transmisor y enviada vía LoRa sea distribuida mediante GSM a teléfonos móviles o computadoras, habilitando alertas y reportes en tiempo real para una gestión más efectiva de la seguridad

Figura 40

Módulo receptor LoRa con comunicación GSM



Nota. Elaboración Propia

El tablero del receptor LoRa con comunicación GSM es el núcleo electrónico que permite la integración entre la red LoRa y la red GSM. Su función principal es procesar la información recibida desde los transmisores LoRa y transmitirla mediante la red GSM hacia dispositivos remotos, asegurando un flujo de datos constante y confiable para el monitoreo en tiempo real. La Figura 41, muestra la disposición interna de los componentes electrónicos dentro del módulo. Se distinguen:

- **Módulo LoRa:** encargado de la recepción de datos provenientes de los sensores.
- **Módulo GSM:** responsable del envío de la información a través de la red celular.
- **Microcontrolador y antena externa:** que permiten el procesamiento y la optimización de la señal, asegurando cobertura y estabilidad en la comunicación.

Figura 41

Tablero del Receptor LoRa con Comunicación GSM



Nota. Elaboración Propia

4.3. Evaluación del sistema

El centro de recepción de datos constituye el punto principal para la recopilación y monitoreo de toda la información enviada por el sistema de detección de gases. Desde esta ubicación se centraliza el análisis de datos provenientes de los transmisores y receptores, permitiendo evaluar en tiempo real la operación del sistema y garantizando la cobertura de la red en las distintas áreas de prueba. La Figura 42, muestra la infraestructura utilizada para albergar el sistema de recepción y monitoreo. La ubicación estratégica del edificio, con una altura de cuatro pisos, permite una adecuada línea de visión para la comunicación inalámbrica con los transmisores y receptores instalados en campo.

Figura 42

Centro de recepción de datos – edificio de 4 pisos



Nota. Elaboración Propia

La recepción de datos del sistema es una etapa crítica en la evaluación del desempeño del proyecto, ya que permite verificar la correcta transmisión de la información desde los transmisores y receptores hacia la plataforma de monitoreo. Este proceso asegura que las lecturas de gases, la ubicación GPS y el estado del sistema se registren en tiempo real para su posterior análisis. La Figura 43, muestra el proceso en el que se reciben y almacenan los datos enviados por los módulos de detección y alarma. En la imagen se observa al operador utilizando un ordenador portátil con un receptor LoRa-GSM conectado, que capta la información proveniente de los dispositivos instalados en campo.

Figura 43*Recepción de Datos del Sistema*

Nota. Elaboración Propia

Las pruebas en línea recta con tráfico moderado permiten evaluar el alcance y la estabilidad de la comunicación del sistema en un entorno real donde existen vehículos en movimiento y posibles interferencias. Estas condiciones simulan escenarios habituales en zonas urbanas e industriales, verificando el desempeño del sistema en la transmisión de datos y activación de alarmas. La Figura 44, titulada muestra la ubicación del centro de recepción de datos desde el cual se evaluó la comunicación con los módulos transmisores y receptores instalados a lo largo de una avenida principal. En la imagen se observa el equipo portátil y el módulo receptor captando la información enviada en tiempo real, mientras que el tráfico vehicular genera un ambiente de prueba con condiciones dinámicas.

Figura 44

Pruebas en línea recta con tráfico moderado

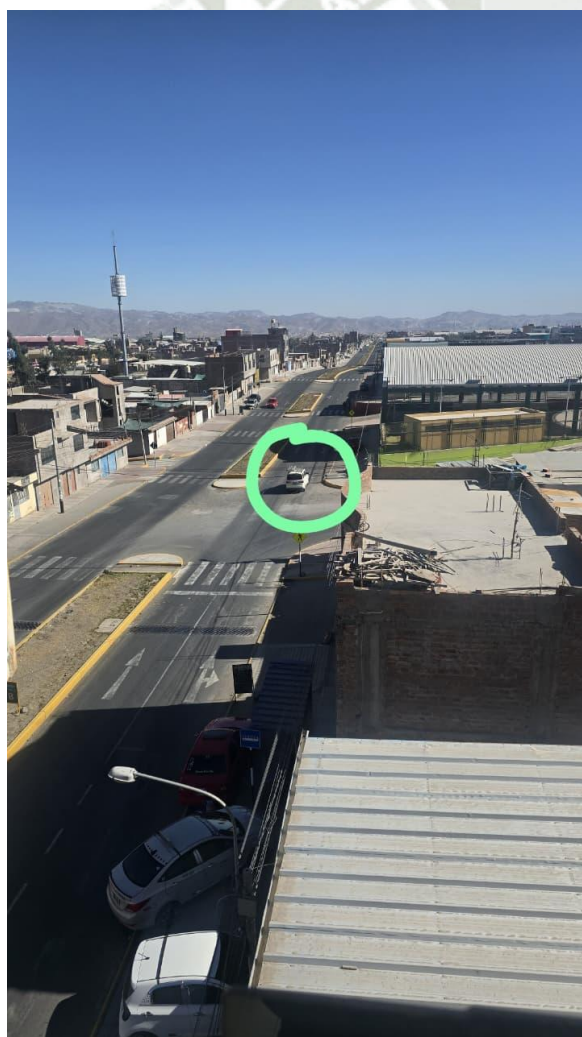


Nota. Elaboración Propia

La prueba de alcance a 300 metros tuvo como objetivo evaluar la capacidad de transmisión del sistema en una distancia intermedia, considerando tanto la estabilidad de la señal como la correcta recepción de los datos. Este ensayo permite determinar la confiabilidad del sistema en escenarios con obstáculos moderados y tráfico vehicular. La Figura 45, muestra la distancia recorrida por el equipo transmisor hasta alcanzar los 300 metros respecto al centro de recepción. En la imagen se observa la ubicación del vehículo que transporta el transmisor, mientras el receptor ubicado en el edificio central continúa captando la información enviada en tiempo real.

Figura 45

Prueba de Alcance a 300 m del Sistema

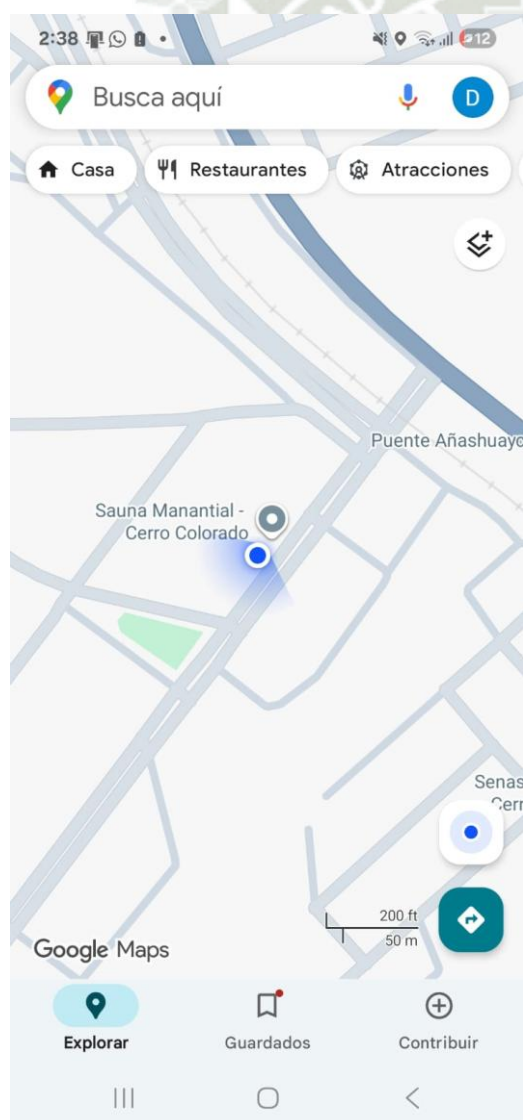


Nota. Elaboración Propia

La central de recepción de datos es el punto estratégico donde convergen todas las señales enviadas por los transmisores del sistema de detección de gases. Su ubicación y altura permiten mantener una comunicación estable con los dispositivos en campo, asegurando la correcta recolección de información en tiempo real para su análisis y registro. La Figura 46, muestra en un mapa la ubicación precisa del centro de monitoreo donde se recibe la información proveniente de los módulos transmisores. Desde este punto, los datos relacionados con la concentración de gases, la ubicación GPS y el estado de la batería son procesados y visualizados en la plataforma de control.

Figura 46

Central de Recepción de Datos

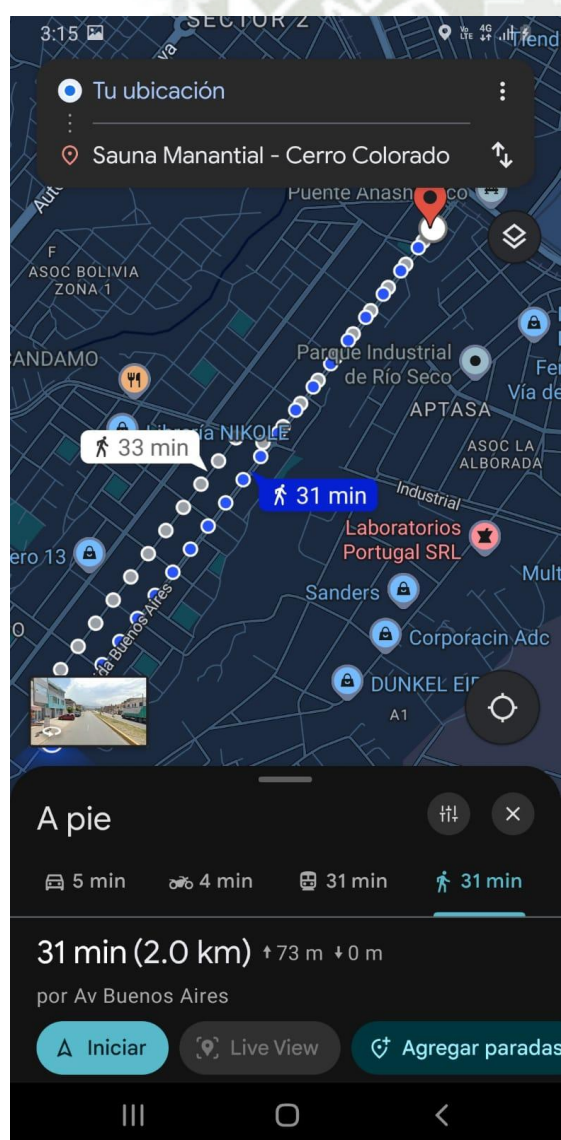


Nota. Elaboración Propia

La prueba de alcance a 2 km constituye una de las evaluaciones más exigentes para el sistema de detección de gases, ya que permite analizar el desempeño de la comunicación inalámbrica en distancias largas. Este ensayo es clave para verificar la estabilidad de la transmisión de datos y la cobertura real que puede alcanzar la red LoRa con el soporte de comunicación GSM. La Figura 47, muestra en un mapa el trayecto y la distancia cubierta durante la prueba de alcance máximo. Se observa la ruta seguida desde la ubicación del centro de recepción hasta el punto final, ubicado a dos kilómetros de distancia, donde el sistema continuó transmitiendo datos en tiempo real sin interrupciones.

Figura 47

Prueba de Alcance a 2 km del Sistema

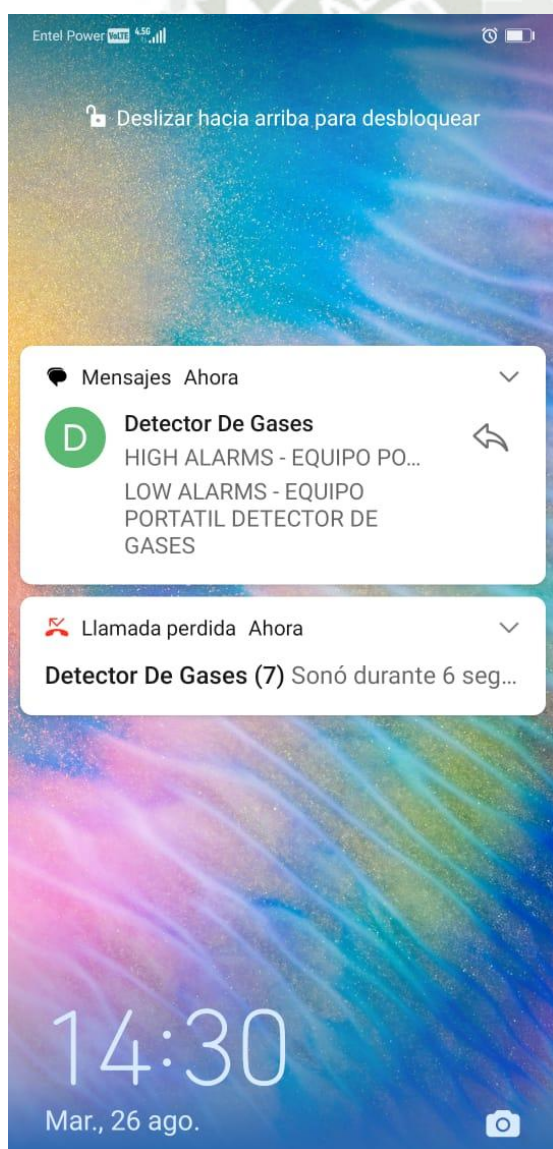


Nota. Elaboración Propia

Las alertas de llamadas del sistema de detección de gases constituyen la última capa de seguridad del proyecto, ya que permiten notificar en tiempo real a los responsables de la operación cuando se detectan concentraciones peligrosas de gases. Esta funcionalidad asegura que la información crítica llegue de manera directa e inmediata a través de la red GSM, incluso si el personal no se encuentra en el lugar del evento. La Figura 48, muestra la interfaz del teléfono móvil que recibe las notificaciones de alarmas. Se observan tanto mensajes de advertencia como llamadas automáticas realizadas por el sistema cuando se detectan umbrales de concentración que superan los límites configurados.

Figura 48

Alertas de llamadas del sistema de detección de gases



Nota. Elaboración Propia

4.4. Pruebas de Detección de Gases

Para evaluar la precisión de los sensores de gases, se realizaron pruebas en un entorno controlado utilizando gases de calibración certificados. Se compararon las lecturas de los sensores con las concentraciones reales de los gases y se calculó el error de medición.

Tabla 7

Resultados de las pruebas de detección de gases

Gas	Concentración Real	Concentración Medida	Error (%)
H₂S	20 ppm	22 ppm	10.0
CH₄	1.45% (29%LEL)	(30%LEL)	3.45
CO	60 ppm	63 ppm	5.00
O₂	15% vol.	15% vol.	0.0

Nota. Elaboración Propia

Como se puede observar en la Tabla 2, los errores de medición de los sensores son bajos, lo que indica una buena precisión en la detección de gases.

4.5. Pruebas de Geolocalización

Para evaluar la precisión del sistema de geolocalización, se realizaron pruebas en un entorno abierto. Se comparó la ubicación reportada por el dispositivo con la ubicación real obtenida de un GPS de alta precisión.

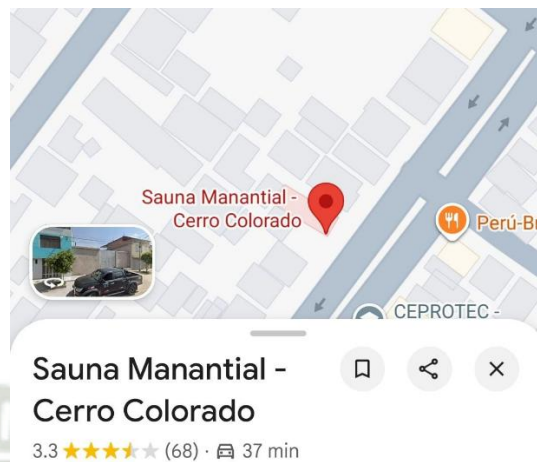
La primera prueba de geolocalización muestra la ubicación detectada por el dispositivo en la zona de Cerro Colorado, específicamente cerca del establecimiento “Sauna Manantial”. Los parámetros de los sensores indican valores estables (0 ppm de CO y H₂S, 20.80 % de O₂, 0 % de CH₄), confirmando condiciones ambientales normales. La coordenada obtenida (-16.341146, -71.590126) coincide con el punto marcado en el mapa, validando la precisión del sistema en un entorno urbano inicial.

Figura 49
Ubicación por geolocalización en el primer punto

LoRa Reyax RYLR993_Lite Result code :

AT_

CH4 :	0.00 %
CO :	0 ppm
O2 :	20.80 %
H2S :	0 ppm
Lat :	-16.341146
Lon :	-71.590126
Bat :	75 %


Nota. Elaboración Propia

En la segunda prueba, la geolocalización se realizó en el área donde se encuentra la empresa INTESOLAR. Los datos registrados presentan una ligera variación en la concentración de oxígeno (20.70 %), manteniéndose los demás gases en 0. La latitud y longitud (-16.343546, -71.591850) se corresponden con el punto mostrado en el mapa. Esta coincidencia confirma la correcta transmisión de datos mediante el módulo LoRa en un segundo entorno urbano.

Figura 50
Ubicación por geolocalización en el segundo punto

LoRa Reyax RYLR993_Lite Result code
+RCV=1

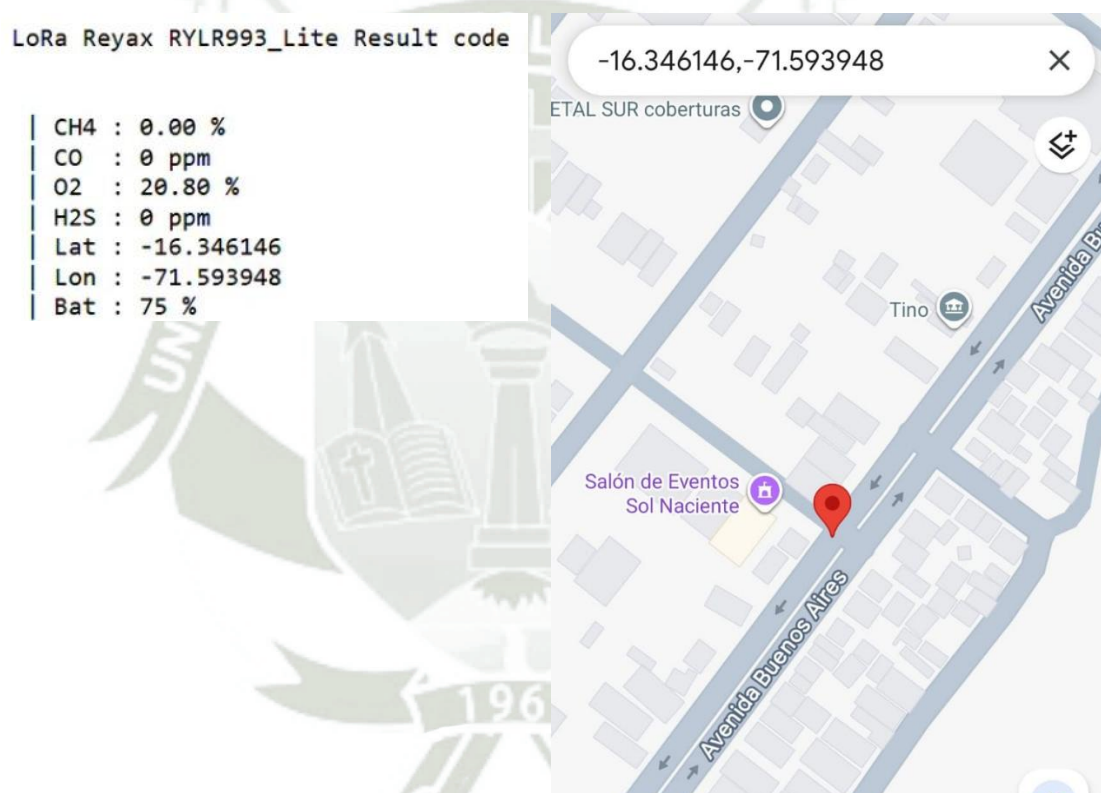
CH4 :	0.00 %
CO :	0 ppm
O2 :	20.70 %
H2S :	0 ppm
Lat :	-16.343546
Lon :	-71.591850
Bat :	75 %


Nota. Elaboración Propia

La tercera ubicación corresponde a las inmediaciones del Salón de Eventos Sol Naciente, ubicado sobre la Avenida Buenos Aires, con coordenadas (-16.346146, -71.593948). Los sensores nuevamente registran valores normales en todos los gases monitoreados y un nivel de batería estable (75 %). Este resultado confirma la precisión del sistema en zonas cercanas al segundo ensayo, reforzando la confiabilidad de la geolocalización en trayectos de corta distancia.

Figura 51

Ubicación por geolocalización en el tercer punto



Nota. Elaboración Propia

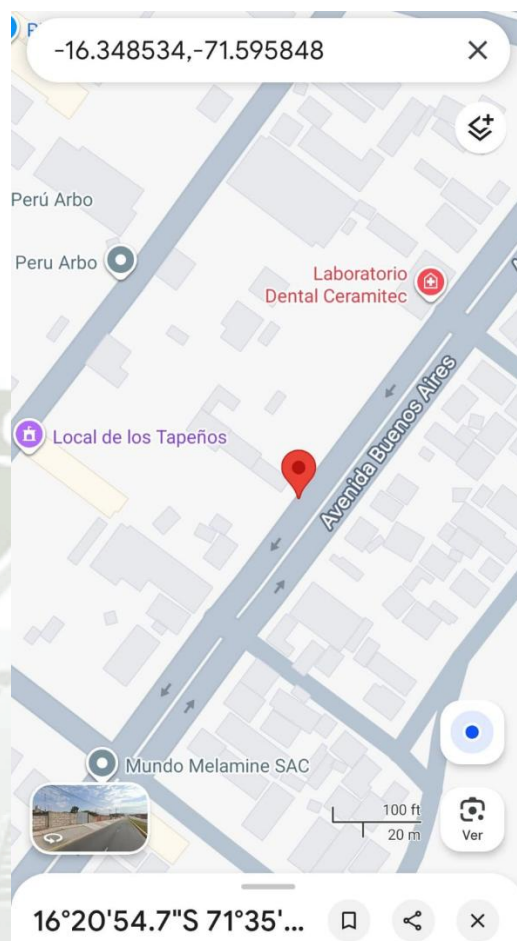
En el cuarto ensayo, el dispositivo reporta la posición en la Av. Buenos Aires, próxima a los establecimientos Local de los Tapeños y Laboratorio Dental Ceramictec. Las coordenadas (-16.348534, -71.595848) coinciden con el marcador mostrado en el mapa. Las lecturas de gases se mantienen en valores normales, lo que confirma la estabilidad de los sensores. Esta prueba evidencia que el sistema conserva su precisión aun al desplazarse dentro de la misma avenida.

Figura 52

Ubicación por geolocalización en el cuarto punto

LoRa Reyax RYLR993_Lite Result code

CH4 :	0.00 %
CO :	0 ppm
O2 :	20.70 %
H2S :	0 ppm
Lat :	-16.348534
Lon :	-71.595848
Bat :	75 %



Nota. Elaboración Propia

La quinta prueba registra la ubicación en la zona industrial próxima a los establecimientos INCOMET PERU SAC y Salamanca Industrial SAC, con coordenadas (-16.353666, -71.599854). Estas indican un ligero desplazamiento respecto al punto anterior, confirmando la variación de posición detectada por el sistema. Los parámetros ambientales reportan ausencia de gases contaminantes (CH₄, CO y H₂S en 0) y un nivel de oxígeno estable en 20.70 %. Esto confirma que el sistema mantiene precisión en la geolocalización y coherencia en el monitoreo de la calidad del aire durante la ruta evaluada.

Figura 53
Ubicación por geolocalización en el quinto punto

LoRa Reyax RYLR993_Lite Result code

```

CH4 : 0.00 %
CO  : 0 ppm
O2  : 20.70 %
H2S : 0 ppm
Lat : -16.353666
Lon : -71.599854
Bat : 75 %

```


Nota. Elaboración Propia

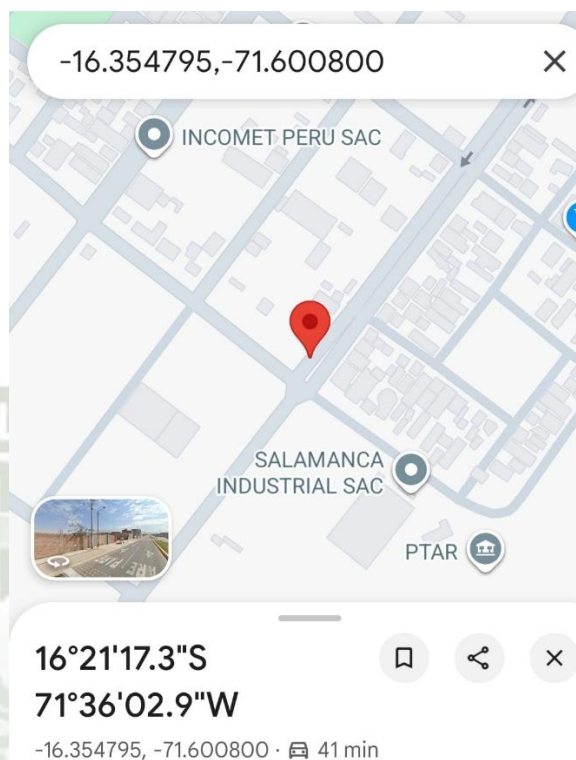
La sexta y última prueba ubica el punto en la zona donde se localizan empresas como “INCOMET PERU SAC” y “Salamanca Industrial SAC”, con coordenadas (-16.354795, -71.600800). Los parámetros ambientales continúan estables y la batería mantiene el mismo porcentaje que en las mediciones previas. Este resultado confirma que el sistema es capaz de identificar con exactitud distintas posiciones a lo largo de la avenida principal, validando la consistencia de la geolocalización en múltiples escenarios.

Figura 54

Ubicación por geolocalización en el sexto punto

LoRa Reyax RYLR993_Lite Result code

```
CH4 : 0.00 %
CO  : 0 ppm
O2  : 20.80 %
H2S : 0 ppm
Lat : -16.354795
Lon : -71.600800
Bat : 75 %
```



Nota. Elaboración Propia

4.6. Pruebas de duración de equipo

Con el objetivo de evaluar el tiempo de funcionamiento continuo del sistema transmisor en condiciones reales de uso, se realizó una prueba de duración completa con carga activa al 100 %. Esto incluyó el encendido permanente del microcontrolador, los sensores de gases, el módulo GPS, la pantalla OLED y el emisor LoRa.

La prueba se inició el día sábado a las 11:20 a. m. y finalizó el domingo a las 11:45 p. m., momento en que el equipo se apagó de forma automática por agotamiento de la fuente de alimentación. El tiempo total de operación registrado fue de 36 horas con 25 minutos, sin interrupciones ni fallos en la transmisión de datos durante ese periodo. Estos resultados permiten verificar la autonomía del equipo frente a un escenario de monitoreo continuo, siendo útil para aplicaciones donde se requiere un funcionamiento prolongado en campo antes de recargar o reemplazar la batería.

4.7. Comparación de los Programas de los Cuatro Intentos

A lo largo del desarrollo del sistema de monitoreo de gases, se realizaron cuatro intentos de programación, cada uno con funcionalidades y objetivos específicos. A continuación, se presenta una comparación de los programas de los cuatro intentos:

Primer Intento:

- **Objetivo:** Establecer la comunicación LoRa entre dos dispositivos.
- **Funcionalidades:**
 - Envío de datos básicos (estado de un interruptor y valor de un potenciómetro) de un dispositivo maestro a un dispositivo esclavo.
 - Recepción de los datos en el dispositivo esclavo y control de LEDs según los valores recibidos.
 - Envío de datos de respuesta (temperatura, humedad, estado de LEDs) del dispositivo esclavo al dispositivo maestro.
- **Limitaciones:** Funcionalidad básica, sin integración de sensores de gases ni geolocalización.

Segundo Intento:

- **Objetivo:** Integrar la comunicación LoRa con una pantalla LCD en el dispositivo maestro.
- **Funcionalidades:**
 - Envío de datos (estado de un interruptor y valor de un potenciómetro) del dispositivo maestro al dispositivo esclavo.
 - Control de LEDs en el dispositivo esclavo según los valores recibidos.
 - Recepción de datos de respuesta (temperatura, humedad, estado de LEDs) del dispositivo esclavo al dispositivo maestro.
 - Visualización de los datos recibidos en la pantalla LCD del dispositivo maestro.
- **Limitaciones:** Funcionalidad básica, sin integración de sensores de gases ni geolocalización.

Tercer Intento:

- **Objetivo:** Incorporar el control de un segundo potenciómetro en el dispositivo maestro.
- **Funcionalidades:**

- Envío de datos (estado de un interruptor y valores de dos potenciómetros) del dispositivo maestro al dispositivo esclavo.
- Control de LEDs en el dispositivo esclavo según los valores recibidos.
- Recepción de datos de respuesta (estado de LEDs) del dispositivo esclavo al dispositivo maestro.
- Visualización de los datos recibidos en la pantalla LCD del dispositivo maestro.
- **Limitaciones:** Funcionalidad básica, sin integración de sensores de gases ni geolocalización.

Cuarto Intento:

- **Objetivo:** Integrar la comunicación LoRa con una pantalla OLED en el dispositivo maestro.
- **Funcionalidades:**
 - Envío de datos (estado de un interruptor y valores de dos potenciómetros) del dispositivo maestro al dispositivo esclavo.
 - Control de LEDs en el dispositivo esclavo según los valores recibidos.
 - Recepción de datos de respuesta (estado de LEDs) del dispositivo esclavo al dispositivo maestro.
 - Visualización de los datos recibidos en la pantalla OLED del dispositivo maestro.
- **Limitaciones:** Funcionalidad básica, sin integración de sensores de gases ni geolocalización.

Comparación:

Tabla 7

Comparativa de Iteraciones del Sistema de Monitoreo

Intento	Comunicación LoRa	Pantalla	Sensores de Gases	Geolocalización
Primero	Sí	No	No	No
Segundo	Sí	LCD	No	No
Tercer	Sí	LCD	No	No
Cuarto	Sí	OLED	No	No

Nota. Elaboración Propia

4.8. Estudio de confiabilidad del sistema

El estudio de confiabilidad del sistema portátil detector de gases se desarrolló con la finalidad de evaluar su precisión de medición y su estabilidad operativa, a partir de los resultados experimentales obtenidos durante las pruebas de funcionamiento. El análisis se estructuró en dos componentes principales: la confiabilidad asociada a la medición de gases y la confiabilidad operativa del sistema en régimen continuo.

4.8.1. Confiabilidad de medición de los sensores

La confiabilidad metrológica del sistema se evaluó mediante la comparación entre los valores de concentración reales y los valores medidos por el prototipo. Para ello, se empleó el error porcentual de medición, definido como:

$$E_i(\%) = \left| \frac{C_{m,i} - C_{r,i}}{C_{r,i}} \right| \times 100$$

donde $C_{m,i}$ representa la concentración medida por el sistema y $C_{r,i}$ corresponde a la concentración de referencia del gas evaluado.

A partir de los ensayos realizados, se obtuvieron los siguientes errores porcentuales individuales:

- **H₂S:**

$$E_{H_2S} = \left| \frac{22 - 20}{20} \right| \times 100 = 10.0\%$$

- **CO:**

$$E_{CO} = \left| \frac{63 - 60}{60} \right| \times 100 = 5.0\%$$

- **O₂:**

$$E_{O_2} = \left| \frac{15 - 15}{15} \right| \times 100 = 0.0\%$$

- **CH₄:**

$$E_{CH_4} = 3.45\%$$

Con estos valores, se calcularon indicadores globales de confiabilidad.

4.8.1.1. Error absoluto medio porcentual (MAPE)

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i$$

$$MAPE = \frac{10.0 + 3.45 + 5.0 + 0.0}{4} = 4.6125\% \approx 4.61\%$$

4.8.1.2. Raíz del error cuadrático medio porcentual (RMSE%)

$$RMSE_{\%} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i^2}$$

$$RMSE_{\%} = \sqrt{\frac{10^2 + 3.45^2 + 5^2 + 0^2}{4}} = \sqrt{34.2256} = 5.85\%$$

4.8.1.3. Desviación estándar del error

$$s = \sqrt{\frac{\sum (E_i - \bar{E})^2}{n - 1}}; \bar{E} = 4.6125$$

$$s \approx 4.19\%$$

4.8.1.4. Coeficiente de variación del error

$$CV = \frac{s}{\bar{E}} \times 100$$

$$CV \approx 90.8\%$$

Estos resultados indican que el sistema presenta un error promedio reducido, con una variabilidad asociada principalmente a la detección de H_2S , manteniéndose dentro de márgenes aceptables para aplicaciones industriales de monitoreo continuo.

4.8.2. Confiabilidad operativa del sistema

En la prueba de operación continua, se trabajó con el sistema transmisor operando con carga activa al 100%, manteniéndose en funcionamiento permanente el microcontrolador, los sensores de gases, el módulo GPS, la pantalla OLED y el módulo de comunicación LoRa. El ensayo se ejecutó durante un periodo total de 36 horas y 25 minutos, sin registrarse interrupciones, pérdidas de comunicación ni fallos funcionales.

El tiempo total de operación se expresó en horas como:

$$T = 36 + \frac{25}{60} = 36.4167 \text{ h}$$

4.8.2.1. Modelo matemático de confiabilidad

Para el análisis se adoptó el modelo exponencial, ampliamente utilizado en sistemas electrónicos, el cual asume una tasa de fallas constante:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

donde $R(t)$ es la confiabilidad del sistema y λ la tasa de fallas. El Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) se define como:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda}$$

Dado que durante el ensayo no se presentaron fallas, se estimó una cota inferior del MTBF utilizando un enfoque estadístico con nivel de confianza CL :

$$MTBF_L = \frac{T}{-\ln(1 - CL)}$$

4.8.2.2. Estimación del MTBF para distintos niveles de confianza

- Nivel de confianza 90%:

$$MTBF_L = \frac{36.4167}{2.3026} = 15.82 \text{ h}$$

- Nivel de confianza 95%:

$$MTBF_L = \frac{36.4167}{2.9957} = 12.16 \text{ h}$$

- **Nivel de confianza 99%:**

$$MTBF_L = \frac{36.4167}{4.6052} = 7.91 \text{ h}$$

4.8.2.3. Confiabilidad de misión

La probabilidad de que el sistema opere sin fallas durante un intervalo t se estimó mediante:

$$R(t) = e^{-t/MTBF_L}$$

Para una jornada típica de operación:

- **8 horas:**

$$R(8) \geq e^{-8/15.82} = 0.603$$

- **12 horas:**

$$R(12) \geq e^{-12/15.82} = 0.468$$

- **24 horas:**

$$R(24) \geq e^{-24/15.82} = 0.219$$

Para una jornada típica de 8 horas, se obtuvo una confiabilidad mínima de:

$$R(8) \geq 0.603$$

Lo que indica que el sistema puede operar de manera estable durante una jornada estándar de trabajo. Este intervalo corresponde al rango óptimo de funcionamiento, en el cual el equipo mantiene todos sus módulos activos y el nivel de confiabilidad esperado.

Cuando la operación continua supera aproximadamente 8 a 10 horas, la confiabilidad comienza a disminuir, alcanzando un valor de:

$$R(12) \geq 0.468$$

Por lo que se recomienda realizar la recarga de la batería para garantizar la continuidad del monitoreo y conservar condiciones adecuadas de operación. Para un escenario extendido de 24 horas sin recarga, la confiabilidad mínima estimada es:

$$R(24) \geq 0.219$$

Los resultados confirman que el sistema es confiable para jornadas típicas de operación, siempre que se considere la recarga periódica de la fuente de alimentación para mantener su desempeño y fiabilidad.

4.9. Costos de materiales y equipos

La tabla 5 muestra la relación de componentes electrónicos y módulos utilizados en el diseño e implementación del sistema portátil detector de gases, incluyendo sensores, tarjetas de control y elementos de comunicación.



Tabla 8

Costos de componentes y equipos del sistema portátil de detección de gases

LISTA DE PRECIOS DE LOS COMPONENTES UTILIZADOS	CANTIDAD	PRECIO EN DOLARES	PRECIO EN SOLES	PRECIO TOTAL EN SOLES
REALIZACIÓN DE Tarjeta Equipo Portátil de detector de gases con transmisor LORA	1	\$42.58	149.07	149.07
SENSOR DE METANO MH-440D	1		535.14	535.14
ENCHUFE DE PINES PARA SENSORES MODELOS ZE03	1		95.39	95.39
BATERIAS 18650 DE 3.7V	3		12	36
CARGADOR DE IONES DE LITIO MULTICELDA 3S, 2 AMPERIOS	1		3	3
SENSOR DE MONOXIDO DE CARBONO MODELO ZE-03	1	42.49	148.76	148.76
SENSOR DE OXIGENO MODELO ZE-03	1	39.59	138,60	138,60
SENSOR DE ACIDO SULFHIDRICO MODELO ZE-03	1	35.63	124.74	124.74
MODULO RYLR993_Lite	1		170	170
Arduino Nano Every	1		127.38	127.38
MODULO DE PROTECCION BMS 3S DE 20 Amperios	1		7	7
DISPLAY OLED DE 1.5" SSD1327	1		66.7	66.7
MODULO NEO-6M	1		60	60
CD74HC4017E CONTADOR DE 10 BITS	1	1.03	3,61	3,61
CT817B OPTOACOPLADOR	1	0.53	1.86	1.86
MINI MOTOR VIBRADOR DE 3V	1		5	5
BUZZER DE 5V	1		2	2
IRLZ44N	2		9.28	18.56
RF433TX	1		3.5	3.5
RESISTENCIAS DE 1/4W	21		0.1	2.1

LED DE 3MM	6	0.3	1.8
PULSADOR DE 12X12 MM	3	0.5	1.5
CASE DE EQUIPO PORTATIL	1	85	85
Espadines hembra 2×40	4	2.5	10
TOTAL DE PRECIOS DEL EQUIPO PORTATIL DETECTOR DE GASES			1654.5
REALIZACIÓN DE TARJETA RECEPTOR LORA CON COMUNICACIÓN GSM	1	70	70
NODE MCU esp8266	1	30	30
MODULO RYLR993_Lite	1	170	170
LM2596 BUCK MODULE	1	12	12
SIM800L	1	28	28
IRLZ44N	1	9.28	9.28
BUZZER DE 5V	1	2	2
RESISTENCIAS DE 1/4W	4	0.1	0.4
1N5400	1	5	5
12V PLUG	1	5	5
3 METROS DE CABLE VULCANIZADO 2X12 AWG INDECO	3	7	21
CONECTOR PLUG 12V MACHO	1	5	5
CONECTOR PLUG 12V HEMBRA	1	5	5
CABLE DE EXTENSION USB 3.0 DE 3 METROS	1	37.3	37.3
CAJA PASE PVC 10 CM. X 10 CM. X 7 CM.	1	5	5
TOTAL DE PRECIOS DEL EQUIPO RECEPTOR DE DATOS CON COMUNICACIÓN GSM			404.98
REALIZACIÓN DE TARJETA RECEPTOR RF CON SIRENA	1	50	50
ARDUINO NANO V3.0	1	21.1	21.1
RESISTENCIAS DE 1/4W	3	0.1	0.3
IRLB3034PBF	1	10	10
1N4007	2	0.2	0.4

RF433RX	1	3.5	3.5
BORNERA DE 2 PINES	4	0.5	2
FUENTE DE 12 V 1 A	1	10	10
MT3608	1	15	15
CONECTOR USB TIPO C HEMBRA	1	1	1
GABINETE ELECTRICO DE 20X15 CM	1	79	79
CIRCULINA CON SIRENA OPALUX	1	85.9	85.9
PULSADOR DE EMERGENCIA OPALUX	1	26.5	26.5
Prensaestopas de Nylon IP68	4	0.5	2
Enchufe Industrial Macho 3p 15a 125v Leviton	1	15	15
TOTAL DE PRECIOS DEL EQUIPO RECEPTOR RF CON SIRENA			321.7
TOTAL DE PRECIOS DEL PROYECTO EN SOLES			2381.18

Nota. Elaboración Propia

4.10. Especificaciones técnicas del diseño del sistema

Tabla 9

Especificaciones generales del sistema

Parámetro	Especificación	Descripción
Arquitectura del Sistema	3 subsistemas Interconectados	Equipo Portátil → Alarma RF (corta distancia) + Receptor LoRa/GSM (larga distancia)
Protocolos de Comunicación	RF (433 MHz) + LoRa + GSM	RF para alertas locales, LoRa para larga distancia, GSM para notificaciones remotas
Alcance de Comunicación	RF: ~100-500 m / LoRa: ≤ 5 km / GSM: Cobertura celular	Depende del entorno y condiciones
Frecuencia de Transmisión	Cada 3 segundos	Intervalo de lectura y envío de datos
Fuente de Alimentación	Batería recargable 12V (portátil) / 220V AC + 5V batería (alarma) / Alimentación fija (receptor)	Depende del subsistema
Tiempo de Respuesta	< 3 segundos	Desde detección hasta activación de alarmas

Nota. Elaboración Propia

Tabla 10

Especificaciones del equipo portátil detector de gases

Categoría	Especificación
UNIDAD DE CONTROL	
Microcontrolador	Arduino Nano Every (ATmega4809)
Memoria Flash	48 KB
RAM	6 KB
Velocidad	20 MHz
CARCASA Y PROTECCIÓN	
Material	Plástico ABS (resistente a impactos)
Diseño	Ergonómico para uso portátil
PANTALLA	
Modelo	OLED SSD1327

Resolución	128x128 píxeles
Interfaz	I2C (Hardware)
SENSORES DE GASES	
CH4 (Metano)	Pin A0, Rango: 0-50% LEL, Precisión: $\pm 2\%$ LEL
CO (Monóxido)	Pin A1, Rango: 0-1000 ppm, Precisión: $\pm 5\%$ o ± 3 ppm
O2 (Oxígeno)	Pin A2, Rango: 0-25%, Precisión: $\pm 0.5\%$
H2S (Ácido Sulhídrico)	Pin A3, Rango: 0-100 ppm, Precisión: $\pm 5\%$ o ± 2 ppm
MÓDULO GPS	
Modelo	NEO-6M
Precisión	2.5 m (CEP: Error Circular Probable)
Frecuencia	1 Hz
Comunicación	UART (SoftwareSerial, RX=7, TX=6)
COMUNICACIÓN	
LoRa	Módulo Reyax, Alcance: 5 km, UART (RX=5, TX=4), 9600 bps
RF	433 MHz, Pin D13, Alcance: 100-500 m
SISTEMA DE ALARMAS	
Buzzer	Pin D0 (ALARM_PIN1)
Vibrador	Pin D2 (ALARM_PIN2)
Salida adicional	Pin D9 (ALARM_PIN3)
LED Seguridad	Pin D3 (SAFETY_LED_PIN), activa cada 15s si condiciones seguras
Frecuencias	LOW: 3 Hz, HIGH/STEL/TWA: 5 Hz
UMBRALES DE ALARMAS	
LOW	CH4: 10-20% LEL, CO: 25-100 ppm, O2: $\leq 19.5\%$, H2S: 10-15 ppm
HIGH	CH4: $> 20\%$ LEL, CO: > 100 ppm, O2: $\geq 23\%$, H2S: > 15 ppm
STEL (15 min)	CO: > 100 ppm promedio, H2S: > 15 ppm promedio
TWA (8 h)	CO: > 25 ppm promedio, H2S: > 10 ppm promedio
CONTROL	
Botones	BTN_MENU(ON/OFF), BTN_YES(PD), BTN_NO(PE)
ALIMENTACIÓN	

Tipo	Batería recargable 12V
Autonomía	36 horas de operación continua
Monitoreo	Pin A6 (BATTERY_PIN), Divisor 150k Ω + 100k Ω
CALIBRACIÓN	
ZERO	60 segundos, ambiente limpio
SPAN	90 segundos + 24s estabilización, gas patrón (CO: 60 ppm, O ₂ : 15%, H ₂ S: 20 ppm)
Validez SPAN	24 horas
MEMORIA	
EEPROM	Almacenamiento de offsets de calibración
INTERVALO	
Lectura/Transmisión	Cada 3 segundos

Nota. Elaboración Propia

Tabla 11

Especificaciones del equipo de alarma de evacuación

Categoría	Especificación
UNIDAD DE CONTROL	
Microcontrolador	Arduino Nano (ATmega328P)
Memoria Flash	32 KB
RAM	2 KB
Velocidad	16 MHz
CARCASA Y PROTECCIÓN	
Tipo	Gabinete eléctrico industrial
Protección	IP (Ingress Protection) contra agua y polvo
Material	Metal reforzado
Sellado	Hermético para protección ambiental
RECEPTOR RF	
Frecuencia	433 MHz
Alcance	100-500 metros (depende del entorno)
Protocolo	Compatible con transmisión del equipo portátil
SISTEMA DE ALARMAS	

Sirena	Alarma sonora de alta potencia
Circulina	Alarma visual rotativa
Activación	Automática al recibir señal de alarma RF
ALIMENTACIÓN	
Principal	220V AC (corriente alterna)
Respaldo	Baterías recargables de 5V
Sistema	Alimentación dual
Autonomía baterías	Depende de la capacidad de las baterías
RENDIMIENTO	
Tiempo de Respuesta	< 1 segundo (desde recepción RF hasta activación)
INSTALACIÓN	
Tipo	Fija, diseñada para instalación permanente en áreas de trabajo
<i>Nota. Elaboración Propia</i>	

Tabla 12
Especificaciones del circuito receptor LoRa/GSM

Categoría	Especificación
UNIDAD DE CONTROL	
Procesador	ESP8266
Velocidad	80-160 MHz
Flash	4 MB
RAM	80 KB
WiFi	Integrado 802.11 b/g/n
CARCASA Y PROTECCIÓN	
Material	Polímero de alta resistencia
Protección	IP (Ingress Protection) contra agua y polvo
Resistencia	Alta resistencia a impactos y condiciones ambientales
Sellado	Hermético para protección en exteriores
RECEPTOR LoRa	
Modelo	Módulo Reyax LoRa

Alcance	Hasta 5 km (línea de vista)
Comunicación	UART
Baudrate	9600 bps
Protocolo	Compatible con transmisión del equipo portátil
MÓDULO GSM	
Modelo	SIM800L
Banda	Quad-band (850/900/1800/1900 MHz)
Protocolos	GPRS, SMS, Voz
Comunicación	UART
Compatibilidad	Excelente con ESP8266
FUNCIONALIDADES GSM	
Llamadas	Automáticas ante alarmas
SMS	Envío con datos de sensores y ubicación GPS
Notificaciones	Remotas
CONECTIVIDAD INTERNET	
WiFi	Integrado en ESP8266 (802.11 b/g/n)
GSM/GPRS	A través de módulo SIM800L
Conexión	Wifi
PLATAFORMA IoT	
Servicio	Arduino Cloud
Visualización	Datos del equipo portátil en tiempo real transmitidos vía LoRa
Monitoreo	Acceso remoto desde cualquier dispositivo con internet
Dashboard	Visualización de sensores (CH ₄ , CO, O ₂ , H ₂ S), GPS, nivel de batería
Alertas	Notificaciones automáticas en la plataforma
Historial	Almacenamiento de datos históricos
INTEGRACIÓN IoT	
Protocolos	MQTT, HTTP, TCP/IP
API	Integración con otros sistemas
RENDIMIENTO	
Alcance Recepción	Hasta 5 km (depende de condiciones de línea de vista)
Cobertura GSM	Cobertura celular global (depende del operador)

Tiempo de Respuesta	< 5 segundos (desde recepción LoRa hasta llamada GSM)
----------------------------	---

ALIMENTACIÓN

Tipo	Alimentación fija 220V AC
Operación	Requiere alimentación continua para operación 24/7

Nota. Elaboración Propia

El sistema está compuesto por tres subsistemas interconectados:

1. Equipo Portátil Detector de Gases:

- Arduino Nano Every con sensores CH₄, CO, O₂, H₂S
- GPS NEO-6M para geolocalización
- Transmisión dual: RF (corta distancia) y LoRa (larga distancia)
- Pantalla OLED y sistema de alarmas local

2. Equipo de Alarma de Evacuación:

- Arduino Nano con receptor RF
- Sirena y circulina para alertas locales
- Activación automática al recibir señal de alarma

3. Receptor LoRa/GSM:

- ESP8266 con receptor LoRa y módulo SIM800L
- Integración con Arduino Cloud
- Realización de llamadas GSM y envío de SMS ante alarmas

El sistema garantiza cobertura multi-protocolo: alertas locales inmediatas por RF y comunicación de larga distancia por LoRa/GSM para monitoreo remoto y notificaciones de emergencia.

4.11. Comparación entre el Detector de Gases desarrollado y el equipo MSA ALTAIR 4X

Tabla 13

Comparación entre el Detector De Gases Desarrollado y el equipo MSA ALTAIR 4X

CARACTERÍSTICA	MI EQUIPO DETECTOR DE GASES	MSA ALTAIR 4X
Gases detectados	CH ₄ , CO, O ₂ , H ₂ S (4 fijos)	1–4 configurables
Tipo de sensores	Electroquímicos + Catalítico	Electroquímicos/Catalíticos
Alarmas	LOW, HIGH, STEL, TWA visibles	LOW, HIGH, STEL, TWA
Indicador de seguridad	LED verde de estado seguro	No disponible
Pantalla	OLED 128x128 (mejor contraste)	LCD retroiluminado
Datos mostrados	Gases, batería, STEL/TWA, CAL OK	Gases, batería, eventos
Calibración	Rápida + indicador CAL OK	Manual/automática
Conectividad	LoRa + GPS integrado	Bluetooth/WiFi (según modelo)
Monitoreo remoto	Sí, en tiempo real	Limitado
Autonomía	≈36 horas	≈18 horas
Mantenimiento	Reparable y modificable	Servicio autorizado
Costo	≈ S/ 1700	≈ USD 1200
Enfoque	Monitoreo remoto y personalizable	Uso industrial certificado
Ventaja principal	Más funciones y menor costo	Certificaciones internacionales

Nota. Elaboración Propia

Equipo portátil desarrollado

Ventajas:

- Comunicación RF (433 MHz) para alertas locales, LoRa (hasta 2.5 km) para larga distancia y GPS integrado para geolocalización.
- Integración IoT: transmisión a Arduino Cloud para monitoreo remoto en tiempo real.
- Mayor autonomía: 36 horas vs 24 horas del Altair 4x.
- Costo: significativamente menor, adecuado para proyectos con presupuesto limitado.
- Personalizable: permite ajustes según necesidades específicas.

Limitaciones:

- Sin certificaciones internacionales (ATEX, IECEEx).
- Protección física con material ABS
- Precisión ligeramente inferior en CO y H₂S.

MSA ALTAIR 4X

Ventajas:

- Certificaciones: ATEX, IECEEx, CSA, IP68.
- Robustez: IP68 y resistencia a caídas de 7.5 m.
- Bluetooth integrado para conectividad inmediata.
- Soporte técnico profesional y garantía.

Limitaciones:

- Mayor costo.
- Sin comunicación RF/LoRa integrada.
- Sin GPS integrado.
- Menor autonomía (24 horas).

El equipo desarrollado es adecuado para aplicaciones que requieren comunicación a larga distancia, geolocalización, integración IoT y bajo costo, especialmente en proyectos de investigación, desarrollo o aplicaciones específicas donde la personalización es importante. El MSA ALTAIR 4X es más adecuado para entornos industriales que exigen certificaciones internacionales, alta precisión y robustez, donde la inversión en un equipo certificado es prioritaria. La elección depende de los requisitos específicos: si se necesita comunicación avanzada, IoT y geolocalización a bajo costo, el equipo desarrollado es una opción viable



CONCLUSIONES

A lo largo del desarrollo de este proyecto de tesis, se ha logrado con éxito el diseño e implementación de un equipo portátil detector de gases (H_2S , CH_4 , CO y O_2) con geolocalización, utilizando tecnología de modulación LoRa y un sistema automático de control de emergencias basado en IoT.

El equipo desarrollado se basa en una placa de desarrollo Arduino Nano Every que integra los sensores de gases, un módulo GPS NEO-6M y un módulo LoRa RYL993_Lite. El firmware desarrollado para la placa ESP8266 permite la lectura de los sensores, el procesamiento de los datos, la obtención de la ubicación y la transmisión de la información a una estación base. Además, se implementó un algoritmo de control de emergencias que activa una alarma en caso de detectar niveles peligrosos de gases.

Las pruebas realizadas al sistema demuestran su capacidad para detectar con precisión los gases mencionados en los rangos de concentración relevantes para la aplicación. El sistema de geolocalización también presenta una precisión aceptable, con un error promedio de 3.6 metros. El sistema de control de emergencias responde de manera efectiva ante situaciones de emergencia, activando la alarma y enviando una notificación a la estación base.

En conclusión, se puede afirmar que el sistema desarrollado cumple con los objetivos planteados al inicio de la investigación. Se ha logrado diseñar e implementar un sistema de monitoreo de gases y geolocalización que permite prevenir accidentes en espacios confinados. El sistema es preciso, confiable, eficiente y fácil de usar, y puede ser utilizado en una variedad de aplicaciones industriales.

Aportes de la investigación:

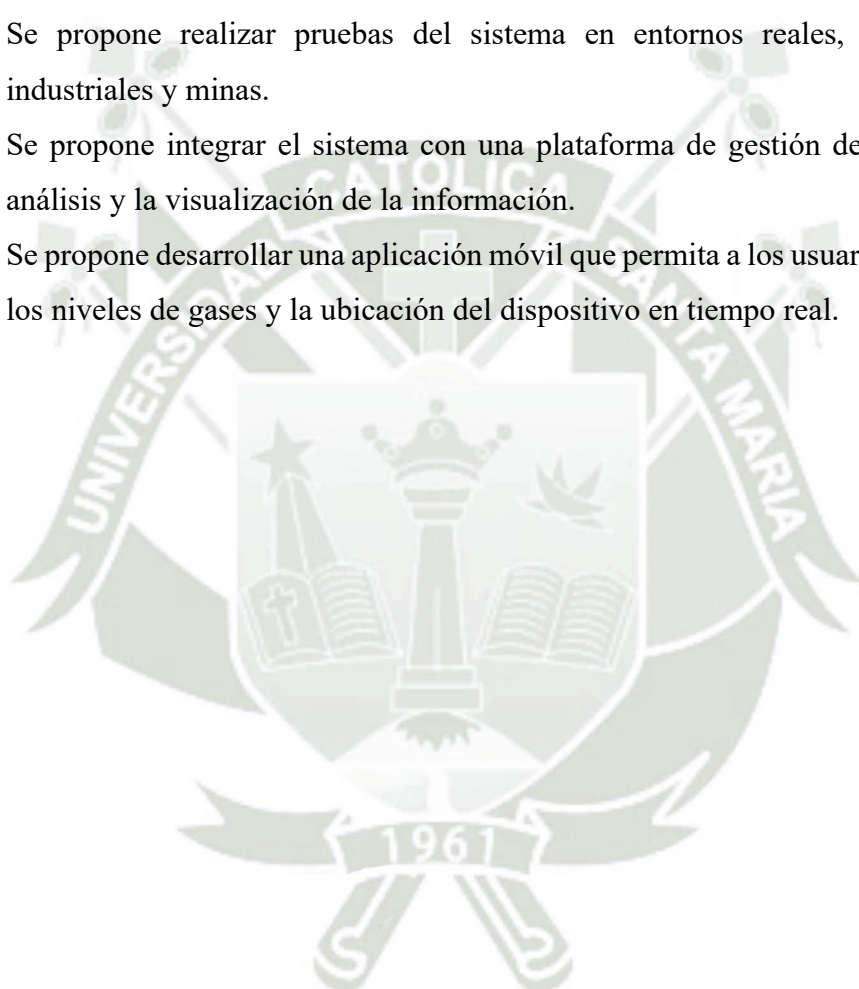
- Se ha desarrollado un sistema de monitoreo de gases y geolocalización de bajo costo y fácil implementación.
- Se ha implementado un algoritmo de control de emergencias que permite la activación de una alarma y el envío de notificaciones en caso de detectar niveles peligrosos de gases.
- Se ha demostrado la efectividad del sistema en la prevención de accidentes en espacios confinados.

Limitaciones de la investigación:

- El sistema se ha probado en un entorno controlado. Se requiere realizar pruebas en entornos reales para evaluar su desempeño en condiciones de operación.
- El sistema se ha diseñado para la detección de cuatro gases específicos. Se podría ampliar la funcionalidad del sistema para la detección de otros gases.

Trabajos futuros:

- Se propone realizar pruebas del sistema en entornos reales, como plantas industriales y minas.
- Se propone integrar el sistema con una plataforma de gestión de datos para el análisis y la visualización de la información.
- Se propone desarrollar una aplicación móvil que permita a los usuarios monitorear los niveles de gases y la ubicación del dispositivo en tiempo real.



RECOMENDACIONES

Con base en el desarrollo del proyecto y los resultados obtenidos, se formulan las siguientes recomendaciones:

Para la implementación del sistema:

- **Capacitación del personal:** Es fundamental capacitar al personal que utilizará el sistema sobre su funcionamiento, la interpretación de las alarmas y las acciones a tomar en caso de emergencia. Se debe hacer énfasis en la importancia del uso correcto del equipo para la prevención de accidentes.
- **Ubicación estratégica de los dispositivos:** Los dispositivos deben ser ubicados en puntos estratégicos de la mina, considerando las zonas con mayor riesgo de acumulación de gases, la accesibilidad para la lectura de la pantalla y la cobertura de la red LoRa.
- **Monitoreo constante:** Se recomienda monitorear constantemente los datos recibidos en la plataforma IoT para identificar posibles patrones de comportamiento de los gases y detectar situaciones de riesgo de forma temprana.
- **Mantenimiento preventivo:** Se debe establecer un programa de mantenimiento preventivo para el sistema, que incluya la limpieza de los sensores, la calibración del equipo, la verificación de la batería y la actualización del firmware.
- **Protocolos de seguridad:** Se deben establecer protocolos de seguridad claros y concisos para la actuación en caso de emergencia, incluyendo la evacuación de la zona de riesgo, la comunicación con el personal de seguridad y la atención a las personas afectadas.

Para futuras investigaciones:

- **Ampliación de la funcionalidad:** Se recomienda ampliar la funcionalidad del sistema para la detección de otros gases, la medición de variables ambientales (temperatura, humedad, presión) y la integración con otros sistemas de seguridad.
- **Miniaturización del dispositivo:** Se podría investigar la posibilidad de miniaturizar el dispositivo para hacerlo más cómodo de usar y adaptable a diferentes entornos.

- **Mejora de la autonomía:** Se recomienda investigar nuevas tecnologías de baterías o métodos de recolección de energía para mejorar la autonomía del dispositivo.
- **Implementación de algoritmos de inteligencia artificial:** Se podría investigar la posibilidad de implementar algoritmos de inteligencia artificial en la plataforma IoT para el análisis predictivo de los datos y la detección temprana de situaciones de riesgo.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- IntechOpen. (2020). *Industry 4.0 - Current Status and Future Trends*. (J. Hamilton, Ed.)
https://library.oapen.org/bitstream/handle/20.500.12657/43836/external_content.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Amazon web services. (2023). *Amazon*. <https://aws.amazon.com/es/iot-core/lorawan/>
- Clavijo, J. (s.f.). *Instrumentación Especializada Higiene y Seguridad*. Safety Instruments.
https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/presentacion_multi_detectores_ibrid-mx6.pdf
- DNA Technology. (2015). *DNA Technology*. <https://www.dnatechindia.com/ZE-03-H2S-Hydrogen-sulfide-gas-sensor-module-buy-india.html>
- Espinoza, H. (2021). Plataforma basada en Internet de las cosas (IOT) para la medición y monitoreo remoto del nivel de Gas Sulfuro de Hidrógeno Generado por baterías de montacargas eléctricos en entornos logísticos. Ups.edu.ec.
<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/20311>
- Heltec Automation. (2020). *Wifi Lora 32(V2) LoRa node Development kit*.
<https://resource.heltec.cn/download/Manual%20Old/WiFi%20Lora32Manual.pdf>
- Mendoza, R., & De Los Santos, R. (2023). Diseño e implementación de una red piloto LoRaWAN para el monitoreo remoto de cuatro parámetros médicos. Repositorio Institucional de La Universidad Ricardo Palma; Universidad Ricardo Palma - URP. <https://hdl.handle.net/20.500.14138/7090>
- Nossa, I., & Arias, R. (2020). *Implementación red de sensores inalámbrico de bajo costo utilizando protocolo LORAWAN aplicada al monitoreo de amterial particulado, monóxido de carbo y dióxido de nitrógeno como indicadores de claidad de aire en exteriores*. Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas.
<https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/25644/NossaRuizIvetteLorenaAriasCasta%20c3%20b1edaRudyMarcela2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Peñaloza, J., & Yupanqui, R. (2022). *Diseño de un sistema IOT de bajo costo basado en LPWAN para cultivos Hidropónicos*. Universidad Nacional de Tacna.
<https://repositorio.upt.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12969/2390/Penaloz-Velasquez-Yupanqui-Gonzalo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Rios, R. (2020). *Prototipo de monitoreo de calidad de condiciones ambientales a bajo costo con tecnologías IOT*. Universidad de la Salle, Bogotá. https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1279&context=ing_automatizacion
- Salesforce. (2023). mulesoft: <https://www.mulesoft.com/resources/api/what-is-an-api>
- Lizandro Ernesto Lobos Machuca (2015). Evaluación del uso de NaSH en el circuito de flotación selectiva de molibdeno de los Pelambres [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18651>
- Correa Varas, J., y Zavala Chacon, I. (2020). Diseño e implementación de un sistema de detección y monitoreo de gas metano en una maqueta de planta de tratamiento de aguas [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica SALESIANA - ECUADOR]. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18651>
- Néstor de Juan Vázquez (2017). Diseño de Dispositivo Detector de Gases en Electrónica Flexible para Equipos de Protección Individual [Tesis de pregrado, Universidad de Oviedo]. <http://hdl.handle.net/10651/43540>
- Valqui Cieza, R. (2022). Diseño e implementación de un sistema electrónico de monitoreo de gases tóxicos para minería subterránea con acceso remoto a través de web server [Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica del Perú]. <https://hdl.handle.net/20.500.12867/2416>
- Rueda, H. G. (2022, Julio 21). Universidad técnica de Ambato facultad de ingeniería en sistemas, electrónica e industrial carrera de ingeniería en electrónica. Repositorio <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/36595/1/t2124ec.pdf>
- Carmen Angela Pinto Condori. (2015). Propuesta de un diseño para un sistema de control y monitoreo de fugas de gas a fin de reducir riesgos laborales, en una estación de servicios de GLP [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín]. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/3314>
- Dräger Safety AG & Co. KGaA. Monitorización del H₂S en la industria del gas y el petróleo [Informe Técnico]. <https://www.draeger.com/Library/Content/H2S-Monitoring-Whitepaper-9109269-es.pdf>

ANEXOS

ANEXO N°1: IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO DE GASES

Esta sección describe la implementación del sistema de monitoreo de gases, detallando el hardware utilizado, la arquitectura del software y la lógica de funcionamiento del firmware desarrollado para el microcontrolador ATmega4809.

Hardware

El sistema se basa en el microcontrolador ATmega4809, elegido por su bajo costo, capacidad de procesamiento, buena memoria, y la disponibilidad de GPIOs para la conexión de sensores. Los componentes principales del sistema son:

- **Microcontrolador ATmega4809:** Actúa como el cerebro del sistema, procesando las lecturas de los sensores, controlando la comunicación LoRa y gestionando las alarmas.
- **Sensores de Gases ZE03:** Se utilizan sensores ZE03 para la detección de gases (monóxido de Carbono, ácido sulfhídrico, oxígeno), y también se utiliza el MH-440D para la detección de metano.
- **Módulo GPS NEO-6M:** Proporciona la ubicación geográfica del dispositivo, permitiendo la geolocalización en tiempo real.
- **Módulo LoRa Reyax RYLR993_Lite:** Permite la comunicación inalámbrica de largo alcance y bajo consumo de energía entre el dispositivo y la estación base.
- **Buzzer:** Emite una señal sonora en caso de detectar concentraciones de gases peligrosas.
- **LEDs:** Indican el estado del dispositivo y las alertas.

Arquitectura del Software

El firmware del ESP8266 se desarrolló en C++, utilizando el entorno de desarrollo Arduino IDE. El código se estructura en módulos para facilitar la lectura, el mantenimiento y la reutilización. Los módulos principales son:

- **Inicialización:** Configura los pines GPIO, inicializa los sensores de gases, el módulo GPS, el módulo LoRa y los periféricos (buzzer y LEDs).

- **Lectura de Sensores:** Lee las señales analógicas de los sensores de gases, las convierte a valores de concentración en ppm (partes por millón) utilizando una conversión matemática y aplica algoritmos de calibración para mejorar la precisión.
- **Comunicación LoRa:** Construye paquetes de datos con las lecturas de los sensores, la ubicación GPS y el estado del dispositivo, y los transmite a la estación base a través del módulo LoRa.
- **Control de Alarmas:** Monitorea las lecturas de los sensores y activa las alarmas (buzzer, vibrador y LEDs) si se superan los umbrales de seguridad predefinidos.
- **Gestión de Energía:** Implementa estrategias de ahorro de energía, como la activación/desactivación de módulos y la reducción de la frecuencia de muestreo de los sensores.

Lógica de Funcionamiento

El sistema funciona de la siguiente manera:

1. **Inicialización:** Al encenderse, el dispositivo inicializa todos los componentes y se conecta a la red LoRa.
2. **Lectura de Sensores:** El firmware lee periódicamente los sensores de gases y el módulo GPS, obteniendo la concentración de gases y la ubicación.
3. **Procesamiento de Datos:** Los datos de los sensores se procesan y se convierten a unidades de ppm. Se aplican filtros y algoritmos de calibración para mejorar la precisión y reducir el ruido.
4. **Transmisión de Datos:** El dispositivo construye un paquete de datos con la información relevante (concentración de gases, ubicación, estado de la alarma) y lo transmite a la estación base a través de la red LoRa.
5. **Control de Alarmas:** El firmware compara las lecturas de los sensores con los umbrales de seguridad. Si se supera un umbral, se activa la alarma (buzzer, vibrador y LEDs) y se envía una notificación a la estación base.
6. **Monitoreo Continuo:** El sistema repite los pasos 2 a 5 de forma continua, monitoreando la concentración de gases y la ubicación en tiempo real.

Fragmentos de Código

A continuación, se presentan el código utilizado para la implementación del sistema:

```
#include <SPI.h>
#include <Wire.h>
#include <SoftwareSerial.h>
#include <U8g2lib.h>
#include <TinyGPS.h>
#include <EEPROM.h>

// ----- Pantalla OLED SSD1327 -----
U8G2_SSD1327_MIDAS_128X128_1_HW_I2C u8g2(U8G2_R0, U8X8_PIN_NONE);

// ----- Pines sensores -----
#define CH4_PIN    A0
#define CO_PIN     A1
#define O2_PIN     A2
#define H2S_PIN    A3
#define BATTERY_PIN A6 // Nuevo pin para lectura de batería

#define slave_Address 2

// ----- Botones -----
#define BTN_MENU    11
#define BTN_YES     10
#define BTN_NO      12

// ----- Pines alarmas (comunes a LOW/HIGH/STEL/TWA) -----
#define ALARM_PIN1  0 // D0 - BUZZER
#define ALARM_PIN2  2 // D2 - VIBRADOR
#define ALARM_PIN3  9 // D9
#define SAFETY_LED_PIN 3 // D3 - LED de Seguridad (VERDE)

// ----- Pines RF -----
const int transmitPin = 13; // Pin DATA del módulo TX
const int pulseWidth = 500; // Ancho de pulso en microsegundos
(más largo)
const int headerPulses = 5; // Pulsos de cabecera
const int dataPulses = 10; // Pulsos de datos
const int packetDelay = 50; // Retardo entre paquetes

// ----- Estados generales -----
bool isPoweredOn = true;
bool showShutdownMenu = false;
bool screenIsOn = true;
bool calibrating = false;
bool calibratingSpan = false; // Nueva variable para calibración
SPAN

// ----- Intervalo envío/lectura principal -----
--
unsigned long previousMillis = 0;
const long interval = 3000; // 3 s

// ----- Variables sensores (raw) -----
int ch4Value;
int coValue;
int o2Value;
int h2sValue;
```



```
int batteryValue; // Nueva variable para lectura de batería

// ----- Offsets -----
float offset_CH4 = 0.0;
float offset_CO = 0.0;
float offset_O2 = 0.0;
float offset_H2S = 0.0;

// ----- Variables para calibración SPAN -----
float span_CH4 = 29.0; // Valor objetivo CH4 en %LEL (gas patrón)
int span_CO = 60; // Valor objetivo CO (promedio de 57-63 ppm)
float span_O2 = 15.0; // Valor objetivo O2 (promedio de 14-16%)
int span_H2S = 20; // Valor objetivo H2S (promedio de 18-22 ppm)

// ----- Variables para calibración SPAN -----
float span_offset_CH4 = 0.0;
float span_offset_CO = 0.0;
float span_offset_O2 = 0.0;
float span_offset_H2S = 0.0;

// ----- Factores de ganancia SPAN (para corrección de sensibilidad) -----
float span_gain_CO = 1.0; // Factor de ganancia para CO (1.0 = sin corrección)
float span_gain_H2S = 1.0; // Factor de ganancia para H2S (1.0 = sin corrección)

// ----- Variables para indicador de calibración SPAN -----
// Direcciones EEPROM para guardar el tiempo de calibración (4 bytes para unsigned long)
#define EEPROM_CAL_TIME_ADDR 0
#define CAL_DURATION_HOURS 48
const unsigned long CAL_DURATION_MS = CAL_DURATION_HOURS * 3600000UL; // 48 horas en milisegundos
unsigned long calibrationTime = 0; // Tiempo de calibración SPAN (en millis)
bool showCalOk = false; // Indicador para mostrar "CAL OK" en pantalla

// ----- GPS -----
float latitude, longitude;
TinyGPS GPS;
SoftwareSerial Serial_GPS(7, 6); // RX, TX
unsigned long chars;
unsigned short sentences, failed_checksum;

// ----- LoRa -----
SoftwareSerial ReyaxLoRa(5, 4); // RX, TX

// ----- Alarmas instantáneas -----
unsigned long prevAlarmMillis = 0;
bool alarmState = false;
bool alarmAlActiva = false; // LOW
```

```

bool alarma2Activa = false; // HIGH

// ----- STEL (15 min TWA para CO y H2S) -----
// Muestreamos cada 5 s → 15 min = 900 s → 180 muestras
const unsigned long STEL_SAMPLE_MS = 5000;
const int STEL_WINDOW_SAMPLES = 180; // 15 min a 5 s
int16_t stelBufferCO[STEL_WINDOW_SAMPLES] = {0};
int16_t stelBufferH2S[STEL_WINDOW_SAMPLES] = {0};
long stelSumCO = 0; // suma de ventana
long stelSumH2S = 0;
int stelIndex = 0;
int stelCount = 0;
unsigned long lastStelSampleMs = 0;

bool alarmaSTELActiva = false; // STEL activa (misma
prioridad que HIGH)
const int STEL_CO_LIMIT = 100; // ppm
const int STEL_H2S_LIMIT = 15; // ppm

// ----- TWA (8 h) para CO y H2S -----
// Se promedia por minuto para ahorrar memoria: 8 h = 480 minutos
const unsigned long TWA_SAMPLE_MS = 60000; // cada minuto
const int TWA_WINDOW_MIN = 480; // 8h * 60min
// Buffers circulares compactos (0..255 ppm). Si esperas >255 ppm
sostenidos, conviene uint16_t.
uint8_t twaBufferCO[TWA_WINDOW_MIN] = {0};
uint8_t twaBufferH2S[TWA_WINDOW_MIN] = {0};
unsigned long twaSumCO = 0;
unsigned long twaSumH2S = 0;
int twaIndex = 0;
int twaCount = 0;
unsigned long lastTwaSampleMs = 0;

// Acumulación dentro del minuto (usamos lecturas de 3 s)
unsigned long twaMinuteAccumCO = 0;
unsigned long twaMinuteAccumH2S = 0;
int twaMinuteSamples = 0;

bool alarmaTWAActiva = false;
const int TWA_CO_LIMIT = 25; // ppm (8h)
const int TWA_H2S_LIMIT = 10; // ppm (8h)

// Últimas lecturas calculadas (para alimentar STEL / TWA)
int lastCoppm = 0;
int lastH2Sppm = 0;

// ----- Variables para LED de Seguridad -----
unsigned long lastSafetyLedMillis = 0;
const unsigned long SAFETY_LED_INTERVAL = 15000; // 15 segundos
bool safetyLedState = false;

// ----- FUNCIONES -----
// Función para escribir unsigned long en EEPROM (4 bytes)
void writeLongToEEPROM(int address, unsigned long value) {
    EEPROM.write(address, (value >> 24) & 0xFF);
    EEPROM.write(address + 1, (value >> 16) & 0xFF);
    EEPROM.write(address + 2, (value >> 8) & 0xFF);
}

```

```
EEPROM.write(address + 3, value & 0xFF);
}

// Función para leer unsigned long de EEPROM (4 bytes)
unsigned long readLongFromEEPROM(int address) {
    unsigned long value = 0;
    value |= ((unsigned long)EEPROM.read(address)) << 24;
    value |= ((unsigned long)EEPROM.read(address + 1)) << 16;
    value |= ((unsigned long)EEPROM.read(address + 2)) << 8;
    value |= ((unsigned long)EEPROM.read(address + 3));
    return value;
}

// Función para verificar si la calibración sigue siendo válida
void checkCalibrationStatus() {
    if (calibrationTime > 0) {
        unsigned long currentTime = millis();
        // Manejar overflow de millis() (cada ~49 días)
        unsigned long elapsedTime;
        if (currentTime >= calibrationTime) {
            elapsedTime = currentTime - calibrationTime;
        } else {
            // Si currentTime < calibrationTime, puede ser overflow o
            reset
            // Si la diferencia es muy grande (más de 24 horas),
            probablemente es overflow
            // Si la diferencia es pequeña, probablemente es reset
            reciente
            unsigned long diff = calibrationTime - currentTime;
            if (diff > (24UL * 3600000UL)) {
                // Probablemente es overflow, calcular tiempo restante
                elapsedTime = (ULONG_MAX - calibrationTime) + currentTime;
            } else {
                // Probablemente es reset reciente, asumir que la
                calibración sigue siendo válida
                // pero no podemos calcular el tiempo exacto, así que
                mostramos CAL OK
                // y esperamos a que pasen 48 horas desde el reset actual
                showCalOk = true;
                return;
            }
        }

        if (elapsedTime >= CAL_DURATION_MS) {
            // Han pasado 48 horas, borrar calibración
            calibrationTime = 0;
            showCalOk = false;
            writeLongToEEPROM(EEPROM_CAL_TIME_ADDR, 0);
            Serial.println("Calibracion SPAN expirada (48 horas)");
        } else {
            showCalOk = true;
        }
    } else {
        showCalOk = false;
    }
}
}
```



```
String getValue(String data, char separator, int index) {
    int found = 0;
    int strIndex[] = { 0, -1 };
    int maxIndex = data.length() - 1;
    for (int i = 0; i <= maxIndex && found <= index; i++) {
        if (data.charAt(i) == separator || i == maxIndex) {
            found++;
            strIndex[0] = strIndex[1] + 1;
            strIndex[1] = (i == maxIndex) ? i+1 : i;
        }
    }
    return found > index ? data.substring(strIndex[0], strIndex[1]) :
    "";
}

void ReyaxLoRa_Send(int addr, String data_send) {
    String str_Send = "AT+SEND=" + String(addr) + "," +
    String(data_send.length()) + "," + data_send + "\r";
    ReyaxLoRa.print(str_Send);
    Serial.println("Send to Slave : " + str_Send);
}

// ----- Nueva función para calcular nivel de batería ---
// -----
int getBatteryLevel(int batteryRaw) {
    // Convertir lectura ADC a voltaje (referencia 5V)
    float voltage = batteryRaw * (5.0 / 1023.0);

    // Convertir voltaje del divisor a voltaje real de batería
    // Divisor: 150kΩ + 100kΩ = 250kΩ total
    // V_bateria = V_leido * (250kΩ / 100kΩ) = V_leido * 2.5
    float batteryVoltage = voltage * 2.5;

    // Determinar nivel de batería basado en voltaje
    if (batteryVoltage >= 12.5) return 100; // 100%
    else if (batteryVoltage >= 11.375) return 75; // 75%
    else if (batteryVoltage >= 10.25) return 50; // 50%
    else if (batteryVoltage >= 9.125) return 25; // 25%
    else if (batteryVoltage >= 8.0) return 0; // 0%
    else return 0; // Por debajo de 8V
}

// ----- Nueva función para verificar condiciones de
// seguridad -----
bool checkSafetyConditions(float ch4, int co, float o2, int h2s, int
batteryLevel) {
    // Verificar que el equipo esté en modo medición (no apagado ni en
    menú)
    if (!isPoweredOn || showShutdownMenu || calibrating ||
    calibratingSpan) {
        return false;
    }

    // Verificar lecturas de sensores
    if (ch4 != 0.00) return false; // CH4 debe ser
    0.00% LEL
}
```

```

    if (co != 0) return false; // CO debe ser 0
ppm
    if (o2 < 20.6 || o2 > 20.9) return false; // O2 debe estar
entre 20.6% y 20.9%
    if (h2s != 0) return false; // H2S debe ser
0 ppm

    // Verificar que no haya alarmas de gas activas
    if (alarma1Activa || alarma2Activa) return false;

    // Verificar nivel de batería (debe ser >= 25%)
    if (batteryLevel < 25) return false;

    // Verificar que STEL y TWA sean 0 ppm
    if (alarmaSTELActiva || alarmaTWAActiva) return false;

    return true;
}

// ----- Nueva función para manejar LED de Seguridad -----
void manejarLedSeguridad(float ch4, int co, float o2, int h2s, int
batteryLevel) {
    unsigned long currentMillis = millis();

    if (checkSafetyConditions(ch4, co, o2, h2s, batteryLevel)) {
        // Condiciones de seguridad cumplidas - activar LED cada 15
segundos
        if (currentMillis - lastSafetyLedMillis >= SAFETY_LED_INTERVAL)
        {
            lastSafetyLedMillis = currentMillis;
            safetyLedState = !safetyLedState;
            digitalWrite(SAFETY_LED_PIN, safetyLedState);
        }
    } else {
        // Condiciones de seguridad no cumplidas - apagar LED
        digitalWrite(SAFETY_LED_PIN, LOW);
        safetyLedState = false;
    }
}

// ----- NUEVA FUNCIÓN: Señal de finalización de
calibración -----
void signalCalibrationComplete() {
    // 2 pitidos cortos en el buzzer (D0)
    for (int i = 0; i < 2; i++) {
        digitalWrite(ALARM_PIN1, HIGH); // Buzzer ON
        delay(200); // Pitido corto
        digitalWrite(ALARM_PIN1, LOW); // Buzzer OFF
        delay(100); // Pausa entre pitidos
    }

    // LED verde (D3) parpadeando 3 veces
    for (int i = 0; i < 3; i++) {
        digitalWrite(SAFETY_LED_PIN, HIGH); // LED verde ON
        delay(300);
        digitalWrite(SAFETY_LED_PIN, LOW); // LED verde OFF
    }
}

```

```

    delay(200);
}

// Asegurar que todas las salidas estén apagadas
digitalWrite(ALARM_PIN1, LOW); // Buzzer OFF
digitalWrite(ALARM_PIN2, LOW); // Vibrador OFF
digitalWrite(ALARM_PIN3, LOW); // Pin 9 OFF
digitalWrite(SAFETY_LED_PIN, LOW); // LED verde OFF
}

// ----- Función para enviar paquete RF -----
void sendPacket() {
    // Cabecera de sincronización (patrón diferente)
    for(int i=0; i<headerPulses; i++) {
        digitalWrite(transmitPin, HIGH);
        delayMicroseconds(pulseWidth*3); // Pulso largo para cabecera
        digitalWrite(transmitPin, LOW);
        delayMicroseconds(pulseWidth);
    }

    // Datos (pulsos regulares)
    for(int i=0; i<dataPulses; i++) {
        digitalWrite(transmitPin, HIGH);
        delayMicroseconds(pulseWidth);
        digitalWrite(transmitPin, LOW);
        delayMicroseconds(pulseWidth);
    }
}

// ----- Nueva función para desactivar todas las salidas
cuando está apagado -----
void desactivarSalidasApagado() {
    digitalWrite(ALARM_PIN1, LOW); // D0 - Buzzer
    digitalWrite(ALARM_PIN2, LOW); // D2 - Vibrador
    digitalWrite(SAFETY_LED_PIN, LOW); // D3 - LED verde
    digitalWrite(ALARM_PIN3, LOW); // D9
    digitalWrite(transmitPin, LOW); // D13 (RF)
}

void showDisplay(float ch4, int co, float o2, int h2s, int
batteryLevel, int ch4Raw, int coRaw, int o2Raw, int h2sRaw) {
    u8g2.firstPage();
    do {
        // Fuente grande para alarmas y valores principales
        u8g2.setFont(u8g2_font_7x14_tr);

        // Indicador de batería en la esquina superior derecha (solo
números)
        u8g2.setCursor(100, 15);
        u8g2.print(batteryLevel);
        u8g2.print("%");

        // Indicador de alarmas en la esquina superior izquierda
        if (alarma1Activa) {
            u8g2.setCursor(0, 15);
            u8g2.print("LOW");
        } else if (alarma2Activa) {

```



```

        u8g2.setCursor(0, 15);
        u8g2.print("HIGH");
    } else if (alarmaSTELActiva) {
        u8g2.setCursor(0, 15);
        u8g2.print("STEL");
    } else if (alarmaTWAActiva) {
        u8g2.setCursor(0, 15);
        u8g2.print("TWA");
    }

    // Indicador "CAL OK" entre alarmas y batería (si la calibración
    SPAN es válida)
    if (showCalOk) {
        u8g2.setCursor(45, 15);
        u8g2.print("CAL OK");
    }

    // Indicadores de alarmas de promedio (en la parte media)
    if (alarmaSTELActiva) { u8g2.setCursor(0, 40); u8g2.print("STEL
    ACTIVE"); }
    if (alarmaTWAActiva) { u8g2.setCursor(0, 55); u8g2.print("TWA
    ACTIVE"); }

    // Valores procesados (debajo de las alarmas, un poco más abajo)
    int y_start = (alarmaSTELActiva || alarmaTWAActiva) ? 75 : 45;
    // Ajustar según alarmas activas
    u8g2.setCursor(0, y_start); u8g2.print("CH4: ");
    u8g2.print(ch4, 2); u8g2.print("%LEL");
    u8g2.setCursor(0, y_start + 15); u8g2.print("CO : ");
    u8g2.print(co); u8g2.print(" ppm");
    u8g2.setCursor(0, y_start + 30); u8g2.print("O2 : ");
    u8g2.print(o2, 2); u8g2.print(" %");
    u8g2.setCursor(0, y_start + 45); u8g2.print("H2S: ");
    u8g2.print(h2s); u8g2.print(" ppm");

    // Texto "Detector de Gases" al final (más abajo y más a la
    izquierda)
    u8g2.setCursor(5, y_start + 65);
    u8g2.print("Detector de Gases");
    } while (u8g2.nextPage());
}

void drawShutdownMenu() {
    u8g2.firstPage();
    do {
        u8g2.setFont(u8g2_font_ncenB08_tr);
        u8g2.setCursor(25, 50); u8g2.print("Apagar Equipo?");
        u8g2.setCursor(25, 70); u8g2.print("SI: PD NO: PI");
    } while (u8g2.nextPage());
}

void ReyaxLoRa_Receive() {
    if (ReyaxLoRa.available() > 0 ) {
        String rcv_Data_String = ReyaxLoRa.readString();
        Serial.print("LoRa Reyax Result code : ");
        Serial.println(rcv_Data_String);
        if (rcv_Data_String.indexOf("RCV") > 0) {

```

```

        String _message = getValue(rcv_Data_String, ',', 2);
        // Procesar mensaje si es necesario
    }
}

// ----- FUNCIÓN DE CALIBRACIÓN ZERO CORREGIDA PARA MH-440D -----
void calibrateZero() {
    Serial.println("Iniciando calibracion Zero optimizada...");
    Serial.println("Midiendo durante 60 segundos...");

    // Desactivar alarmas durante la calibración
    digitalWrite(ALARM_PIN1, LOW); // D0 - Buzzer
    digitalWrite(ALARM_PIN2, LOW); // D2 - Vibrador
    digitalWrite(ALARM_PIN3, LOW); // D9

    // Variables para muestreo inteligente
    const int MAX_SAMPLES = 100; // Máximo 100 muestras en 60 segundos
    const int SAMPLE_INTERVAL = 600; // 600ms entre muestras (60s/100 = 600ms)

    // Arrays para almacenar muestras
    int ch4_samples[MAX_SAMPLES];
    int co_samples[MAX_SAMPLES];
    int o2_samples[MAX_SAMPLES];
    int h2s_samples[MAX_SAMPLES];

    // Variables para estadísticas
    int sample_count = 0;
    int ch4_min = 1023, ch4_max = 0;
    int co_min = 1023, co_max = 0;
    int o2_min = 1023, o2_max = 0;
    int h2s_min = 1023, h2s_max = 0;

    long sum_CH4 = 0, sum_CO = 0, sum_O2 = 0, sum_H2S = 0;

    // Tiempo de calibración: 60 segundos
    unsigned long startTime = millis();
    const unsigned long calibrationDuration = 60000; // 60 segundos

    // Mostrar mensaje fijo durante toda la calibración
    u8g2.firstPage();
    do {
        u8g2.setFont(u8g2_font_ncenB08_tr);
        u8g2.setCursor(10, 25); u8g2.print("Calibracion en zero");
        u8g2.setCursor(10, 45); u8g2.print("(60 Seg.)");
        u8g2.setCursor(10, 75); u8g2.print("Por favor no tocar");
        u8g2.setCursor(10, 90); u8g2.print("pulsadores");
    } while (u8g2.nextPage());

    // ALGORITMO DE MUESTREO INTELIGENTE
    unsigned long lastSampleTime = 0;

    while (millis() - startTime < calibrationDuration) {
        unsigned long currentTime = millis();

```

```

// Muestreo cada 600ms (más eficiente que cada 100ms)
if (currentTime - lastSampleTime >= SAMPLE_INTERVAL &&
sample_count < MAX_SAMPLES) {
    lastSampleTime = currentTime;

    // Leer sensores una sola vez por muestra (CH4 DESACTIVADO EN
    CALIBRACIÓN)
    // int ch4_raw = analogRead(CH4_PIN); // CH4 no se calibra
    int co_raw = analogRead(CO_PIN);
    int o2_raw = analogRead(O2_PIN);
    int h2s_raw = analogRead(H2S_PIN);

    // Almacenar muestras (CH4 DESACTIVADO)
    // ch4_samples[sample_count] = ch4_raw; // CH4 no se calibra
    co_samples[sample_count] = co_raw;
    o2_samples[sample_count] = o2_raw;
    h2s_samples[sample_count] = h2s_raw;

    // Actualizar estadísticas en tiempo real (CH4 DESACTIVADO)
    // if (ch4_raw < ch4_min) ch4_min = ch4_raw; // CH4 no se
    calibra
    // if (ch4_raw > ch4_max) ch4_max = ch4_raw; // CH4 no se
    calibra
    if (co_raw < co_min) co_min = co_raw;
    if (co_raw > co_max) co_max = co_raw;
    if (o2_raw < o2_min) o2_min = o2_raw;
    if (o2_raw > o2_max) o2_max = o2_raw;
    if (h2s_raw < h2s_min) h2s_min = h2s_raw;
    if (h2s_raw > h2s_max) h2s_max = h2s_raw;

    // Acumular para promedios (CH4 DESACTIVADO)
    // sum_CH4 += ch4_raw; // CH4 no se calibra
    sum_CO += co_raw;
    sum_O2 += o2_raw;
    sum_H2S += h2s_raw;

    sample_count++;
}

// Pequeña pausa para no sobrecargar el procesador
delay(10);
}

// ANÁLISIS ESTADÍSTICO AVANZADO (CH4 DESACTIVADO EN CALIBRACIÓN)
// float avg_CH4 = (float)sum_CH4 / sample_count; // CH4 no se
calibra
float avg_CO = (float)sum_CO / sample_count;
float avg_O2 = (float)sum_O2 / sample_count;
float avg_H2S = (float)sum_H2S / sample_count;

// Calcular desviación estándar para validación (CH4 DESACTIVADO)
// float std_CH4 = 0; // CH4 no se calibra
float std_CO = 0, std_O2 = 0, std_H2S = 0;

for (int i = 0; i < sample_count; i++) {

```



```
// std_CH4 += pow(ch4_samples[i] - avg_CH4, 2); // CH4 no se
calibra
std_CO += pow(co_samples[i] - avg_CO, 2);
std_O2 += pow(o2_samples[i] - avg_O2, 2);
std_H2S += pow(h2s_samples[i] - avg_H2S, 2);
}

// std_CH4 = sqrt(std_CH4 / sample_count); // CH4 no se calibra
std_CO = sqrt(std_CO / sample_count);
std_O2 = sqrt(std_O2 / sample_count);
std_H2S = sqrt(std_H2S / sample_count);

// VALIDACIÓN DE CALIBRACIÓN CORREGIDA PARA MH-440D
bool calibration_valid = true;
String error_message = "";

// Verificar estabilidad (desviación estándar baja) - CH4
DESACTIVADO EN CALIBRACIÓN
// if (std_CH4 > 3.0) { calibration_valid = false; error_message
+= "CH4 "; } // CH4 desactivado
if (std_CO > 5.0) { calibration_valid = false; error_message +=
"CO "; }
if (std_O2 > 5.0) { calibration_valid = false; error_message +=
"O2 "; }
if (std_H2S > 5.0) { calibration_valid = false; error_message +=
"H2S "; }

// Verificar rangos razonables - CH4 DESACTIVADO EN CALIBRACIÓN
// if (avg_CH4 < 79 || avg_CH4 > 86) { calibration_valid = false;
error_message += "CH4_RANGE "; } // CH4 desactivado
if (avg_CO < 120 || avg_CO > 180) { calibration_valid = false;
error_message += "CO_RANGE "; } // CORREGIDO para ZE-03: 120-180
if (avg_O2 < 81 || avg_O2 > 86) { calibration_valid = false;
error_message += "O2_RANGE "; } // CORREGIDO: 81-86 para valores
raw en ZERO (20.8% O2)
if (avg_H2S < 120 || avg_H2S > 180) { calibration_valid = false;
error_message += "H2S_RANGE "; } // CORREGIDO para ZE-03: 120-180

// Mostrar resultado de validación
if (calibration_valid) {
u8g2.firstPage();
do {
u8g2.setFont(u8g2_font_ncenB08_tr);
u8g2.setCursor(20, 30); u8g2.print("ZERO PASS");
u8g2.setCursor(10, 50); u8g2.print("Calibracion exitosa");
u8g2.setCursor(10, 70); u8g2.print("Muestras: ");
u8g2.print(sample_count);
} while (u8g2.nextPage());
delay(2000);
} else {
u8g2.firstPage();
do {
u8g2.setFont(u8g2_font_ncenB08_tr);
u8g2.setCursor(20, 30); u8g2.print("ZERO ERROR");
u8g2.setCursor(10, 50); u8g2.print("Error en: ");
u8g2.setCursor(10, 70); u8g2.print(error_message);
} while (u8g2.nextPage());
}
```

```

    delay(3000);

    // Si hay error, no continuar con la calibración
    calibrating = false;
    return;
}

// Mostrar estadísticas de la calibración (CH4 excluido)
u8g2.firstPage();
do {
    u8g2.setFont(u8g2_font_ncenB08_tr);
    u8g2.setCursor(10, 20); u8g2.print("Estadísticas:");
    // u8g2.setCursor(10, 40); u8g2.print("CH4: ");
    u8g2.print(ch4_min); u8g2.print("-"); u8g2.print(ch4_max); // CH4
    desactivado
    u8g2.setCursor(10, 40); u8g2.print("CO: ");
    u8g2.print(co_min); u8g2.print("-"); u8g2.print(co_max);
    u8g2.setCursor(10, 55); u8g2.print("O2: ");
    u8g2.print(o2_min); u8g2.print("-"); u8g2.print(o2_max);
    u8g2.setCursor(10, 70); u8g2.print("H2S: ");
    u8g2.print(h2s_min); u8g2.print("-"); u8g2.print(h2s_max);
} while (u8g2.nextPage());
delay(2000);

// CALCULAR OFFSETS CORREGIDOS (CH4 DESACTIVADO EN CALIBRACIÓN)
// Convertir promedios ADC a voltajes
// float voltage_CH4_avg = avg_CH4 * (5.0 / 1023.0); // CH4 no se
calibra
float voltage_CO_avg = avg_CO * (5.0 / 1023.0);
float voltage_O2_avg = avg_O2 * (5.0 / 1023.0);
float voltage_H2S_avg = avg_H2S * (5.0 / 1023.0);

// Calcular offsets para cada sensor (CH4 DESACTIVADO)
// offset_CH4 = voltage_CH4_avg - 0.4; // CH4 no se calibra
offset_CO = voltage_CO_avg - 0.690;
// O2: Calcular offset para que en ZERO (20.8% O2) el voltaje
corregido sea correcto
// Fórmula: O2% = 16.667 × (1.5 - voltage_corregido)
// Para 20.8%: voltage_corregido = 1.5 - (20.8 / 16.667) = 1.5 -
1.248 = 0.252V
// offset_O2 = voltage_O2_avg - 0.252
offset_O2 = voltage_O2_avg - 0.252; // Offset para que 0.408V
(promedio ADC 83.5) dé 20.8%
offset_H2S = voltage_H2S_avg - 0.645;

// Mostrar offsets calculados (CH4 DESACTIVADO)
u8g2.firstPage();
do {
    u8g2.setFont(u8g2_font_ncenB08_tr);
    u8g2.setCursor(10, 20); u8g2.print("Offsets calculados:");
    // u8g2.setCursor(10, 40); u8g2.print("CH4: ");
    u8g2.print(offset_CH4, 3); // CH4 no se calibra
    u8g2.setCursor(10, 40); u8g2.print("CO: ");
    u8g2.print(offset_CO, 3);
    u8g2.setCursor(10, 55); u8g2.print("O2: ");
    u8g2.print(offset_O2, 3);
}

```

```

    u8g2.setCursor(10, 70); u8g2.print("H2S: ");
u8g2.print(offset_H2S, 3);
} while (u8g2.nextPage());
delay(2000);

// VALIDACIÓN FINAL - Verificar que los valores corregidos sean
correctos (CH4 DESACTIVADO)
// float test_voltage_CH4 = voltage_CH4_avg - offset_CH4; // CH4
no se calibra
float test_voltage_CO = voltage_CO_avg - offset_CO;
float test_voltage_O2 = voltage_O2_avg - offset_O2;
float test_voltage_H2S = voltage_H2S_avg - offset_H2S;

// FÓRMULAS CORREGIDAS (CH4 DESACTIVADO)
// float test_CH4 = (test_voltage_CH4 - 0.4) / (1.204 - 0.4) *
50.0; // CH4 no se calibra
int test_CO = round((test_voltage_CO - 0.690) / 0.0024);
// O2: Fórmula según hoja de datos - 0% O2 = 1.5V, 25% O2 = 0V
float test_O2 = 16.667 * (1.5 - test_voltage_O2); // CORREGIDO:
O2% = 16.667 × (1.5 - V)
int test_H2S = round((test_voltage_H2S - 0.645) * 41.6667);

// Verificar que los valores estén en rangos aceptables (CH4
DESACTIVADO)
bool final_validation = true;
// if (test_CH4 > 3.0 || ...) // CH4 no se valida
if (test_CO > 1 || test_O2 < 20.6 || test_O2 > 21.0 || test_H2S >
1) {
    final_validation = false;
}

u8g2.firstPage();
do {
    u8g2.setFont(u8g2_font_ncenB08_tr);
    u8g2.setCursor(10, 20); u8g2.print("Valores finales:");
    // u8g2.setCursor(10, 40); u8g2.print("CH4: ");
u8g2.print(test_CH4, 2); u8g2.print("%LEL"); // CH4 no se calibra
    u8g2.setCursor(10, 40); u8g2.print("CO: ");
u8g2.print(test_CO); u8g2.print(" ppm");
    u8g2.setCursor(10, 55); u8g2.print("O2: "); u8g2.print(test_O2,
2); u8g2.print("%");
    u8g2.setCursor(10, 70); u8g2.print("H2S: ");
u8g2.print(test_H2S); u8g2.print(" ppm");

    if (final_validation) {
        u8g2.setCursor(10, 85); u8g2.print("VALIDACION OK");
    } else {
        u8g2.setCursor(10, 85); u8g2.print("VALIDACION ERROR");
    }
} while (u8g2.nextPage());
delay(2000);

// Señal de finalización exitosa
if (final_validation) {
    signalCalibrationComplete();
}

```



```
// Log detallado para debugging (CH4 DESACTIVADO)
Serial.println("=== CALIBRACION ZERO COMPLETADA ===");
Serial.print("Muestras tomadas: "); Serial.println(sample_count);
Serial.print("Tiempo total: "); Serial.print((millis() -
startTime) / 1000); Serial.println(" segundos");
// Serial.print("Promedio CH4 RAW: "); Serial.println(avg_CH4, 2);
// CH4 no se calibra
// Serial.print("Voltaje CH4 promedio: ");
Serial.print(voltage_CH4_avg, 3); Serial.println("V"); // CH4 no se
calibra
// Serial.print("Desviaciones estandar - CH4: ");
Serial.print(std_CH4, 2); // CH4 no se calibra
Serial.print("Desviaciones estandar - CO: "); Serial.print(std_CO,
2);
Serial.print(", O2: "); Serial.print(std_O2, 2);
Serial.print(", H2S: "); Serial.println(std_H2S, 2);
// Serial.print("Offsets finales - CH4: ");
Serial.print(offset_CH4, 3); // CH4 no se calibra
Serial.print("Offsets finales - CO: "); Serial.print(offset_CO,
3);
Serial.print(", O2: "); Serial.print(offset_O2, 3);
Serial.print(", H2S: "); Serial.println(offset_H2S, 3);
// Serial.print("Valores de prueba - CH4: ");
Serial.print(test_CH4, 2); Serial.print("%LEL, "); // CH4 no se
calibra
Serial.print("Valores de prueba - CO: "); Serial.print(test_CO);
Serial.print(" ppm, O2: "); Serial.print(test_O2, 2);
Serial.print("%, H2S: "); Serial.println(test_H2S);
Serial.println("=====");

calibrating = false;
}

// ----- FUNCIÓN DE CALIBRACIÓN SPAN CORREGIDA -----
-----
void calibrateSpan() {
    Serial.println("Iniciando calibracion SPAN...");
    Serial.println("Esperando 24 segundos para estabilizacion del
gas...");

    // Desactivar alarmas durante la calibración
    digitalWrite(ALARM_PIN1, LOW); // D0 - Buzzer
    digitalWrite(ALARM_PIN2, LOW); // D2 - Vibrador
    digitalWrite(ALARM_PIN3, LOW); // D9

    // ESPERA DE ESTABILIZACIÓN: 24 segundos antes de empezar a medir
    unsigned long stabilizationStart = millis();
    const unsigned long stabilizationTime = 24000; // 24 segundos

    while (millis() - stabilizationStart < stabilizationTime) {
        // Mostrar tiempo de espera en pantalla
        u8g2.firstPage();
        do {
            u8g2.setFont(u8g2_font_ncenB08_tr);
            u8g2.setCursor(10, 20); u8g2.print("Esperando estabiliz.");
            u8g2.setCursor(10, 40); u8g2.print("Tiempo: ");

```

```

        u8g2.print((stabilizationTime - (millis() -
stabilizationStart)) / 1000);
        u8g2.print("s");
        u8g2.setCursor(10, 60); u8g2.print("Gas patron:");
        u8g2.setCursor(10, 75); u8g2.print("CO:60ppm O2:15%");
        u8g2.setCursor(10, 90); u8g2.print("H2S:20ppm");
    } while (u8g2.nextPage());
    delay(100);
}

Serial.println("Iniciando medicion durante 90 segundos...");

// Variables para almacenar valores máximos y mínimos
int ch4_min = 1023, ch4_max = 0;
int co_min = 1023, co_max = 0;
int o2_min = 1023, o2_max = 0;
int h2s_min = 1023, h2s_max = 0;

// Variables para acumular promedios
long sum_CH4 = 0, sum_CO = 0, sum_O2 = 0, sum_H2S = 0;
int count = 0;

// Tiempo de calibración: 90 segundos (después de los 24s de
espera)
unsigned long startTime = millis();
const unsigned long calibrationDuration = 90000; // 90 segundos

while (millis() - startTime < calibrationDuration) {
    // Mostrar progreso en pantalla
    u8g2.firstPage();
    do {
        u8g2.setFont(u8g2_font_ncenB08_tr);
        u8g2.setCursor(10, 20); u8g2.print("Calibrando SPAN...");
        u8g2.setCursor(10, 40); u8g2.print("Tiempo: ");
        u8g2.print((calibrationDuration - (millis() - startTime)) /
1000);
        u8g2.print("s");
        u8g2.setCursor(10, 60); u8g2.print("Gas patron:");
        u8g2.setCursor(10, 75); u8g2.print("CO:60ppm O2:15%");
        u8g2.setCursor(10, 90); u8g2.print("O2:15% H2S:20ppm");
    } while (u8g2.nextPage());

    // Leer sensores (CH4 DESACTIVADO EN CALIBRACIÓN)
    // ch4Value = analogRead(CH4_PIN); // CH4 no se calibra
    coValue = analogRead(CO_PIN);
    o2Value = analogRead(O2_PIN);
    h2sValue = analogRead(H2S_PIN);

    // Actualizar máximos y mínimos (CH4 DESACTIVADO)
    // if (ch4Value < ch4_min) ch4_min = ch4Value; // CH4 no se
calibra
    // if (ch4Value > ch4_max) ch4_max = ch4Value; // CH4 no se
calibra
    if (coValue < co_min) co_min = coValue;
    if (coValue > co_max) co_max = coValue;
    if (o2Value < o2_min) o2_min = o2Value;
    if (o2Value > o2_max) o2_max = o2Value;
}

```

```

    if (h2sValue < h2s_min) h2s_min = h2sValue;
    if (h2sValue > h2s_max) h2s_max = h2sValue;

    // Acumular para promedios (CH4 DESACTIVADO)
    // sum_CH4 += ch4Value; // CH4 no se calibra
    sum_CO += coValue;
    sum_O2 += o2Value;
    sum_H2S += h2sValue;
    count++;

    delay(100); // Muestreo cada 100ms
}

// Calcular promedios (CH4 DESACTIVADO EN CALIBRACIÓN)
// float avg_CH4 = (float)sum_CH4 / count; // CH4 no se calibra
float avg_CO = (float)sum_CO / count;
float avg_O2 = (float)sum_O2 / count;
float avg_H2S = (float)sum_H2S / count;

// Mostrar resultados de la calibración (CH4 DESACTIVADO)
u8g2.firstPage();
do {
    u8g2.setFont(u8g2_font_ncenB08_tr);
    u8g2.setCursor(10, 20); u8g2.print("SPAN COMPLETO");
    // u8g2.setCursor(10, 40); u8g2.print("CH4: ");
    u8g2.print(ch4_min); u8g2.print("-"); u8g2.print(ch4_max); // CH4
    no se calibra
    u8g2.setCursor(10, 40); u8g2.print("CO: ");
    u8g2.print(co_min); u8g2.print("-"); u8g2.print(co_max);
    u8g2.setCursor(10, 55); u8g2.print("O2: ");
    u8g2.print(o2_min); u8g2.print("-"); u8g2.print(o2_max);
    u8g2.setCursor(10, 70); u8g2.print("H2S: ");
    u8g2.print(h2s_min); u8g2.print("-"); u8g2.print(h2s_max);
} while (u8g2.nextPage());
delay(3000);

// Calcular factores SPAN para que den exactamente los valores del
gas patrón (CH4 DESACTIVADO)
// Convertir promedios ADC a voltajes
// float voltage_CH4_avg = avg_CH4 * (5.0 / 1023.0); // CH4 no se
calibra
float voltage_CO_avg = avg_CO * (5.0 / 1023.0);
float voltage_O2_avg = avg_O2 * (5.0 / 1023.0);
float voltage_H2S_avg = avg_H2S * (5.0 / 1023.0);

// CH4: DESACTIVADO EN CALIBRACIÓN SPAN
// span_offset_CH4 = voltage_CH4_avg - 0.866; // CH4 no se
calibra

// CO: Calcular factor de ganancia usando la lectura en ppm
durante SPAN
// Primero aplicar offset ZERO al voltaje promedio de SPAN
float voltage_CO_span_zero_corrected = voltage_CO_avg - offset_CO;
// Calcular ppm medido durante SPAN con la fórmula estándar
float co_ppm_span_measured = (voltage_CO_span_zero_corrected -
0.690) / 0.0024;

```



```

if (co_ppm_span_measured > 1.0f) { // evitar división por valores
muy pequeños
    span_gain_CO = (float)span_CO / co_ppm_span_measured;
} else {
    span_gain_CO = 1.0f;
}

// O2: Para que dé 15%, necesitamos calcular el voltaje
correspondiente
// Fórmula: O2% = 16.667 × (1.5 - voltage_corregido)
// Despejando para 15%: voltage_corregido = 1.5 - (15 / 16.667) =
1.5 - 0.9 = 0.6V
// span_offset_O2 = voltage_O2_avg - 0.6
span_offset_O2 = voltage_O2_avg - 0.6;

// H2S: Calcular factor de ganancia para corrección SPAN
// Primero aplicar offset ZERO al voltaje medido en SPAN
float voltage_H2S_span_zero_corrected = voltage_H2S_avg -
offset_H2S;

// Voltajes esperados: 0 ppm = 0.645V, 20 ppm = 1.125V
float voltage_expected_zero = 0.645; // Voltaje esperado para 0
ppm
float voltage_expected_span = 1.125; // Voltaje esperado para 20
ppm

// Calcular factor de ganancia: ganancia = (voltaje_esperado_SPAN
- voltage_esperado_ZERO) / (voltaje_medido_SPAN -
voltage_esperado_ZERO)
if (voltage_H2S_span_zero_corrected > voltage_expected_zero +
0.01) { // Evitar división por cero
    span_gain_H2S = (voltage_expected_span - voltage_expected_zero)
/ (voltage_H2S_span_zero_corrected - voltage_expected_zero);
} else {
    span_gain_H2S = 1.0; // Si no hay diferencia, no aplicar
ganancia
}

// Mantener el offset SPAN para compatibilidad (pero no se usará
en el cálculo principal)
span_offset_H2S = voltage_H2S_avg - 1.125;

// Mostrar factores / offsets SPAN calculados (CH4 DESACTIVADO)
u8g2.firstPage();
do {
    u8g2.setFont(u8g2_font_ncenB08_tr);
    u8g2.setCursor(10, 20); u8g2.print("SPAN FACTORES:");
    // u8g2.setCursor(10, 40); u8g2.print("CH4: ");
    u8g2.print(span_offset_CH4, 3); // CH4 no se calibra
    u8g2.setCursor(10, 40); u8g2.print("CO G: ");
    u8g2.print(span_gain_CO, 3);
    u8g2.setCursor(10, 55); u8g2.print("O2: ");
    u8g2.print(span_offset_O2, 3);
    u8g2.setCursor(10, 70); u8g2.print("H2S G:");
    u8g2.print(span_gain_H2S, 3);
} while (u8g2.nextPage());
delay(3000);

```

```
// Mostrar valores de prueba después de aplicar offsets SPAN (CH4
DESACTIVADO)
// float test_voltage_CH4 = voltage_CH4_avg - span_offset_CH4; //
CH4 no se calibra
float test_voltage_CO = voltage_CO_avg - span_offset_CO;
float test_voltage_O2 = voltage_O2_avg - span_offset_O2;

// H2S: Aplicar offset ZERO primero, luego factor de ganancia
float test_voltage_H2S_zero = voltage_H2S_avg - offset_H2S;
// voltage_expected_zero ya está declarado arriba (línea 757)
float test_voltage_H2S = voltage_expected_zero +
(test_voltage_H2S_zero - voltage_expected_zero) * span_gain_H2S;

// Fórmula para CH4 %LEL: 0.4V = 0% LEL, 1.204V = 50% LEL (CH4
DESACTIVADO)
// float test_CH4 = (test_voltage_CH4 - 0.4) / (1.204 - 0.4) *
50.0; // CH4 no se calibra
int test_CO = round((test_voltage_CO - 0.690) / 0.0024);
// O2: Fórmula según hoja de datos - 0% O2 = 1.5V, 25% O2 = 0V
float test_O2 = 16.667 * (1.5 - test_voltage_O2); // CORREGIDO:
O2% = 16.667 × (1.5 - V)
int test_H2S = round((test_voltage_H2S - 0.645) * 41.6667);

u8g2.firstPage();
do {
    u8g2.setFont(u8g2_font_ncenB08_tr);
    u8g2.setCursor(10, 20); u8g2.print("Valores SPAN:");
    // u8g2.setCursor(10, 40); u8g2.print("CH4: ");
    u8g2.print(test_CH4, 2); u8g2.print("%LEL"); // CH4 no se calibra
    u8g2.setCursor(10, 40); u8g2.print("CO: ");
    u8g2.print(test_CO); u8g2.print(" ppm");
    u8g2.setCursor(10, 55); u8g2.print("O2: "); u8g2.print(test_O2,
2); u8g2.print("%");
    u8g2.setCursor(10, 70); u8g2.print("H2S: ");
    u8g2.print(test_H2S); u8g2.print(" ppm");
} while (u8g2.nextPage());
delay(3000);

// NUEVA FUNCIÓN: Señal de finalización exitosa
signalCalibrationComplete();

Serial.println("Calibracion SPAN completa.");
// Serial.print("CH4 - Min: "); Serial.print(ch4_min);
Serial.print(", Max: "); Serial.println(ch4_max); // CH4 no se
calibra
Serial.print("CO - Min: "); Serial.print(co_min); Serial.print(",
Max: "); Serial.println(co_max);
Serial.print("O2 - Min: "); Serial.print(o2_min); Serial.print(",
Max: "); Serial.println(o2_max);
Serial.print("H2S - Min: "); Serial.print(h2s_min);
Serial.print(", Max: "); Serial.println(h2s_max);
// Serial.print("Offsets SPAN - CH4: ");
Serial.print(span_offset_CH4, 3); Serial.print(", "); // CH4 no se
calibra
Serial.print("Offsets SPAN - CO: "); Serial.print(span_offset_CO,
3);
```

```

Serial.print(", O2: "); Serial.print(span_offset_O2, 3);
Serial.print(", H2S Gain: "); Serial.println(span_gain_H2S, 3);
// Serial.print("Valores SPAN - CH4: "); Serial.print(test_CH4,
2); Serial.print("%LEL, "); // CH4 no se calibra
Serial.print("Valores SPAN - CO: "); Serial.print(test_CO);
Serial.print(" ppm, O2: "); Serial.print(test_O2, 2);
Serial.print("%, H2S: "); Serial.println(test_H2S);

// Guardar tiempo de calibración SPAN en EEPROM
calibrationTime = millis();
writeLongToEEPROM(EEPROM_CAL_TIME_ADDR, calibrationTime);
showCalOk = true;
Serial.print("Calibracion SPAN guardada. Tiempo: ");
Serial.println(calibrationTime);

calibratingSpan = false;
}

// ----- STEL (15 min, muestreo cada 5 s) -----
void actualizarSTEL(int co_ppm, int h2s_ppm) {
    if (co_ppm < 0) co_ppm = 0;
    if (h2s_ppm < 0) h2s_ppm = 0;

    if (stelCount == STEL_WINDOW_SAMPLES) {
        stelSumCO -= stelBufferCO[stelIndex];
        stelSumH2S -= stelBufferH2S[stelIndex];
    } else {
        stelCount++;
    }

    stelBufferCO[stelIndex] = (int16_t)co_ppm;
    stelBufferH2S[stelIndex] = (int16_t)h2s_ppm;
    stelSumCO += co_ppm;
    stelSumH2S += h2s_ppm;

    stelIndex++;
    if (stelIndex >= STEL_WINDOW_SAMPLES) stelIndex = 0;

    float avgCO = (stelCount > 0) ? (float)stelSumCO / stelCount :
0.0;
    float avgH2S = (stelCount > 0) ? (float)stelSumH2S / stelCount :
0.0;

    alarmaSTELActiva = (avgCO > STEL_CO_LIMIT) || (avgH2S >
STEL_H2S_LIMIT);
}

// ----- TWA (8 h, promedio por minuto, ventana deslizante de 480
min) -----
void actualizarTWA_minuto(int minuteAvgCO, int minuteAvgH2S) {
    // Limitar a 0..255 para el buffer compacto
    if (minuteAvgCO < 0) minuteAvgCO = 0;
    if (minuteAvgCO > 255) minuteAvgCO = 255;
    if (minuteAvgH2S < 0) minuteAvgH2S = 0;
    if (minuteAvgH2S > 255) minuteAvgH2S = 255;

    if (twaCount == TWA_WINDOW_MIN) {

```



```
// sacar el más antiguo
twaSumCO  -= twaBufferCO[twaIndex];
twaSumH2S -= twaBufferH2S[twaIndex];
} else {
    twaCount++;
}

twaBufferCO[twaIndex] = (uint8_t)minuteAvgCO;
twaBufferH2S[twaIndex] = (uint8_t)minuteAvgH2S;
twaSumCO  += (uint8_t)minuteAvgCO;
twaSumH2S += (uint8_t)minuteAvgH2S;

twaIndex++;
if (twaIndex >= TWA_WINDOW_MIN) twaIndex = 0;

float avgCO = (twaCount > 0) ? (float)twaSumCO / twaCount : 0.0;
float avgH2S = (twaCount > 0) ? (float)twaSumH2S / twaCount : 0.0;

alarmaTWAActiva = (avgCO > TWA_CO_LIMIT) || (avgH2S >
TWA_H2S_LIMIT);
}

void manejarAlarmas() {
    // Si el equipo está apagado, no manejar alarmas
    if (!isPoweredOn) {
        desactivarSalidasApagado();
        return;
    }

    // Si está calibrando, no activar alarmas
    if (calibrating || calibratingSpan) {
        digitalWrite(ALARM_PIN1, LOW); // D0 - Buzzer
        digitalWrite(ALARM_PIN2, LOW); // D2 - Vibrador
        digitalWrite(ALARM_PIN3, LOW); // D9
        return;
    }

    unsigned long ahora = millis();

    // Prioridad: HIGH / STEL / TWA (5 Hz) sobre LOW (3 Hz)
    if (alarma2Activa || alarmaSTELActiva || alarmaTWAActiva) { // 5
    Hz → periodo 200 ms, medio ciclo = 100 ms
        if (ahora - prevAlarmMillis >= 100) {
            prevAlarmMillis = ahora;
            alarmState = !alarmState;
            digitalWrite(ALARM_PIN1, alarmState);
            digitalWrite(ALARM_PIN2, alarmState); // Vibrador reactivado
            digitalWrite(ALARM_PIN3, alarmState);
        }
    } else if (alarma1Activa) { // LOW → 3 Hz (333 ms
    periodo, 166 ms medio ciclo)
        if (ahora - prevAlarmMillis >= 166) {
            prevAlarmMillis = ahora;
            alarmState = !alarmState;
            digitalWrite(ALARM_PIN1, alarmState);
            digitalWrite(ALARM_PIN2, alarmState); // Vibrador reactivado
            digitalWrite(ALARM_PIN3, alarmState);
        }
    }
}
```

```

    }
} else {
    digitalWrite(ALARM_PIN1, LOW);
    digitalWrite(ALARM_PIN2, LOW);
    digitalWrite(ALARM_PIN3, LOW);
}
}

// ----- Pantallas de rangos -----
void showLowAlarms() {
    u8g2.firstPage();
    do {
        u8g2.setFont(u8g2_font_7x14_tr);
        u8g2.setCursor(20, 20); u8g2.print("LOW ALARMS");
        u8g2.setCursor(0, 45); u8g2.print("CH4: 10 - 20 %LEL");
        u8g2.setCursor(0, 60); u8g2.print("CO : 25 - 100 ppm");
        u8g2.setCursor(0, 75); u8g2.print("O2 : <= 19.5 %");
        u8g2.setCursor(0, 90); u8g2.print("H2S: 10 - 15 ppm");
    } while (u8g2.nextPage());
}

void showHighAlarms() {
    u8g2.firstPage();
    do {
        u8g2.setFont(u8g2_font_7x14_tr);
        u8g2.setCursor(20, 20); u8g2.print("HIGH ALARMS");
        u8g2.setCursor(0, 45); u8g2.print("CH4: > 20 %LEL");
        u8g2.setCursor(0, 60); u8g2.print("CO : > 100 ppm");
        u8g2.setCursor(0, 75); u8g2.print("O2 : >= 23 %");
        u8g2.setCursor(0, 90); u8g2.print("H2S: > 15 ppm");
    } while (u8g2.nextPage());
}

void showSTELAlarms() {
    u8g2.firstPage();
    do {
        u8g2.setFont(u8g2_font_7x14_tr);
        u8g2.setCursor(30, 20); u8g2.print("STEL(15min)");
        u8g2.setCursor(0, 50); u8g2.print("CO : > ");
        u8g2.print(STEL_CO_LIMIT); u8g2.print(" ppm");
        u8g2.setCursor(0, 70); u8g2.print("H2S: > ");
        u8g2.print(STEL_H2S_LIMIT); u8g2.print(" ppm");
    } while (u8g2.nextPage());
}

void showTWAAlarms() {
    u8g2.firstPage();
    do {
        u8g2.setFont(u8g2_font_7x14_tr);
        u8g2.setCursor(38, 20); u8g2.print("TWA(8h)");
        u8g2.setCursor(0, 50); u8g2.print("CO : > ");
        u8g2.print(TWA_CO_LIMIT); u8g2.print(" ppm");
        u8g2.setCursor(0, 70); u8g2.print("H2S: > ");
        u8g2.print(TWA_H2S_LIMIT); u8g2.print(" ppm");
    } while (u8g2.nextPage());
}

```

```
void showAlarmRanges() {
    // LOW
    showLowAlarms();
    digitalWrite(ALARM_PIN1, HIGH);
    delay(500);
    digitalWrite(ALARM_PIN1, LOW);
    delay(1000);

    // HIGH
    showHighAlarms();
    digitalWrite(ALARM_PIN1, HIGH);
    delay(500);
    digitalWrite(ALARM_PIN1, LOW);
    delay(1000);

    // STEL
    showSTELAlarms();
    digitalWrite(ALARM_PIN1, HIGH);
    delay(500);
    digitalWrite(ALARM_PIN1, LOW);
    delay(1000);

    // TWA
    showTWAAlarms();
    digitalWrite(ALARM_PIN1, HIGH);
    delay(500);
    digitalWrite(ALARM_PIN1, LOW);
    delay(1000);
}

// ----- Botones -----
void handleButtons() {
    static bool lastMenuState = HIGH;
    static bool lastYesState = HIGH;
    static bool lastNoState = HIGH;
    bool currentMenuState = digitalRead(BTN_MENU);
    bool currentYesState = digitalRead(BTN_YES);
    bool currentNoState = digitalRead(BTN_NO);

    if (lastMenuState == HIGH && currentMenuState == LOW) {
        if (isPoweredOn) {
            showShutdownMenu = true;
        } else {
            isPoweredOn = true;
            showShutdownMenu = false;
            if (!screenIsOn) {
                u8g2.setPowerSave(0);
                screenIsOn = true;
            }
            showAlarmRanges();
        }
    }

    if (showShutdownMenu) {
        if (lastYesState == HIGH && currentYesState == LOW) {
            u8g2.setPowerSave(0);
            u8g2.firstPage();
        }
    }
}
```



```

do {
    u8g2.setFont(u8g2_font_ncenB08_tr);
    u8g2.setCursor(30, 70); u8g2.print("Equipo Apagado");
} while (u8g2.nextPage());
delay(2000);
isPoweredOn = false;
showShutdownMenu = false;
u8g2.clearDisplay();
u8g2.setPowerSave(1);
screenIsOn = false;

// Desactivar todas las salidas cuando se apaga
desactivarSalidasApagado();

// Resetear variables de alarmas
alarma1Activa = false;
alarma2Activa = false;
alarmaSTELActiva = false;
alarmaTWAActiva = false;

} else if (lastNoState == HIGH && currentNoState == LOW) {
    showShutdownMenu = false;
}
} else {
    if (lastNoState == HIGH && currentNoState == LOW && isPoweredOn)
    {
        calibrating = true; // Calibración ZERO
    }
    if (lastYesState == HIGH && currentYesState == LOW &&
isPoweredOn && !showShutdownMenu) {
        calibratingSpan = true; // Calibración SPAN
    }
}

lastMenuState = currentMenuState;
lastYesState = currentYesState;
lastNoState = currentNoState;
}

// ----- SETUP -----
void setup() {
    Serial.begin(115200);
    ReyaxLoRa.begin(9600);
    Serial_GPS.begin(9600);

    pinMode(BTN_MENU, INPUT_PULLUP);
    pinMode(BTN_YES, INPUT_PULLUP);
    pinMode(BTN_NO, INPUT_PULLUP);

    pinMode(ALARM_PIN1, OUTPUT); // D0 - Buzzer
    pinMode(ALARM_PIN2, OUTPUT); // D2 - Vibrador
    pinMode(ALARM_PIN3, OUTPUT); // D9
    pinMode(SAFETY_LED_PIN, OUTPUT); // D3 - LED de Seguridad (VERDE)

    // Configurar pin RF
    pinMode(transmitPin, OUTPUT);
    digitalWrite(transmitPin, LOW);

```

```
digitalWrite(ALARM_PIN1, LOW); // Buzzer OFF
digitalWrite(ALARM_PIN2, LOW); // Vibrador OFF
digitalWrite(ALARM_PIN3, LOW); // Pin 9 OFF
digitalWrite(SAFETY_LED_PIN, LOW); // LED verde OFF

u8g2.begin();
u8g2.clearDisplay();
u8g2.setPowerSave(0);
delay(50);

showAlarmRanges(); // ← ahora incluye STEL y TWA también

// Leer tiempo de calibración SPAN de EEPROM
unsigned long savedCalTime =
readLongFromEEPROM(EEPROM_CAL_TIME_ADDR);
if (savedCalTime > 0 && savedCalTime < ULONG_MAX) {
    // Verificar si el tiempo guardado es válido
    // Si millis() es menor que el tiempo guardado, significa que
    hubo un reset
    // En ese caso, reiniciamos el contador desde ahora para que
    dure 48 horas más
    if (millis() >= savedCalTime) {
        // No hubo reset, usar el tiempo guardado
        calibrationTime = savedCalTime;
        Serial.print("Tiempo de calibracion leido de EEPROM: ");
        Serial.println(calibrationTime);
    } else {
        // Hubo un reset, reiniciar el contador desde ahora
        // Esto permite que la calibración dure 48 horas desde el
        encendido actual
        calibrationTime = millis();
        writeLongToEEPROM(EEPROM_CAL_TIME_ADDR, calibrationTime);
        Serial.println("Reset detectado, reiniciando contador de
        calibracion");
    }
    checkCalibrationStatus();
} else {
    calibrationTime = 0;
    showCalOk = false;
}

ReyaxLoRa.print("AT\r");
}

// ----- LOOP -----
void loop() {
    handleButtons();
    manejarAlarmas();

    // Verificar estado de calibración SPAN (cada iteración del loop)
    checkCalibrationStatus();

    // Si el equipo está apagado, solo manejar botones y alarmas, no
    hacer nada más
    if (!isPoweredOn) {
        // Desactivar todas las salidas
```

```

    desactivarSalidasApagado();
    return; // Salir del loop principal
}

// Verificar si la alarma 1 está activa para enviar señal RF
if (alarma1Activa || alarma2Activa) {
    sendPacket();
    delay(packetDelay);
}

if (calibrating) { calibrateZero(); return; }
if (calibratingSpan) { calibrateSpan(); return; } // Nueva línea
para calibración SPAN
if (showShutdownMenu) { drawShutdownMenu(); return; }

// ----- STEL: muestreo cada 5 s con la última lectura
disponible -----
if (millis() - lastStelSampleMs >= STEL_SAMPLE_MS) {
    lastStelSampleMs = millis();
    actualizarSTEL(lastCOppm, lastH2Sppm);
}

// ----- TWA: acumular lecturas de 3 s para promediar por
minuto -----
// (los acumuladores se actualizan dentro del bloque de lectura
cada 3 s)
if (millis() - lastTwaSampleMs >= TWA_SAMPLE_MS) {
    lastTwaSampleMs = millis();
    int minuteAvgCO = (twaMinuteSamples > 0) ?
(int) (twaMinuteAccumCO / twaMinuteSamples) : lastCOppm;
    int minuteAvgH2S = (twaMinuteSamples > 0) ?
(int) (twaMinuteAccumH2S / twaMinuteSamples) : lastH2Sppm;

    actualizarTWA_minuto(minuteAvgCO, minuteAvgH2S);

    // reset acumuladores del minuto
    twaMinuteAccumCO = 0;
    twaMinuteAccumH2S = 0;
    twaMinuteSamples = 0;
}

// ----- Lectura/Envío principal cada 3 s -----
unsigned long currentMillis = millis();
if (currentMillis - previousMillis >= interval) {
    previousMillis = currentMillis;

    ch4Value = analogRead(CH4_PIN);
    coValue = analogRead(CO_PIN);
    o2Value = analogRead(O2_PIN);
    h2sValue = analogRead(H2S_PIN);
    batteryValue = analogRead(BATTERY_PIN); // Nueva lectura de
batería

    // ---- Conversión a unidades de proceso CORREGIDA con offsets
ZERO y SPAN -----

```



```
// CH4: Aplicar offset ZERO y convertir a %LEL - CORREGIDO PARA
SENSOR %LEL
// Rango: 0-50% LEL, Voltaje: 0.4V (0% LEL) a 1.204V (50% LEL)
float voltage_CH4 = ch4Value * (5.0 / 1023.0) - offset_CH4;
float CH4_PERCENTVOL = (voltage_CH4 - 0.4) / (1.204 - 0.4) *
50.0; // CORREGIDO: 0-50% LEL

// Si hay calibración SPAN, aplicar corrección SPAN
if (span_offset_CH4 != 0.0) {
    // Aplicar offset SPAN y recalcular
    float voltage_CH4_span = ch4Value * (5.0 / 1023.0) -
span_offset_CH4;
    CH4_PERCENTVOL = (voltage_CH4_span - 0.4) / (1.204 - 0.4) *
50.0; // CORREGIDO: 0-50% LEL
}

if (CH4_PERCENTVOL < 0) CH4_PERCENTVOL = 0;
if (CH4_PERCENTVOL > 50) CH4_PERCENTVOL = 50; // CORREGIDO:
máximo 50% LEL (display range)

// CH4 DESACTIVADO - Forzar siempre a 0% LEL
CH4_PERCENTVOL = 0.00;

// CO: Aplicar offset ZERO y convertir a ppm
float voltage_CO = coValue * (5.0 / 1023.0) - offset_CO;
float co_ppm_raw = (voltage_CO - 0.690) / 0.0024;

// Si hay calibración SPAN, aplicar factor de ganancia
if (span_gain_CO != 1.0f) {
    co_ppm_raw *= span_gain_CO;
}

int CO_PPM = round(co_ppm_raw);

// Pequeña zona muerta alrededor de 0 para evitar falsos 1-2 ppm
if (CO_PPM < 5 && CO_PPM > -5) CO_PPM = 0;

// O2: Aplicar offset ZERO y convertir a porcentaje - CORREGIDO
según hoja de datos
// Fórmula según hoja de datos: 0% O2 = 1.5V, 25% O2 = 0V
// O2% = 16.667 * (1.5 - voltage_corregido)
float voltage_O2 = o2Value * (5.0 / 1023.0) - offset_O2;
float O2_PERCENTVOL = 16.667 * (1.5 - voltage_O2);

// Si hay calibración SPAN, aplicar corrección SPAN
if (span_offset_O2 != 0.0) {
    // Aplicar offset SPAN y recalcular
    float voltage_O2_span = o2Value * (5.0 / 1023.0) -
span_offset_O2;
    O2_PERCENTVOL = 16.667 * (1.5 - voltage_O2_span);
}

O2_PERCENTVOL = round(O2_PERCENTVOL * 10.0) / 10.0;

// H2S: Aplicar offset ZERO y convertir a ppm
float voltage_H2S = h2sValue * (5.0 / 1023.0) - offset_H2S;
```

```
// Si hay calibración SPAN, aplicar factor de ganancia para
corrección de sensibilidad
if (span_gain_H2S != 1.0) {
    // Aplicar factor de ganancia: corregir desde el punto de cero
    (0.645V)
    float voltage_expected_zero = 0.645; // Voltaje esperado para
0 ppm
    float voltage_H2S_corrected = voltage_expected_zero +
(voltage_H2S - voltage_expected_zero) * span_gain_H2S;
    voltage_H2S = voltage_H2S_corrected;
}

// Convertir voltaje corregido a ppm
int H2S_PPM = round((voltage_H2S - 0.645) * 41.6667);

if (H2S_PPM < 3) H2S_PPM = 0;

// ---- Calcular nivel de batería ----
int batteryLevel = getBatteryLevel(batteryValue);

// Guardar últimas lecturas para STEL y acumular para TWA
lastCOppm = CO_PPM;
lastH2Sppm = H2S_PPM;

twoMinuteAccumCO += (unsigned long)CO_PPM;
twoMinuteAccumH2S += (unsigned long)H2S_PPM;
twoMinuteSamples++;

// ---- Alarmas instantáneas ----
// CH4 DESACTIVADO - No se considera en las alarmas
alarma1Activa = (// (CH4_PERCENTVOL >= 10 && CH4_PERCENTVOL <=
20) || // CH4 desactivado
                (CO_PPM >= 25 && CO_PPM <= 100) ||
                (O2_PERCENTVOL <= 19.5) ||
                (H2S_PPM >= 10 && H2S_PPM <= 15));

alarma2Activa = (// (CH4_PERCENTVOL > 20) || // CH4 desactivado
                (CO_PPM > 100) ||
                (O2_PERCENTVOL >= 23) ||
                (H2S_PPM > 15));

// ---- GPS ----
GPS.f_get_position(&latitude, &longitude);
GPS.stats(&chars, &sentences, &failed_checksum);

// ---- Payload LoRa (ahora incluye nivel de batería) ----
String payload = String(CH4_PERCENTVOL, 2) + "|" +
String(CO_PPM) + "|" + String(O2_PERCENTVOL, 2) + "|" +
                String(H2S_PPM) + "|" + String(latitude, 6) +
"|" + String(longitude, 6) + "|" + String(batteryLevel);
ReyaxLoRa_Send(slave_Address, payload);

// ---- OLED (ahora incluye nivel de batería y valores RAW) ----
showDisplay(CH4_PERCENTVOL, CO_PPM, O2_PERCENTVOL, H2S_PPM,
batteryLevel, ch4Value, coValue, o2Value, h2sValue);

// ---- Manejar LED de Seguridad ----
```

```

    manejarLedSeguridad(CH4_PERCENTVOL, CO_PPM, O2_PERCENTVOL,
H2S_PPM, batteryLevel);
}

// ---- Lectura continua GPS ----
while (Serial_GPS.available()) {
    int c = Serial_GPS.read();
    if (GPS.encode(c)) {
        GPS.f_get_position(&latitude, &longitude);
        delay(1000);
        GPS.stats(&chars, &sentences, &failed_checksum);
    }
}

ReyaxLoRa_Receive();
}

```

También el equipo Receptor y activación de sirena con circulina:

```

const int receivePin = 11;    // Pin DATA del módulo RX
const int outputPin = 7;      // Pin de salida
const int cancelPin = 5;      // NUEVO: pin para cancelar (D5)

const int minHeaderPulses = 3; // Mínimo pulsos de cabecera para
validar
const int minDataPulses = 7;   // Mínimo pulsos de datos
const unsigned long timeout = 200; // Timeout en ms

enum State { IDLE, RECEIVING_HEADER, RECEIVING_DATA };
State currentState = IDLE;

unsigned long lastPulseTime = 0;
int headerCount = 0;
int dataCount = 0;

// Control de activación de salida
unsigned long outputStartTime = 0;
bool outputActive = false;

void setup() {
    pinMode(receivePin, INPUT);
    pinMode(outputPin, OUTPUT);
    pinMode(cancelPin, INPUT); // NUEVO: configurar D5 como entrada
    digitalWrite(outputPin, LOW); // Asegura salida desactivada
}

void loop() {
    unsigned long currentTime = millis();

    // Revisa si D5 está activado para cancelar salida
    if (digitalRead(cancelPin) == HIGH && outputActive) {
        digitalWrite(outputPin, LOW); // Apaga salida
        outputActive = false;         // Cancela temporizador
    }
}

```



```

    }

    // Timeout para reiniciar recepción si no hay pulsos
    if (currentTime - lastPulseTime > timeout && !outputActive) {
        currentState = IDLE;
        headerCount = 0;
        dataCount = 0;
    }

    // Lectura de pulso si cancelPin no está activado
    if (digitalRead(cancelPin) == LOW) {
        unsigned long pulseDuration = pulseIn(receivePin, HIGH, timeout
* 1000);
        if (pulseDuration > 0) {
            lastPulseTime = millis();

            switch (currentState) {
                case IDLE:
                    if (pulseDuration > 1000) {
                        currentState = RECEIVING_HEADER;
                        headerCount = 1;
                    }
                    break;

                case RECEIVING_HEADER:
                    if (pulseDuration > 1000) {
                        headerCount++;
                    } else if (pulseDuration > 300 && headerCount >=
minHeaderPulses) {
                        currentState = RECEIVING_DATA;
                        dataCount = 1;
                    } else {
                        currentState = IDLE;
                    }
                    break;

                case RECEIVING_DATA:
                    if (pulseDuration > 300 && pulseDuration < 800) {
                        dataCount++;
                        if (dataCount >= minDataPulses) {
                            digitalWrite(outputPin, HIGH);           // Activa

                                outputStartTime = millis();           // Marca inicio
                                outputActive = true;
                                currentState = IDLE;
                            }
                        } else {
                            currentState = IDLE;
                        }
                        break;
                    }
                }
            }
        }

        // Apagar salida automáticamente después de 15 segundos
        if (outputActive && (millis() - outputStartTime >= 15000)) {
            digitalWrite(outputPin, LOW);
        }
    }
}

```

```

    outputActive = false;
}
}

```

El código anterior implementa el funcionamiento del módulo receptor encargado de activar la sirena con circulina cuando se reciben tramas válidas desde el transmisor. Mediante una máquina de estados valida los pulsos de cabecera y datos, y al confirmarse la señal activa la salida por 15 segundos. Además, incluye un botón de cancelación para desactivar manualmente la alarma y un sistema de reinicio automático en caso de ausencia de pulsos, asegurando un control de alerta de emergencia.

A continuación, se presenta el código encargado de recibir los datos mediante LoRa y establecer la comunicación a través de GSM.

```

//----- Librerías
#include <SoftwareSerial.h>
#include "thingProperties.h"

//----- Configuración LoRa
#define master_Address 1
SoftwareSerial ReyaxLoRa(14, 12); // RX, TX LoRa

//----- Configuración SIM800L
SoftwareSerial SIM800L(5, 4); // SIM800L Tx & Rx
#define buzzer 16

//----- Variables de alarma
bool alarmaLowEnviada = false;
bool alarmaHighEnviada = false;

//----- Variables para almacenar
datos recibidos
float last_CH4 = 0.0;
int last_CO = 0;
float last_O2 = 0.0;
int last_H2S = 0;
float last_latitude = 0.0;
float last_longitude = 0.0;
int last_batteryLevel = 0;

//----- Envío LoRa
void ReyaxLoRa_Send(int addr, String data_send) {
    String str_Send;
    str_Send = "AT+SEND=" + String(addr) + "," +
String(data_send.length()) + "," + data_send + "\r";
    ReyaxLoRa.print(str_Send);

    Serial.println();
}

```

```

Serial.print("Send to Master : ");
Serial.println(str_Send);
Serial.flush();
}

//----- Recepción LoRa
void ReyaxLoRa_Receive() {
    if (ReyaxLoRa.available() > 0) {
        ArduinoCloud.update();

        String rcv_Data_String = ReyaxLoRa.readString();
        Serial.println();
        Serial.print("LoRa Reyax RYLR993_Lite Result code : ");
        Serial.println(rcv_Data_String);

        if (rcv_Data_String.indexOf("RCV") > 0) {
            String _message = getValue(rcv_Data_String, '|', 2);

            float CH4_PERCENTVOL = getValue(_message, '|', 0).toFloat();
            int CO_PPM = getValue(_message, '|', 1).toInt();
            float O2_PERCENTVOL = getValue(_message, '|', 2).toFloat();
            int H2S_PPM = getValue(_message, '|', 3).toInt();
            float latitude = getValue(_message, '|', 4).toFloat();
            float longitude = getValue(_message, '|', 5).toFloat();
            int batteryLevel = getValue(_message, '|', 6).toInt();

            //----- Guardar datos recibidos
            last_CH4 = CH4_PERCENTVOL;
            last_CO = CO_PPM;
            last_O2 = O2_PERCENTVOL;
            last_H2S = H2S_PPM;
            last_latitude = latitude;
            last_longitude = longitude;
            last_batteryLevel = batteryLevel;

            //----- Mostrar datos
            Serial.println();
            Serial.print(" | CH4 : "); Serial.print(CH4_PERCENTVOL);
            Serial.println(" %");
            Serial.print(" | CO : "); Serial.print(CO_PPM);
            Serial.println(" ppm");
            Serial.print(" | O2 : "); Serial.print(O2_PERCENTVOL);
            Serial.println(" %");
            Serial.print(" | H2S : "); Serial.print(H2S_PPM);
            Serial.println(" ppm");
            Serial.print(" | Lat : "); Serial.println(latitude, 6);
            Serial.print(" | Lon : "); Serial.println(longitude, 6);
            Serial.print(" | Bat : ");
            Serial.print(batteryLevel); Serial.println(" %");
            Serial.flush();

            //----- Actualizar en la nube
            ch4_percentvol = CH4_PERCENTVOL;
            co_ppm = CO_PPM;
            o2_percentvol = O2_PERCENTVOL;

```



```

    h2s_ppm = H2S_PPM;
    gps_location = {latitude, longitude};

    //----- Verificar
condiciones de alarmas
    // Verificar HIGH ALARMS primero (prioridad más alta)
    if (checkHighAlarmConditions(CH4_PERCENTVOL, CO_PPM,
O2_PERCENTVOL, H2S_PPM)) {
        if (!alarmaHighEnviada) {
            activarAlarmaHigh();
            alarmaHighEnviada = true;
        }
    } else if (checkLowAlarmConditions(CH4_PERCENTVOL, CO_PPM,
O2_PERCENTVOL, H2S_PPM)) {
        // Solo activar LOW ALARMS si no hay HIGH ALARMS
        if (!alarmaLowEnviada) {
            activarAlarmaLow();
            alarmaLowEnviada = true;
        }
    } else {
        // Resetear ambas alarmas si no hay ninguna activa
        alarmaLowEnviada = false;
        alarmaHighEnviada = false;
    }
}
}

//----- Función para verificar condiciones de
HIGH ALARMS
bool checkHighAlarmConditions(float ch4, int co, float o2, int h2s)
{
    // Condiciones de HIGH ALARMS basadas en el programa del
transmisor:
    // CH4: > 20 %
    // CO: > 100 ppm
    // O2: >= 23 %
    // H2S: > 15 ppm

    bool highAlarmCH4 = (ch4 > 20.0);
    bool highAlarmCO = (co > 100);
    bool highAlarmO2 = (o2 >= 23.0);
    bool highAlarmH2S = (h2s > 15);

    // Retorna true si hay al menos una HIGH ALARM activa
    return (highAlarmCH4 || highAlarmCO || highAlarmO2 ||
highAlarmH2S);
}

//----- Función para verificar condiciones de
LOW ALARMS
bool checkLowAlarmConditions(float ch4, int co, float o2, int h2s) {
    // Condiciones de LOW ALARMS basadas en el programa del
transmisor:
    // CH4: 10 - 20 %
    // CO: 25 - 100 ppm
    // O2: <= 19.5 %

```

```
// H2S: 10 - 15 ppm

bool lowAlarmCH4 = (ch4 >= 10.0 && ch4 <= 20.0);
bool lowAlarmCO = (co >= 25 && co <= 100);
bool lowAlarmO2 = (o2 <= 19.5);
bool lowAlarmH2S = (h2s >= 10 && h2s <= 15);

// Retorna true si hay al menos una LOW ALARM activa
return (lowAlarmCH4 || lowAlarmCO || lowAlarmO2 || lowAlarmH2S);
}

// _____ Funciones GSM
void llamar() {
    Serial.println("Realizando llamada...");
    SIM800L.println("ATD+ +51934472733;");
    updateSerialGSM();
    delay(10000); // Llamada de 10 segundos
    SIM800L.println("ATH");
    delay(1000);
    updateSerialGSM();
    Serial.println("Llamada finalizada");
}

void smsLowAlarm() {
    Serial.println("Enviando SMS LOW ALARM...");
    SIM800L.println("AT+CMGF=1"); // Modo texto
    updateSerialGSM();
    SIM800L.println("AT+CMGS=\"+51934472733\"");
    updateSerialGSM();

    // Mensaje para LOW ALARMS
    SIM800L.print("LOW ALARMS - EQUIPO PORTATIL DETECTOR DE GASES");

    updateSerialGSM();
    SIM800L.write(26);
    delay(2000); // Esperar envío del SMS
    Serial.println("SMS LOW ALARM enviado");
}

void smsHighAlarm() {
    Serial.println("Enviando SMS HIGH ALARM...");
    SIM800L.println("AT+CMGF=1"); // Modo texto
    updateSerialGSM();
    SIM800L.println("AT+CMGS=\"+51934472733\"");
    updateSerialGSM();

    // Mensaje para HIGH ALARMS
    SIM800L.print("HIGH ALARMS - EQUIPO PORTATIL DETECTOR DE GASES");

    updateSerialGSM();
    SIM800L.write(26);
    delay(2000); // Esperar envío del SMS
    Serial.println("SMS HIGH ALARM enviado");
}

void updateSerialGSM() {
    delay(500);
}
```

```

while (Serial.available()) {
    SIM800L.write(Serial.read());
}
while (SIM800L.available()) {
    Serial.write(SIM800L.read());
}
}

// _____ Activar Alarma HIGH
void activarAlarmaHigh() {
    Serial.println("ALARMA HIGH ACTIVADA - Niveles de gas CRITICOS");
    Serial.println("Iniciando secuencia de alarma HIGH...");

    // 1. PRIMERO: ACTIVAR BUZZER POR 2 SEGUNDOS
    Serial.println("PASO 1: Activando buzzer por 2 segundos...");
    digitalWrite(buzzer, HIGH);
    delay(2000); // Buzzer activo por exactamente 2 segundos
    digitalWrite(buzzer, LOW);
    Serial.println("Buzzer completado");

    // 2. DESPUES: 3 LLAMADAS CONSECUTIVAS
    Serial.println("    PASO 2: Realizando 3 llamadas
consecutivas...");

    // Primera llamada
    Serial.println("    Llamada 1/3");
    llamar();
    delay(2000); // Pausa entre llamadas

    // Segunda llamada
    Serial.println("    Llamada 2/3");
    llamar();
    delay(2000); // Pausa entre llamadas

    // Tercera llamada
    Serial.println("    Llamada 3/3");
    llamar();
    delay(2000); // Pausa entre llamadas y SMS

    // 3. FINALMENTE: 2 MENSAJES SMS
    Serial.println("    PASO 3: Enviando 2 mensajes SMS...");

    // Primer SMS
    Serial.println("    SMS 1/2");
    smsHighAlarm();
    delay(2000); // Pausa entre SMS

    // Segundo SMS
    Serial.println("    SMS 2/2");
    smsHighAlarm();

    Serial.println("Secuencia de alarma HIGH completada");
    Serial.println("    - Buzzer activado por 2 segundos");
    Serial.println("    - 3 llamadas realizadas");
    Serial.println("    - 2 SMS enviados");
}
    
```



```
// _____ Activar Alarma LOW
void activarAlarmaLow() {
    Serial.println("ALARMA LOW ACTIVADA - Niveles de gas en rango de
advertencia");
    Serial.println("Iniciando secuencia de alarma LOW...");

    // 1. PRIMERO: ACTIVAR BUZZER POR 2 SEGUNDOS
    Serial.println("PASO 1: Activando buzzer por 2 segundos...");
    digitalWrite(buzzer, HIGH);
    delay(2000); // Buzzer activo por exactamente 2 segundos
    digitalWrite(buzzer, LOW);
    Serial.println("Buzzer completado");

    // 2. DESPUES: 2 LLAMADAS CONSECUTIVAS
    Serial.println("    PASO 2: Realizando 2 llamadas
consecutivas...");

    // Primera llamada
    Serial.println("    Llamada 1/2");
    llamar();
    delay(2000); // Pausa entre llamadas

    // Segunda llamada
    Serial.println("    Llamada 2/2");
    llamar();
    delay(2000); // Pausa entre llamadas y SMS

    // 3. FINALMENTE: 2 MENSAJES SMS
    Serial.println("    PASO 3: Enviando 2 mensajes SMS...");

    // Primer SMS
    Serial.println("    SMS 1/2");
    smsLowAlarm();
    delay(2000); // Pausa entre SMS

    // Segundo SMS
    Serial.println("    SMS 2/2");
    smsLowAlarm();

    Serial.println("Secuencia de alarma LOW completada");
    Serial.println("    - Buzzer activado por 2 segundos");
    Serial.println("    - 2 llamadas realizadas");
    Serial.println("    - 2 SMS enviados");
}

// _____ Función para separar datos
String getValue(String data, char separator, int index) {
    int found = 0;
    int strIndex[] = {0, -1};
    int maxIndex = data.length() - 1;

    for (int i = 0; i <= maxIndex && found <= index; i++) {
        if (data.charAt(i) == separator || i == maxIndex) {
            found++;
            strIndex[0] = strIndex[1] + 1;
            strIndex[1] = (i == maxIndex) ? i + 1 : i;
        }
    }
}
```

```

    }
    return found > index ? data.substring(strIndex[0], strIndex[1]) :
    "";
}

//_____ Setup
void setup() {
    Serial.begin(9600);
    Serial.println();
    Serial.println("=== RECEPTOR LORA ESP8266 - MONITOR DE GASES
    ===");
    Serial.println("Configurado para:");
    Serial.println("  LOW ALARMS: Buzzer 2s + 2 llamadas + 2 SMS");
    Serial.println("  HIGH ALARMS: Buzzer 2s + 3 llamadas + 2 SMS");
    delay(1500);

    pinMode(buzzer, OUTPUT);
    digitalWrite(buzzer, LOW); // Asegurar que el buzzer esté apagado

    //----- Iniciar IoT Cloud
    initProperties();
    ArduinoCloud.begin(ArduinoIoTPreferredConnection);
    setDebugMessageLevel(2);
    ArduinoCloud.printDebugInfo();

    //----- Iniciar LoRa
    ReyaxLoRa.begin(9600);
    delay(1000);
    Serial.println("Inicializando módulo LoRa...");
    ReyaxLoRa.print("AT\r");

    //----- Iniciar SIM800L
    SIM800L.begin(9600);
    Serial.println("Inicializando SIM800L...");
    Serial.println("AT");
    updateSerialGSM();

    Serial.println("Sistema listo - Esperando datos LoRa...");
    Serial.println("Prioridad: HIGH ALARMS > LOW ALARMS");
}

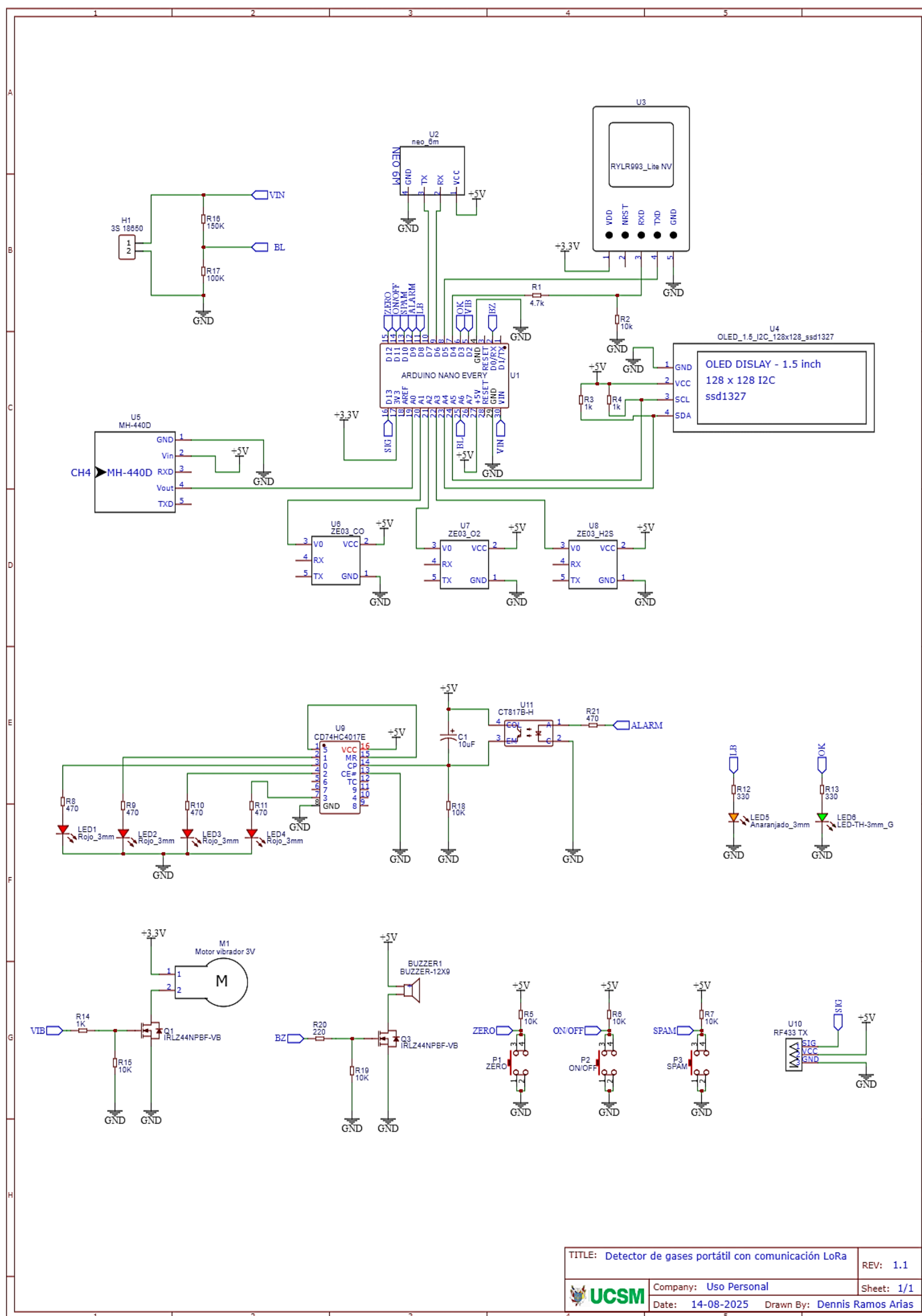
//_____ Loop
void loop() {
    ReyaxLoRa_Receive();

    // El sensor físico ya no se verifica - solo funciona con datos
    LoRa
    // Se eliminó la verificación del sensor físico
}

//===== Callbacks IoT =====
void onch4PercentvolChange() {}
void oncoPpmChange() {}
void ono2PercentvolChange() {}
void onh2sPpmChange() {}
void onGpsLocationChange() {}

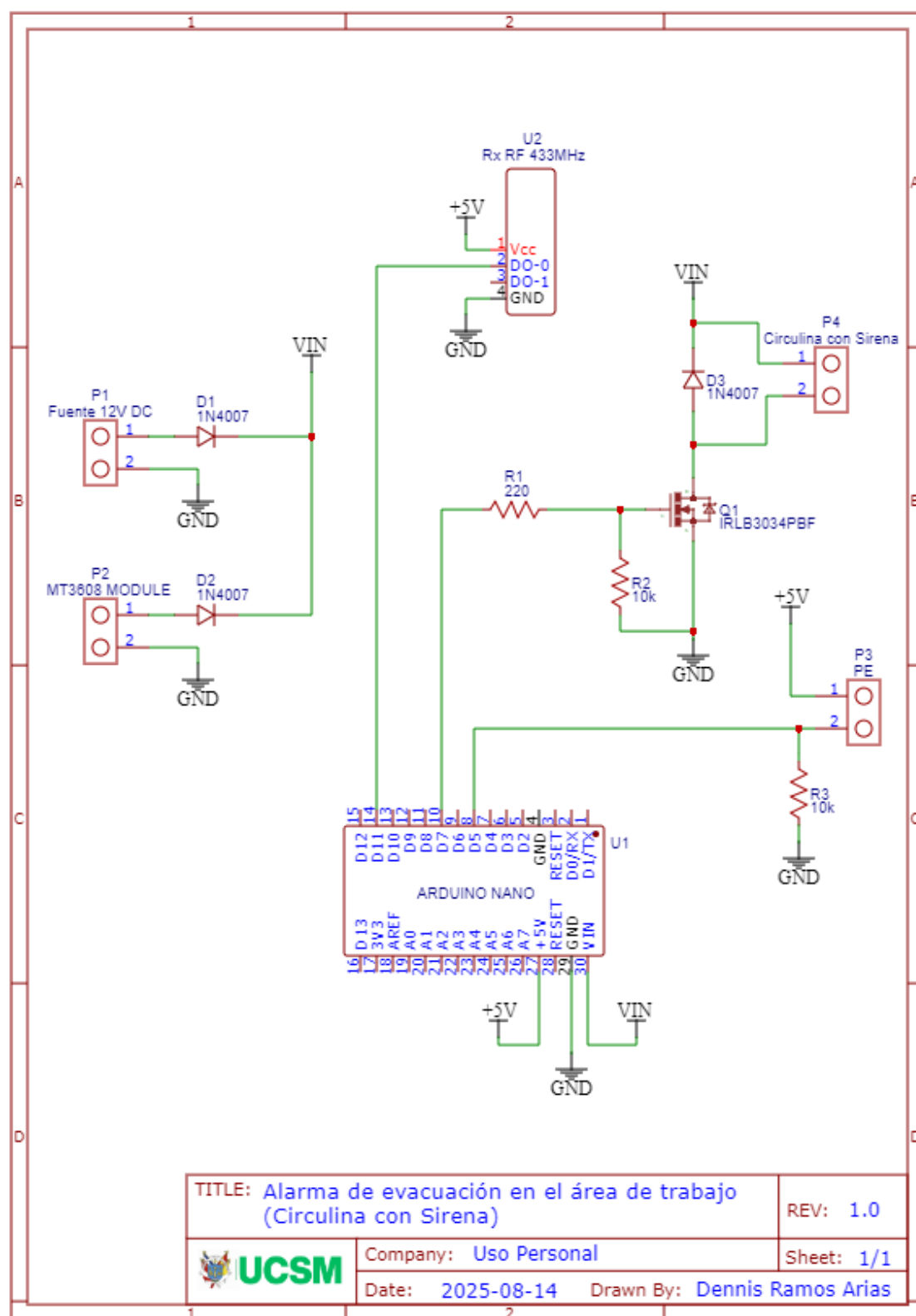
```

ANEXONº2: SISTEMA PORTÁTIL DE DETECCIÓN DE GASES CON COMUNICACIÓN LORA



TITLE: Detector de gases portátil con comunicación LoRa		REV: 1.1
	Company: Uso Personal	Sheet: 1/1
	Date: 14-08-2025	Drawn By: Dennis Ramos Arias

ANEXO N°3: ALARMA DE EVACUACIÓN EN EL ÁREA DE TRABAJO



U1
ESP8266 MODULE

U2
NodeMCU-ESP8266MOD

U3
LM2596 BUCK MODULE

U4
SIM800L Module

F1
12V PLUG

D1
D1N5400

R1
10K

R2
4.7K

R3
220

R4
100K

BUZZER1
BUZZER-12X9

Q1
IRLZ44NPF-VB

VIN

GND

3V3

1 **2** **3** **4** **5** **6** **7** **8** **9** **10** **11** **12** **13** **14** **15**

16 **17** **18** **19** **20** **21** **22** **23** **24** **25** **26** **27** **28** **29** **30**

VDD **NRST** **RXD** **TXD** **GND**

ANT **VCC** **RST** **RX** **TX** **GND**

RING **DTR** **MIC+** **MIC-** **SPK+** **SPK-**

IN+ **OUT+** **IN-** **OUT-**

DC/DC

BUZZER1

BUZZER-12X9

IRLZ44NPF-VB

1 **2** **3** **4**

A **B** **C** **D** **E**

TITLE: Estación receptora LoRa con transmisión GSM		REV: 1.1
	Company: Uso Personal	Sheet: 1/1
	Date: 14-08-2025	Drawn By: Dennis Ramos Arias

ANEXO N°5: FICHA TÉCNICA DEL MÓDULO DE DETECCIÓN DE GAS ELECTROQUÍMICO - ZE03

Winsen

Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co.,Ltd

www.winsen-sensor.com

Electrochemical Detection Module ZE03

ZE03 is a general-purpose and high-performance electrochemical module. It uses three electrodes, electrochemical gas sensor and high-performance micro-processor. By installing different gas sensor, the module could detect relevant gas. It is with built-in temperature sensor to make temperature compensation, which makes it could detect the gas concentration accurately. It has the digital output and analog voltage output at the same time which facilities the usage and calibration and shorten the development period. It is a combination of mature electrochemical detection principle and sophisticated circuit design, to meet customers' different detection needs.

Features

High sensitivity & resolution
Low power consumption
UART and analog voltage output
Good stability and excellent anti-interference ability



Main Application

Portable and fixed gas detector, various gas detection equipment and occasion.

Technical Parameters

Model No.	ZE03
Target Gas	CO, O ₂ , NH ₃ , H ₂ S, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ , CL ₂ , HF, H ₂ , PH ₃ , HCL etc
Measurement Range	Refer stable 2.(can be customized also)
Working Voltage	DC 5±0.1V
Working Current	< 5 mA
Output Data	UART Output (TTL electrical level, 3V)
	Analog Voltage (refer stable2. for sensor original amplifying signal)
Working Life	2 years
Operating Environment	Temp.: -20~50℃
	Humidity.: 15%-90% RH (no condensation)
Storage Environment	Temp.: -20~50℃
	Hum.: 15%RH-90% RH
Size	Ø23.5mm*24.5mm

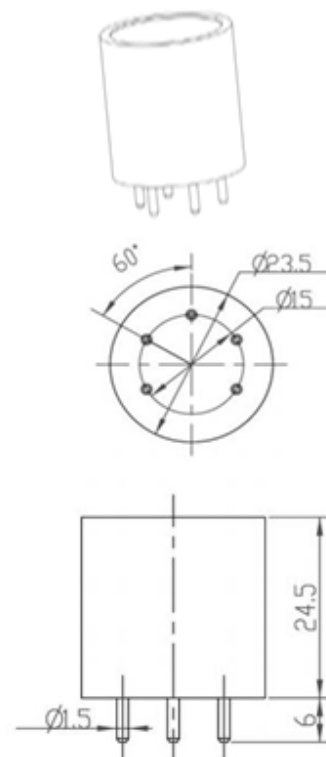


Fig1. Structure(tolerance ±0.25mm)



Detection gas	CO	O2	NH3	H2S	SO2	DG01	VOC
Detection range	(0-1000)ppm	(0-25) %VOL	(0-100)ppm	(0-100)ppm	(0-20) ppm	(0-50)ppm	(0-100)ppm
Resolution	1ppm	0.1 %VOL	1ppm	1ppm	0.1ppm	0.01ppm	0.1ppm
VO Voltage output Range	(0.6-3) V	(1.5-0) V	(0.6-3) V	(0.6-3) V	(0.6-3) V	(0.6-3)V	(0.6-3) V
Response Time(T90)	≤30S	≤15S	≤150S	≤30S	≤30S	≤120S	≤120S

Detection gas	H2	PH3	NO2	O3	CL2	HCL	HF
Detection range	{0-1000}ppm	{0-1000}ppm	{0-20} ppm	{0-10} ppm	{0-20} ppm	{0-10}ppm	{0-10}ppm
Resolution	1ppm	0.1ppm	0.1ppm	0.1ppm	0.1ppm	0.1ppm	0.1ppm
VO Voltage output Range	{0.6-3} V	{0.6-3} V	{ 2-0} V	{2-0} V	{2-0} V	{2-0} V	{2-0} V
Response Time(T90)	≤120S	≤30S	≤30S	≤120S	≤60S	≤60S	≤60S

Detection gas	C2H4	ETO	CH2O				
Detection range	(0-100)ppm	(0-100)ppm	(0-50)ppm				
Resolution	0.1ppm	0.1ppm	0.1ppm				
VO Voltage output Range	(0.6-3)V	(0.6-3)V	(0.6-3)V				
Response Time(T90)	≤30S	≤120S	≤30S				

Take ZE03-O2 (0-25%vol) as an example: 0%vol is corresponding to 1.5V, but the corresponding value of 25%vol should subject to inspection report, not 0V, other values like 0.1V or 0.2V are possible.

Pin definition stable3.

GND	Ground
VCC	Power supply
VO	Original Voltage output
RXD	Series port input
TXD	Series port output

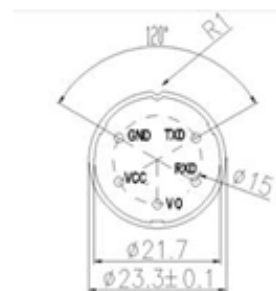


Fig3.Bottom view

The meaning of VO (Vout) : It means original voltage (linear) after amplifying circuit, rather than concentration value of current target gas in environment. If choose this pin test, users need to know when purchase, the zero voltage Vout0 and test voltage Vout1 can be shown in the inspection report delivered to customer with the modules together. Users can calculate gas concentration of current target gas in environment based on Vout0 and Vout1.

Take ZE03-CO for example: zero voltage Vout0 = 0.6 V; in 200ppm CO gas,Vout1=0.9V,

If the current voltage Voutx=1.2V, then the CO concentration:

$$N = \frac{200}{V_{out1} - V_{out0}} * (V_{outx} - V_{out0}) = 400\text{ppm}.$$

Name rules

Model name: ZE03-X-X-X

"Z" means module, "E" means electrochemical type sensor, "03" means version, the first X means detected gas, the second X means detection range, the third X means output way.

Eg. "ZE03-CO-(0-1000)ppm-UART/VDC", "ZE03-O2-(0-25)%VOL-UART/VDC".

"UART/VDC" means the output way is series port and analog voltage (non standard voltage, refer to stable2.)

Communication Protocol

1.General Settings

Baud Rate	9600
Data Bits	8
Stop Bits	1
Parity	None

2.Communication Specification

The default communication type is active upload and it sends gas concentration once every second (the concentration is 16 hexadecimal). If you want to switch to Q&A mode, please send 0x78 command, to change communication mode to 0x04(Q&A mode), then current concentration will be sent by module after it receiving 0x86 command (reading concentration), suggested communication cycle is 1s.

3.Communication Commands

The default mode is active upload mode, the sensor will send gas concentration actively as follow without sending any command by users.

Receive	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Start byte	Command	Gas concentration		Gas No	number of decimal	reserved	reserved	Checksum
	0xFF	0x86	High byte	Low byte	0x2B	0x01	0	0	4E
EXP.	FF 86 00 00 2B 01 00 00 4E (Take SO2 for example, the concentration is 0)								

gas concentration=(High byte*256+Low byte)*resolution.

Please note in the calculation formula, the High byte and Low byte means the decimalism value changed from hexadecimal.

Number of decimal is 0, resolution is 1ppm, number of decimal is 1, resolution is 0.1ppm, number of decimal is 2, resolution is 0.01ppm.

0X78—To modify the communication mode (0x03 is active upload mode, 0x04 is Q&A mode)

1	0x78	To change communication mode							
Send	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Start Byte	Address	Command	Communication Type	--	--	--	--	Checksum
	0xFF	0x01	0x78	0x04	0	0	0	0	0x83
EXP.	FF 01 78 04 00 00 00 00 83 (to switch to Q&A mode)								
Receive	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Start Byte	Command	Return	--	--	--	--	--	Checksum
	0xFF	0x78	Success: 1 Failure: 0	0	0	0	0	0	0x87 0x88
EXP.	FF 78 01 00 00 00 00 00 87								

If users want to switch to active upload mode, send FF 01 78 03 00 00 00 00 84(hexadecimal).

0x86 — To read the concentration value (This command is needed just under Q&A mode.)

1	0x86	To read concentration							
Send	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Start Byte	Address	Command	--	--	--	--	--	Checksum
	0xFF	0x01	0x86	0	0	0	0	0	0x79
EXP.	FF 01 86 00 00 00 00 00 79								
Receive	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Start Byte	Command	Gas Concentration		Gas No.	number of decimal	reserved	reserved	Checksum
	0xFF	0x86	High byte	Low byte	0x2B	0x01	0	0	4E
EXP.	FF 86 00 00 2B 01 00 00 4E (Take SO2 for example, the concentration is 0)								

gas concentration=(High byte*256+Low byte)*resolution

Please note that in the calculation formula, the High byte and Low byte means the decimalism value changed from hexadecimal.

ANEXO N°6: FICHA TÉCNICA DEL SENSOR INFRARROJO NDIR MH-440D

Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd.

www.winsen-sensor.com

MH-440D NDIR Infrared CH₄ Sensor

1. Introduction

MH-440D infrared gas sensor is a miniature universal intelligent sensor, which adopts NDIR theory to detect concentration of CH₄ in air and has good selectivity, stable performance, long life, also is independent of Oxygen. The inside temperature sensor could be used for temperature compensation. This miniature infrared gas sensor is developed by the tight integration of mature infrared absorbing gas detection technology, micro machine workout and superior circuit design.

It is convenient in use and instead of catalytic component directly, widely used in various occasions with flammable and explosion hazard gas.



2. Features

- High sensitivity, high resolution, fast response
- Output method: UART, analog voltage signal
- Temperature compensation, excellent linear output
- Excellent stability, long lifespan
- Anti-poisons, anti-vapor interference
- Can replace catalytic type gas sensor directly.

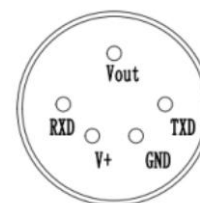
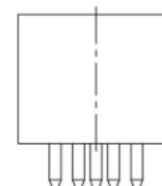
3. Applications

Widely used for HVAC refrigeration, air monitoring indoor, industrial-process control and safety protection, agriculture, and animal husbandry.

4. Main Parameters

Fig1. Technical Parameters

Detection Gas	Methane (CH ₄)
Working Voltage	3.6~5V DC (Need to be powered by safety barrier)
Average Current	<85mA
Interface Level	3.0V
Detection range	0~10%vol (selectable, refer fig2.)
Output Signal	UART (3.0V)
	0.4~2.0V DC
Warm-up time	3 min
Response time	T90<30 seconds
Working Temperature	-20°C ~ 60°C
Working Humidity	0~95%RH (no condensation)
Sizes	Φ 20 × 22.4mm
Weight	35g
Lifetime	>5 years
Defense Grade	IP54
Power, communication terminal	U _i =7.5VDC, I _i =265mA,
Intrinsic safety	P _i =0.5W, C _i =10 μF, L _i =0mH



Tel: 86-371-67169097 Fax: 86-371-60932988

1

Email: sales@winsensor.com

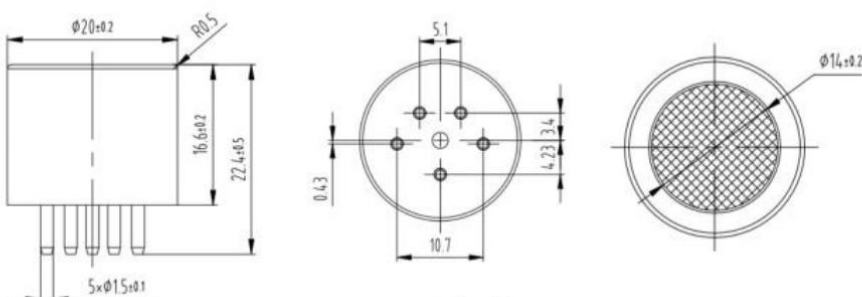
Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd.

www.winsen-sensor.com

Fig2.Measuring Range and Resolution

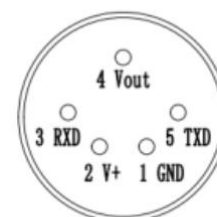
Target Gas	Molecular Formula	Measuring Range	Resolution	No. of decimal	Note
Methane	CH ₄	0~5.00%VOL	0.01%VOL	2	Temperature compensation
		0~10.00%VOL		2	
		0~100%LEL	1%LEL	none	

5.Struction Size



Pin definition

Name of Pin	Explanation
Pin 2	Vin Voltage input
Pin 1	GND
Pin 4	Vout (0.4~2 V)
Pin 3	UART (RXD) 0~3.0 V data input
Pin 5	UART (TXD) 0~3.0 V data output



6.Output way.

6.1 Analog Output

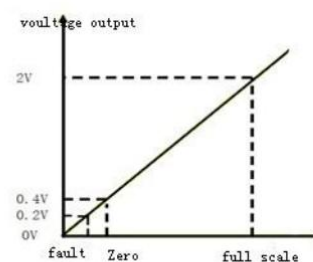
The output of Vout is proportional to the gas concentration, 0.4-2.0V output stands for 0 to full range.

Connection: Vin -5V, GND- Power Ground, Vout-ADC input.

After warm-up, Vout will show the voltage standing for the gas concentration.

If self-checking detects a fault, the output voltage is 0V.

Output concentration = sensor range * output voltage (V) / (2 - 0.4).



6.2 Digital Output

Please refer MH-440D communication protocol.

Tel: 86-371-67169097 Fax: 86-371-60932988

2

Email: sales@winsensor.com

Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd.

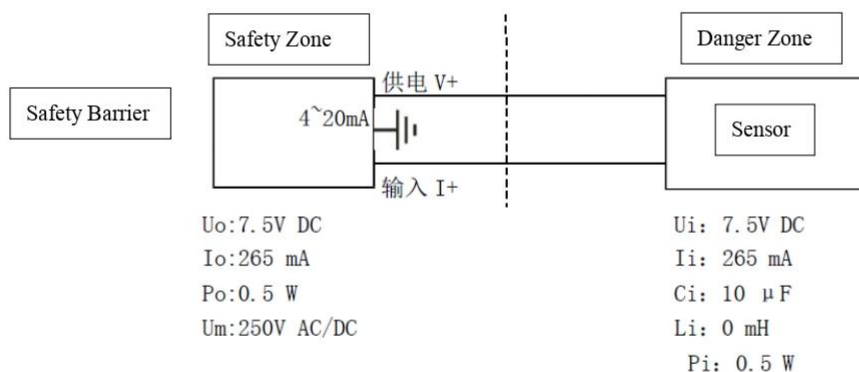
www.winsen-sensor.com

Intrinsically safe explosion-proof

- This product meets the standards of GB3836.1-2010 "Explosive Atmosphere Part 1: General Requirements for Equipment" and GB3836.4-2010 "Explosive Atmosphere Part 4: Equipment Protected by Intrinsically Safe "i" standards"; the explosion-proof mark is Exib II B T4 Gb, it is suitable for zone 1 and zone 2, contains Class IIA, T1-T3 explosive environment formed by the flammable gas, mixture of steam and air; it has passed the inspection by the National Quality Inspection Center for Explosion-proof Electrical Products and obtained the explosion-proof certificate. When using, please note the following:
- The intrinsically safe power supply must be used to power the sensor, otherwise the explosion-proof performance will be affected.
- It is forbidden to replace the sensor in dangerous places.
- It is forbidden to disassemble or replace the sensor element to avoid affecting the explosion-proof performance.
- It is not allowed to replace components or structures, so as not to affect the explosion-proof performance.
- The installation and wiring of the safety barrier must be carried out in accordance with the safety barrier instruction manual, and the safety barrier must obtain an explosion-proof certificate.

Connection diagram of intrinsically safe explosion-proof system

The on-site installation must comply with the relevant regulations of the GB3836.15—2000 "Electrical Equipment for Explosive Gas Environment Part 15: Electrical Installation in Hazardous Locations (Except Coal and Mines).



The distribution parameters of the connecting cable between the safety barrier and the sensor should meet:

$C_c \leq C_o - C_i$ $L_c \leq L_o - L_i$ $U_i \geq U_o$ $I_i \geq I_o$ $P_i \geq P_o$

Note:

Uo: Maximum output voltage of safety barrier.

Io: Maximum output current of safety barrier

Po: Maximum output power of safety barrier

Co: Maximum external capacitance of safety barrier

Lo: the maximum external inductance of the safety barrier (see the safety barrier instructions for the above parameters book)

Cc: Maximum allowable distributed capacitance of connecting cable

Ui: sensor maximum input voltage

Ii: Maximum sensor input current

Pi: sensor maximum input power

Ci: Maximum internal capacitance of the sensor

Tel: 86-371-67169097 Fax: 86-371-60932988

3

Email: sales@winsensor.com

Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd.

www.winsen-sensor.com

Li: Maximum internal inductance of the sensor

Lc: Maximum allowable distributed inductance of connecting cable.

7. Cautions for Maintenance

7.1 The sensor should be calibrated regularly. The suggested cycle time is 6 months.

7.2 Do not use the sensor in the high dusty environment for long time.

7.3 Please use the sensor with correct power supply.

7.4 Forbid to weld the sensor pins directly.

7.5 Forbid to cut the sensor pins. Output concentration = sensor range * output voltage (V) / (2 - 0.4).

Output concentration = sensor range * output voltage (V) / (2 - 0.4).

Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd

Add: No.299, Jinsuo Road, National Hi-Tech Zone,
Zhengzhou 450001 China

Tel: +86-371-67169097/67169670

Fax: +86-371-60932988

E-mail: sales@winsensor.com

Website: www.winsen-sensor.com

Tel: 86-371-67169097 Fax: 86-371-60932988

4

Email: sales@winsensor.com

ANEXO N°7: FICHA TÉCNICA DEL MODULO TRANSCPTOR RYLR993_LITE

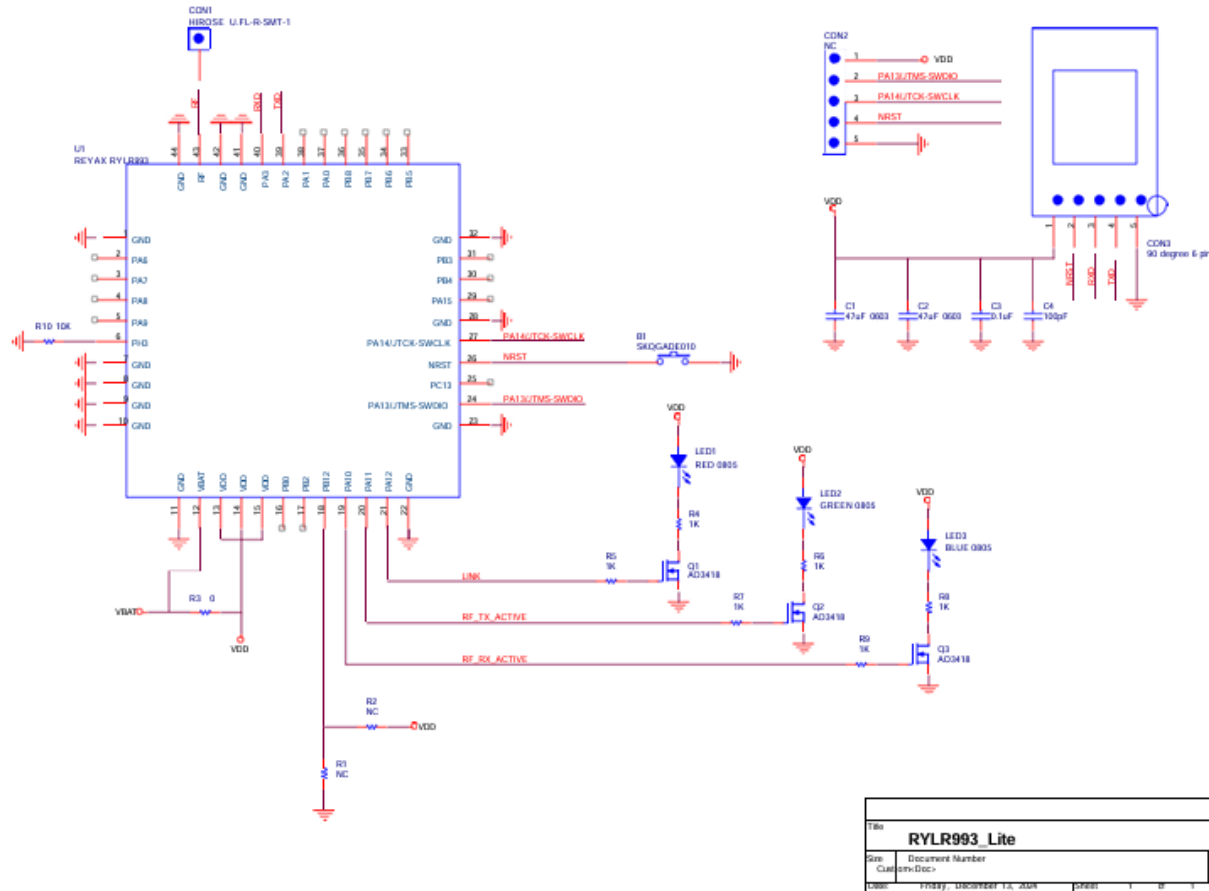
868/915MHz LoRaWAN® & Proprietary Transceiver Module Lite Evaluation Board **RYLR993_Lite** **REYAX**

SPECIFICATION

Item	Min.	Typical	Max.	Unit	Condition
VDD Power Supply	3	3.3	3.6	V	
VBAT Power Supply	2.7	3.3	3.6	V	
Frequency Accuracy		±10		ppm	at 25°C ±3°C
RF Output Power Range	-4	20	22	dBm	
RF Harmonic			-36	dBm	
RF sensitivity	-148			dBm	
RF Input Level			10	dBm	
Filter insertion loss	1	2	3	dB	
Frequency Range	820	868/915	960	MHz	
Transmit Current		140		mA	RFOP = +22 dBm
Class A Current		5		uA	
Class B & C Current		5		mA	
Baud rate		9600		bps	8, N, 1
Temperature sensor Accuracy		2		°C	
Digital input level high	0.8		VDD	V	VIH
Digital input level low			0.2	V	VIL
Digital output level high	0.9			V	VOH I _{max} = 1 mA
Digital output level low			0.1	V	VOL I _{max} = -1 mA
Operating Temperature	-40	25	+85	°C	

*For more detail, please refer to the REYAX RYLR993 information.

RYLR993_Lite SCHEMATIC



E-mail : sales@reyax.com
Website : <http://reyax.com>

REYAX
TECHNOLOGY CORPORATION, LTD

ANEXO N°8: FICHA TÉCNICA DEL MODULO SIM-800L



Smart Machine Smart Decision

1. Introduction

This document describes SIM800H&SIM800L hardware interface in great detail. The document can help customer to quickly understand SIM800H&SIM800L interface specifications, electrical and mechanical details. With the help of this document and other SIM800H&SIM800L application notes, customer guide, customers can use SIM800H&SIM800L to design various applications quickly.

2. SIM800H&SIM800L Overview

SIM800H&SIM800L is a quad-band GSM/GPRS module, that works on frequencies GSM850MHz, EGSM900MHz, DCS1800MHz and PCS1900MHz. SIM800H&SIM800L features GPRS multi-slot class 12/class 10 (optional) and supports the GPRS coding schemes CS-1, CS-2, CS-3 and CS-4.

With a tiny configuration of 17.8*15.8*2.4mm, SIM800H&SIM800L can meet almost all the space requirements in customer applications, such as smart phone, PDA and other mobile devices.

SIM800H&SIM800L is a LGA package with 88 pads, and provides all hardware interfaces between the module and customers' boards.

- Support 5*5*2 keypads
- One full modem serial port, customer can configure two serial ports
- One USB, the USB interfaces can debug, download software
- Audio channel which includes two microphone input; a receiver output and a speaker output
- Programmable general purpose input and output.
- A SIM card interface
- Support Bluetooth(only SIM800H)
- Support FM
- Support one PWM

SIM800H&SIM800L is designed with power saving technique so that the current consumption is as low as 1.04mA in sleep mode.

2.1. SIM800H&SIM800L

Table 1: Module information

	SIM800H	SIM800L
GSM	850,900,1800 and 1900MHz	850,900,1800 and 1900MHz
BT	Support	Not support
FLASH	32Mbit	16Mbit
RAM	32Mbit	32Mbit

2.2. SIM800H&SIM800L Key Features

Table 2: SIM800H&SIM800L key features

Feature	Implementation
Power supply	3.4V ~4.4V
Power saving	Typical power consumption in sleep mode is 1.04mA (BS_PA_MFRMS=9)



Smart Machine Smart Decision

Frequency bands	● Quad-band: GSM 850, EGSM 900, DCS 1800, PCS 1900. SIM800H&SIM800L can search the 4 frequency bands automatically. The frequency bands can also be set by AT command “AT+CBAND”. For details, please refer to <i>document [1]</i>. ● Compliant to GSM Phase 2/2+
Transmitting power	● Class 4 (2W) at GSM 850 and EGSM 900 ● Class 1 (1W) at DCS 1800 and PCS 1900
GPRS connectivity	● GPRS multi-slot class 12 (default) ● GPRS multi-slot class 1~12 (option)
Temperature range	● Normal operation: -40°C ~ +85°C ● Storage temperature -45°C ~ +90°C
Data GPRS	● GPRS data downlink transfer: max. 85.6 kbps ● GPRS data uplink transfer: max. 85.6 kbps ● Coding scheme: CS-1, CS-2, CS-3 and CS-4 ● PAP protocol for PPP connect ● Integrate the TCP/IP protocol. ● Support Packet Broadcast Control Channel (PBCCH) ● CSD transmission rates: 2.4, 4.8, 9.6, 14.4 kbps
CSD	● Support CSD transmission
USSD	● Unstructured Supplementary Services Data (USSD) support
SMS	● MT, MO, CB, Text and PDU mode ● SMS storage: SIM card
SIM interface	Support SIM card: 1.8V, 3V
External antenna	Antenna pad
Audio features	Speech codec modes: ● Half Rate (ETS 06.20) ● Full Rate (ETS 06.10) ● Enhanced Full Rate (ETS 06.50 / 06.60 / 06.80) ● Adaptive multi rate (AMR) ● Echo Cancellation ● Noise Suppression
Serial port and debug port	Serial port: ● Default one Full modem serial port ● 1200bps to 460800bps. ● Can be used for AT commands or data stream. ● Support RTS/CTS hardware handshake and software ON/OFF flow control. ● Multiplex ability according to GSM 07.10 Multiplexer Protocol. ● Autobauding supports baud rate from 1200 bps to 115200bps. ● upgrading firmware Debug port: ● USB_DN and USB_DP ● Can be used for debugging and upgrading firmware.
Phonebook management	Support phonebook types: SM, FD, LD, RC, ON, MC.
SIM application toolkit	GSM 11.14 Release 99
Real time clock	Support RTC



Smart Machine Smart Decision

Timing functions	Use AT command set
Physical characteristics	Size: 17.8*15.8*2.4mm Weight:1.35g
Firmware upgrade	Main serial port or USB port.(recommend to use USB port)

Table 3: Coding schemes and maximum net data rates over air interface

Coding scheme	1 timeslot	2 timeslot	4 timeslot
CS-1	9.05kbps	18.1kbps	36.2kbps
CS-2	13.4kbps	26.8kbps	53.6kbps
CS-3	15.6kbps	31.2kbps	62.4kbps
CS-4	21.4kbps	42.8kbps	85.6kbps

2.3. Operating Mode

The table below summarizes the various operating modes of SIM800H&SIM800L.

Table 4: Overview of operating modes

Mode	Function	
Normal operation	GSM/GPRS SLEEP	Module will automatically go into sleep mode if the conditions of sleep mode are enabling and there is no on air and no hardware interrupt (such as GPIO interrupt or data on serial port). In this case, the current consumption of module will reduce to the minimal level. In sleep mode, the module can still receive paging message and SMS.
	GSM IDLE	Software is active. Module is registered to the GSM network, and the module is ready to communicate.
	GSM TALK	Connection between two subscribers is in progress. In this case, the power consumption depends on network settings such as DTX off/on, FR/EFR/HR, hopping sequences, antenna.
	GPRS STANDBY	Module is ready for GPRS data transfer, but no data is currently sent or received. In this case, power consumption depends on network settings and GPRS configuration.
	GPRS DATA	There is GPRS data transfer (PPP or TCP or UDP) in progress. In this case, power consumption is related with network settings (e.g. power control level); uplink/downlink data rates and GPRS configuration (e.g. used multi-slot settings).
Power down	Normal power down by sending AT command “AT+CPOWD=1” or using the PWRKEY. The power management unit shuts down the power supply for the baseband part of the module, and only the power supply for the RTC is remained. Software is not active. The serial port is not accessible. Power supply (connected to VBAT) remains applied.	
Minimum functionality mode	AT command “AT+CFUN” can be used to set the module to a minimum functionality mode without removing the power supply. In this mode, the RF part of the module will not work or the SIM card will not be accessible, or both RF part and SIM card will be closed, and the serial port is still accessible. The power consumption in this mode is lower than normal mode.	

2.4. Functional Diagram

The following figure shows a functional diagram of SIM800H&SIM800L:

- GSM baseband
- GSM RF
- Antenna interface
- Other interface

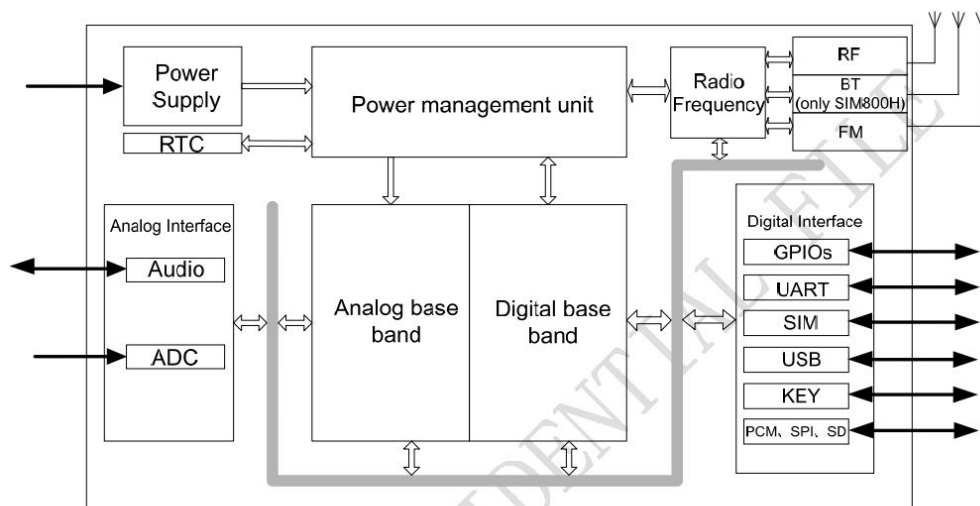


Figure 1: SIM800H&SIM800L functional diagram



3.2. Pin Description

Table 5: Pin description

Pin name	Pin number	I/O	Description	Comment
Power supply				
VBAT	1,42	I	Power supply	
VRTC	56	I/O	Power supply for RTC	It is recommended to connect with a battery or a capacitor (e.g. 4.7uF).
VDD_EXT	18	O	2.8V power output	If these pins are unused, keep open.
GND	2,6,8,35,37,38,39,41,43,44,45,58,67,71,72,73,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88		Ground	GND for VBAT recommend to use 2,43,44,45pin
Power on/down				
PWRKEY	48	I	PWRKEY should be pulled low at least 1 second and then released to power on/down the module.	Internally pulled up to VBAT.
Audio interfaces				
MIC1P	52	I	Differential audio input	If these pins are unused, keep open.
MIC1N	12			
SPK1P	53	O	Differential audio output	
SPK1N	13			
MIC2P	9	I	Differential audio input	
MIC2N	10			
SPK2P	51	O	Differential audio output	
SPK2N	11			
PCM interface				
PCM_CLK	29	O	PCM interface for digital audio	If these pins are unused, keep open.
PCM_OUT	30	O		
PCM_SYNC	65	O		
PCM_IN	66	I		
Keypads interface				
KBC4	24	I	Support up to 50 buttons (5*5*2)	If these pins are unused, keep open.（Please make sure pin20 at high level when power on）
KBC3	21	I		
KBC2	22	I		
KBC1	25	I		
KBC0	20	I		
KBR4	63	O		
KBR3	23	O		



Smart Machine Smart Decision

KBR2	61	O		
KBR1	60	O		
KBR0	62	O		
GPIO				
GPIO1	3	I/O	Programmable general purpose input and output	
GPIO2	27	I/O		
GPIO3	28	I/O		
NETLIGHT	64	O	Network status	
STATUS	4	O	Power on status	
Serial port				
DTR	69	I	Data terminal ready	If these pins are unused, keep open.
RI	68	O	Ring indicator	
DCD	70	O	Data carrier detect	
CTS	34	O	Request to send	
RTS	33	I	Clear to send	
TXD	32	O	Transmit data	
RXD	31	I	Receive data	
Debug interface				
VBUS	7	I	Debug and download	If these pins are unused, keep open.
USB_DP	59	I/O		
USB_DN	19	I/O		
ADC				
ADC	50	I	10bit general analog to digital converter	If these pins are unused, keep open.
PWM				
PWM	26	O	Pulse-width modulation	If these pins are unused, keep open.
I2C				
SDA	75	I/O	Open drain output	If these pins are unused, keep open.
SCL	74	O	Open drain output	
SIM card interface				
SIM_VDD	16	O	Voltage supply for SIM card. Support 1.8V or 3V SIM card	All signals of SIM interface should be protected against ESD with a TVS diode array.
SIM_DATA	14	I/O	SIM data input/output	
SIM_CLK	55	O	SIM clock	
SIM_RST	15	O	SIM reset	
SIM_DET	54	I	SIM card detection	If these pins are unused, keep open.
Antenna interface				
GSM_ANT	40	I/O	Connect GSM antenna	
BT_ANT	36	I/O	Connect Bluetooth antenna	Only SIM800H
FM ANTP	17	I	Differential antenna for FM	



Smart Machine Smart Decision

FM_ANTN	57	I		
Synchronizing signal of RF				
RF_SYNC	5	O	Synchronizing signal of RF	
Other				
RESET	49	I	Reset input(Active low)	
ISINK1	46	I	Drive keypad backlight	
ISINK0	47	I	Drive LCD backlight	

3.3. Package Dimensions

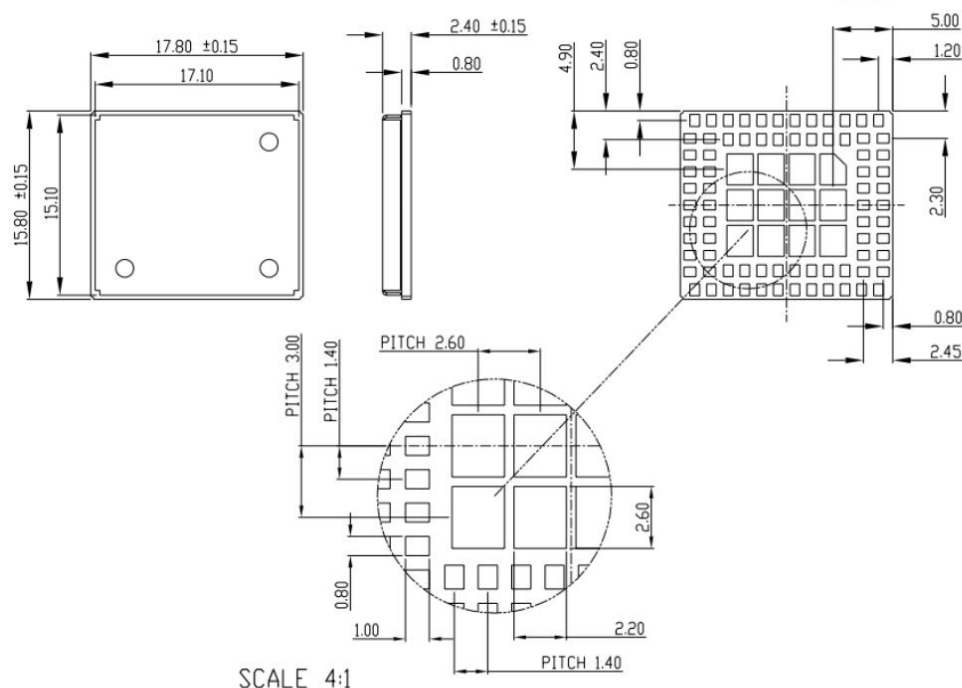


Figure 3: Dimensions of SIM800H&SIM800L (Unit: mm)

ANEXO N°9: FICHA TÉCNICA DEL ARDUINO® NANO EVERY

1 The Board

As all Nano form factor boards, Nano Every does not have a battery charger but can be powered through USB or headers.

NOTE: Arduino Nano Every is 5V compatible so it is a drop in replacement for the standard Nano board

2 Ratings

2.1 Recommended Operating Conditions

Symbol	Description	Min	Max
	Conservative thermal limits for the whole board:	-40 °C (40 °F)	85 °C (185 °F)

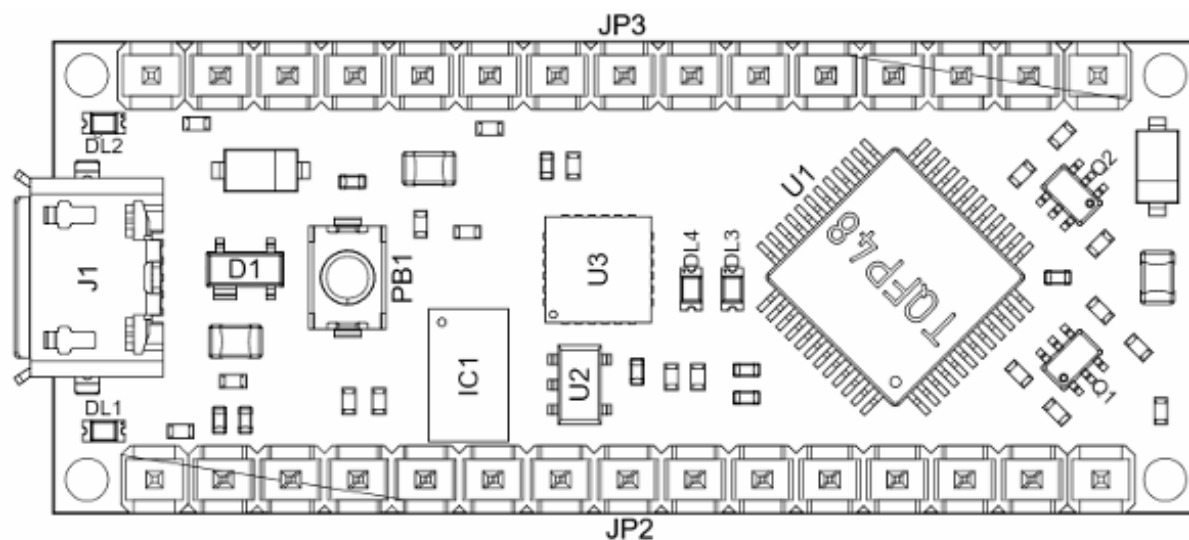
2.2 Power Consumption

Symbol	Description	Min	Typ	Max	Unit
PBL	Power consumption with busy loop		TBC		mW
PLP	Power consumption in low power mode		TBC		mW
PMAX	Maximum Power Consumption		TBC		mW

3 Functional Overview

3.1 Board Topology

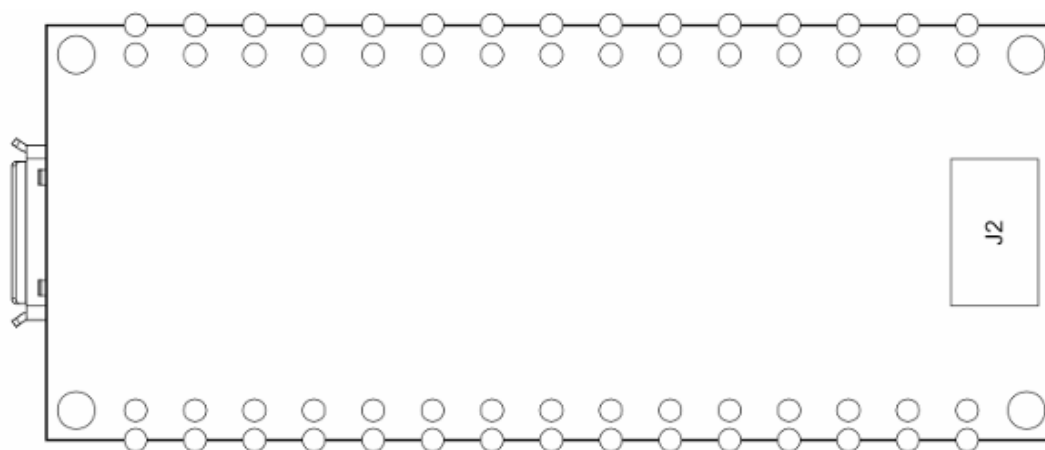
Top:



Board topology top

Ref.	Description	Ref.	Description
U1	ATMEGA4809-A.6 IC Module	D1	PRTR5V0U2X Diodes
U2	AP2112k-3.3TRG1 Diodes	PB1	T-1185AP1C-160G-GTR Push button
U3	ATSAM-D11 Chip	IC1	MPM3610AGQV-P Module
J1	Micro USB Connector		

Bottom:



Board topology bot

Ref.	Description	Ref.	Description
J2	Bridge?		

3.2 Processor

The Main Processor is an AVR running at up to 20MHz. Most of its pins are connected to the external headers, however some are reserved for internal communication with the USB Bridge coprocessor.

Communication with SAMD11D14A happens through a serial port and a single wire programming through the following pins:

ATMega4809 Pin	ATMega4809 Acronym	SAMD11 Pin	SAMD11 Acronym	Description
9	PB05	15	PA22	SAMD11 TX ↔ ATMega4809 RX
8	PB04	16	PA23	ATMega4809 TX ↔ SAMD11 RX
41	UPDI	12	PA15	UPDI RX
11	PA14	UPDI TX		

3.3 USB Bridge

The SAMD11D14A processor is shipped with a firmware that implements USB to serial bridge and handles ATMega4809 firmware upgrade through the UPDI interface.

Firmware also has a bootloader that allows reprogramming to implement other USB classes, expanding the possibilities of classic Nano boards that are limited to serial bridge.

NOTE: SAMD11D14A pins are 3.3V only and are connected to ATMega4809 through level shifters. Although it is possible to wire its pins to the external world care must be taken as they are NOT 5V tolerant



All Arduino IoT enabled products are supported on Arduino Cloud which allows you to Log, graph and analyze sensor data, trigger events, and automate your home or business.

5.1 Online Resources

Now that you have gone through the basics of what you can do with the board you can explore the endless possibilities it provides by checking exciting projects on Arduino Project Hub [4], the Arduino Library Reference [5] and the on line store [6] where you will be able to complement your board with sensors, actuators and more.

Pinout

ANEXO N°10: FICHA TÉCNICA DEL ARDUINO® NANO



Arduino® Nano

1 The Board

1.1 Application Examples

Arduino Nano is the first embedded microcontroller in the Nano series with minimum functionalities, designed for mini projects from the maker community. With a large number of input/output pins gives the advantage of utilizing several serial communications like UART, SPI and I2C. The hardware is compatible with Arduino IDE, Arduino CLI and Cloud Editor.

Security: The high-performance and low-power capabilities gives the chance to develop security based applications like access control systems using fingerprint sensors. The flexibility to interface sensors and external devices using serial communication has improved the scope of utility.

Environmental: The low-power feature of the microcontroller and the power supply options for the board has enhanced the ability to implement remote IoT projects related to environmental issues.

Robotics: Robotics has always been the favorite area of exploration for the Maker community and with this tiny embedded hardware you can now create complex and advanced robotic applications.

1.2 Accessories

1.3 Related Products

- Arduino® Nano 33 BLE (SKU: ABX00030)
- Arduino® 33 IoT (SKU: ABX00027)
- Arduino® Micro (SKU: A000093)



2 Ratings

2.1 Recommended Operating Conditions

Symbol	Description	Min	Max
	Conservative thermal limits for the whole board:	-40 °C	85 °C

2.2 Power Consumption

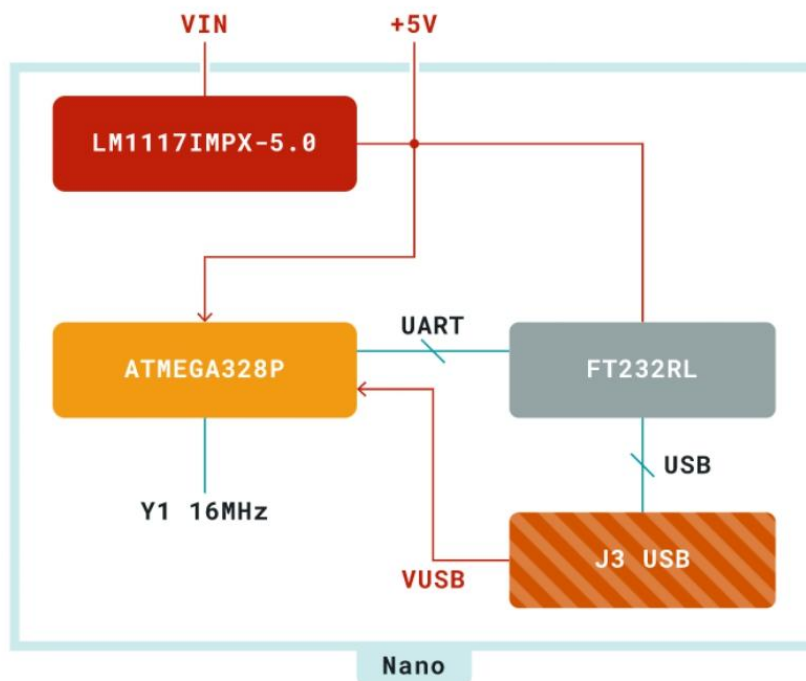
Symbol	Description	Min	Typ	Max	Unit
USB VCC	Input supply from USB		TBC		mW
VIN	Input from VIN pad		TBC		mW

3 Functional Overview

3.1 Block Diagram



Arduino® Nano



Block Diagram of Arduino Nano

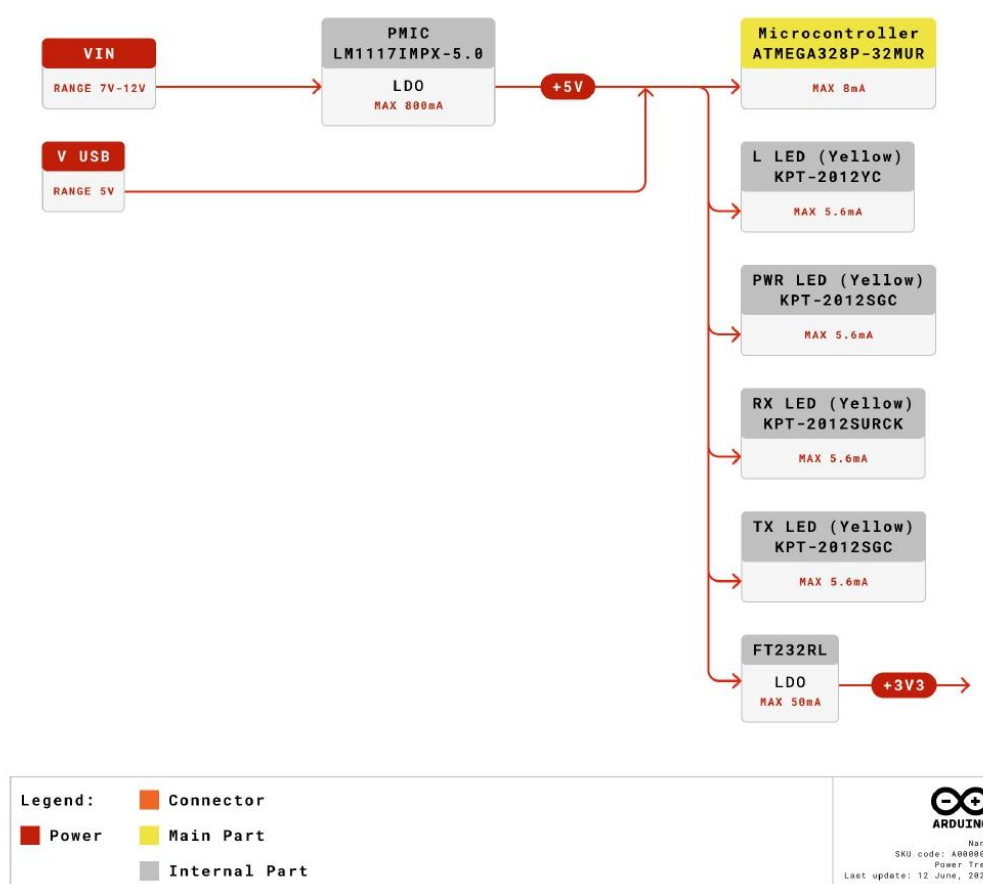


Arduino® Nano

3.2 Processor

The primary processor in the Nano board is the high-performance and low-power 8-bit ATmega328 microcontroller that runs at a clock frequency of 16 MHz. The ability to interface external devices through serial communication supported by the chip with UART TTL (5V), I2C (TWI) and SPI. Nano can be programmed with Arduino software reducing the entry barriers for new users. Smallest dimension embedded hardware makes it a perfect choice for breadboard-friendly projects from the maker community.

3.3 Power Tree



Power Tree of Arduino Nano

The Nano can be powered by either the USB port or alternatively via VIN. The input supply of VIN is regulated by an LDO so the supply is limited to 5 V for the optimal functioning of the board. There is also another regulator which limits the voltage to 3.3V for powering the components with low voltage requirements.



4 Board Operation

4.1 Getting Started - IDE

If you want to program your Nano while offline you need to install the Arduino Desktop IDE [1] To connect the Nano to your computer, you'll need a Micro-B USB cable. This also provides power to the board, as indicated by the LED.

4.2 Getting Started - Arduino Cloud Editor

All Arduino boards, including this one, work out-of-the-box on the Arduino Cloud Editor [2], by just installing a simple plugin.

The Arduino Cloud Editor is hosted online, therefore it will always be up-to-date with the latest features and support for all boards. Follow [3] to start coding on the browser and upload your sketches onto your board.

4.3 Sample Sketches

Sample sketches for the board can be found either in the "Examples" menu in the Arduino IDE or in Arduino Documentation [4].

4.4 Online Resources

Now that you have gone through the basics of what you can do with the board you can explore the endless possibilities it provides by checking exciting projects on Arduino Project Hub [5], the Arduino Library Reference [6] and the online store [7] where you will be able to complement your board with sensors, actuators and more.

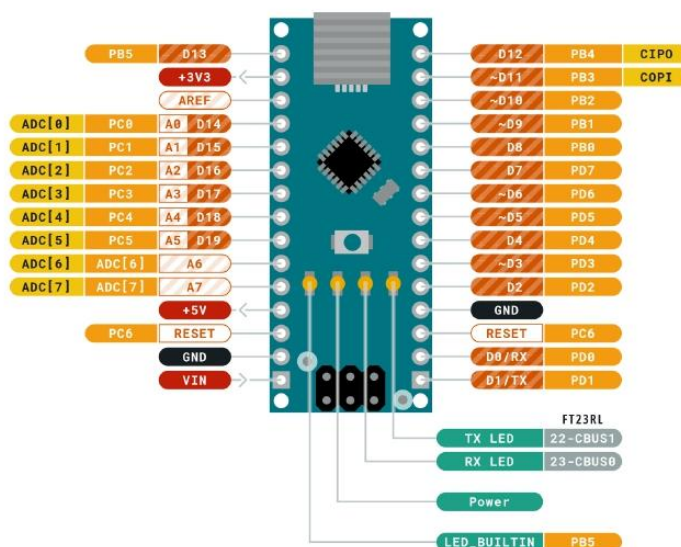


Arduino® Nano

5 Connector Pinouts



ARDUINO
NANO



	Ground		Internal Pin		Digital Pin		Microcontroller's Port
	Power		SWD Pin		Analog Pin		
	LED		Other Pin		Default		

ARDUINO.CC

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License. To view a copy of this license visit <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/> or send a letter to Creative Commons, PO Box 1886, Mountain View, CA 94041, USA.

Power Tree of Arduino Nano

ANEXO N°11: FICHA TÉCNICA DEL ESP8266



Espressif Systems

ESP8266 Datasheet

1. General Overview

1.1. Introduction

Espressif Systems' Smart Connectivity Platform (ESCP) is a set of high performance, high integration wireless SOCs, designed for space and power constrained mobile platform designers. It provides unsurpassed ability to embed WiFi capabilities within other systems, or to function as a standalone application, with the lowest cost, and minimal space requirement.

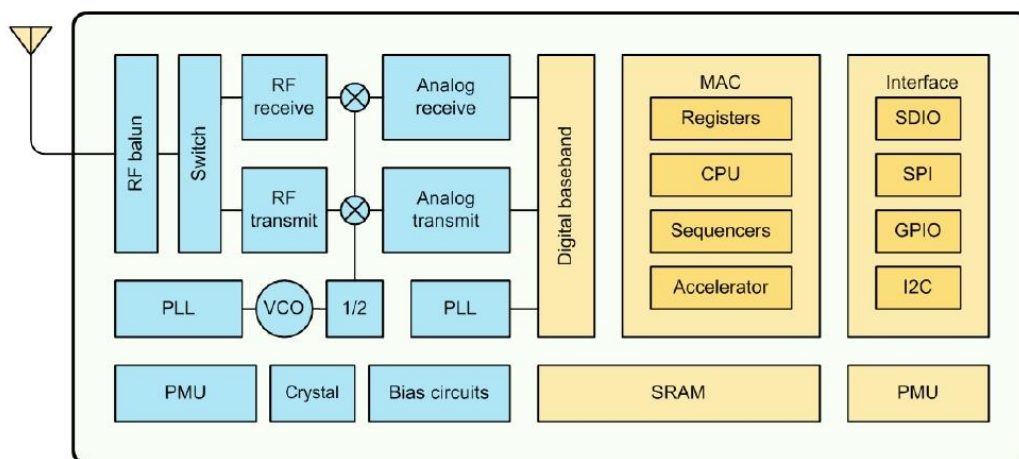


Figure 1 ESP8266EX Block Diagram

ESP8266EX offers a complete and self-contained WiFi networking solution; it can be used to host the application or to offload WiFi networking functions from another application processor.

When ESP8266EX hosts the application, it boots up directly from an external flash. It has integrated cache to improve the performance of the system in such applications.

Alternately, serving as a WiFi adapter, wireless internet access can be added to any micro controller-based design with simple connectivity (SPI/SDIO or I2C/UART interface).

ESP8266EX is among the most integrated WiFi chip in the industry; it integrates the antenna switches, RF balun, power amplifier, low noise receive amplifier, filters, power management modules, it requires minimal external circuitry, and the entire solution, including front-end module, is designed to occupy minimal PCB area.

ESP8266EX also integrates an enhanced version of Tensilica's L106 Diamond series 32-bit processor, with on-chip SRAM, besides the WiFi functionalities. ESP8266EX is often integrated with external sensors and other application specific devices through its GPIOs; sample codes for such applications are provided in the software development kit (SDK).



Espressif Systems

ESP8266 Datasheet

Espressif Systems' Smart Connectivity Platform (ESCP) demonstrates sophisticated system-level features include fast sleep/wake context switching for energy-efficient VoIP, adaptive radio biasing for low-power operation, advance signal processing, and spur cancellation and radio co-existence features for common cellular, Bluetooth, DDR, LVDS, LCD interference mitigation.

1.2. Features

- 802.11 b/g/n
- Integrated low power 32-bit MCU
- Integrated 10-bit ADC
- Integrated TCP/IP protocol stack
- Integrated TR switch, balun, LNA, power amplifier and matching network
- Integrated PLL, regulators, and power management units
- Supports antenna diversity
- WiFi 2.4 GHz, support WPA/WPA2
- Support STA/AP/STA+AP operation modes
- Support Smart Link Function for both Android and iOS devices
- SDIO 2.0, (H) SPI, UART, I2C, I2S, IR Remote Control, PWM, GPIO
- STBC, 1x1 MIMO, 2x1 MIMO
- A-MPDU & A-MSDU aggregation & 0.4s guard interval
- Deep sleep power <10uA, Power down leakage current < 5uA
- Wake up and transmit packets in < 2ms
- Standby power consumption of < 1.0mW (DTIM3)
- +20 dBm output power in 802.11b mode
- Operating temperature range -40C ~ 125C
- FCC, CE, TELEC, WiFi Alliance, and SRRC certified

1.3. Parameters

Table 1 Parameters



Espressif Systems

ESP8266 Datasheet

Categories	Items	Values
WiFi Paramters	Certificates	FCC/CE/TELEC/SRRC
	WiFi Protocles	802.11 b/g/n
	Frequency Range	2.4G-2.5G (2400M-2483.5M)
	Tx Power	802.11 b: +20 dBm
		802.11 g: +17 dBm
		802.11 n: +14 dBm
	Rx Sensitivity	802.11 b: -91 dbm (11 Mbps)
		802.11 g: -75 dbm (54 Mbps)
		802.11 n: -72 dbm (MCS7)
	Types of Antenna	PCB Trace, External, IPEX Connector, Ceramic Chip
Hardware Paramaters	Peripheral Bus	UART/SDIO/SPI/I2C/I2S/IR Remote Control
		GPIO/PWM
	Operating Voltage	3.0~3.6V
	Operating Current	Average value: 80mA
	Operating Temperature Range	-40°~125°
	Ambient Temperature Range	Normal temperature
	Package Size	5x5mm
	External Interface	N/A
Software Parameters	WiFi mode	station/softAP/SoftAP+station
	Security	WPA/WPA2
	Encryption	WEP/TKIP/AES
	Firmware Upgrade	UART Download / OTA (via network)
	Ssoftware Development	Supports Cloud Server Development / SDK for custom firmware development
	Network Protocols	IPv4, TCP/UDP/HTTP/FTP



Espressif Systems

ESP8266 Datasheet

	User Configuration	AT Instruction Set, Cloud Server, Android/ iOS App
--	--------------------	---

1.4. Ultra Low Power Technology

ESP8266EX has been designed for mobile, wearable electronics and Internet of Things applications with the aim of achieving the lowest power consumption with a combination of several proprietary techniques. The power saving architecture operates mainly in 3 modes: active mode, sleep mode and deep sleep mode.

By using advance power management techniques and logic to power-down functions not required and to control switching between sleep and active modes, ESP8266EX consumes about than 60uA in deep sleep mode (with RTC clock still running) and less than 1.0mA (DTIM=3) or less than 0.5mA (DTIM=10) to stay connected to the access point.

When in sleep mode, only the calibrated real-time clock and watchdog remains active. The real-time clock can be programmed to wake up the ESP8266EX at any required interval.

The ESP8266EX can be programmed to wake up when a specified condition is detected. This minimal wake-up time feature of the ESP8266EX can be utilized by mobile device SOCs, allowing them to remain in the low-power standby mode until WiFi is needed.

In order to satisfy the power demand of mobile and wearable electronics, ESP8266EX can be programmed to reduce the output power of the PA to fit various application profiles, by trading off range for power consumption.

1.5. Major Applications

Major fields of ESP8266EX applications to Internet-of-Things include:

- Home Appliances
- Home Automation
- Smart Plug and lights
- Mesh Network
- Industrial Wireless Control
- Baby Monitors
- IP Cameras
- Sensor Networks
- Wearable Electronics



Espressif Systems

ESP8266 Datasheet

- WiFi Location-aware Devices
- Security ID Tags
- WiFi Position System Beacons

ANEXO N°12: FICHA TÉCNICA DEL NEO-6M

NEO-6 series

Versatile u-blox 6 GPS modules

GPS

Highlights

- UART, USB, DDC (I²C compliant) and SPI interfaces
- Available in Crystal and TCXO versions
- Onboard RTC crystal for faster warm and hot starts
- 1.8 V and 3.0 V variants



NEO-6:
12.2 x 16.0 x 2.4 mm

Features

- u-blox 6 position engine:
 - Navigate down to -162 dBm and -148 dBm coldstart
 - Faster acquisition with AssistNow Autonomous
 - Configurable power management
 - Hybrid GPS/SBAS engine (WAAS, EGNOS, MSAS)
 - Anti-jamming technology
- Simple integration with u-blox wireless modules
- A-GPS: AssistNow Online and AssistNow Offline services, OMA SUPL compliant
- Backward compatible (hardware and firmware); easy migration from NEO-5 family or NEO-4S
- LCC package for reliable and cost effective manufacturing
- Compatible with u-blox GPS Solution for Android
- Based on GPS chips qualified according to AEC-Q100
- Manufactured in ISO/TS 16949 certified production sites
- Qualified according to ISO 16750

Product description

The NEO-6 module series brings the high performance of the u-blox6 position engine to the miniature NEO form factor. u-blox6 has been designed with low power consumption and low costs in mind. Intelligent power management is a breakthrough for low-power applications. These receivers combine a high level of integration capability with flexible connectivity options in a small package. This makes them perfectly suited for mass-market end products with strict size and cost requirements. The DDC interface provides connectivity and enables synergies with u-blox LEON and LISA wireless modules.

All NEO-6 modules are manufactured in ISO/TS 16949 certified sites. Each module is tested and inspected during production. The modules are qualified according to ISO 16750 - Environmental conditions and electrical testing for electrical and electronic equipment for road vehicles.

Product selector

Model	Type	Supply	Interfaces				Features						
	Standalone GPS Standalone GLONASS Timing & Raw Data Dead Reckoning	1.75 V – 2.0 V 2.7 V – 3.6 V	UART	USB	SPI	DDC (I2C compliant)	Programmable (Flash) FW update	Oscillator	RTC crystal	Antenna supply and supervisor	Configuration pins	Timepulse	External interrupt / Wakeup
NEO-6G	•	•	•	•	•	•		T	•	○	3	1	•
NEO-6Q	•	•	•	•	•	•		T	•	○	3	1	•
NEO-6M	•	•	•	•	•	•		C	•	○	3	1	•

◦ = requires external components and integration on application processor

C = Crystal / T = TCXO



locate, communicate, accelerate

Receiver performance data

Receiver type	50-channel u-blox 6 engine GPS L1 C/A code SBAS: WAAS, EGNOS, MSAS		
Navigation update rate	up to 5 Hz		
Accuracy ¹	Position	2.5 m CEP	
	SBAS	2.0 m CEP	
Acquisition ¹		NEO-6G/Q	NEO-6M
	Cold starts:	26 s	27 s
	Aided starts ² :	1 s	< 3 s
	Hot starts:	1 s	1 s
Sensitivity ³		NEO-6G/Q	NEO-6M
	Tracking:	-162 dBm	-161 dBm
	Cold starts:	-148 dBm	-147 dBm
	Hot starts:	-157 dBm	-156 dBm

¹ All SV @ -130 dBm

² Dependent on aiding data connection speed and latency

³ Demonstrated with a good active antenna

Electrical data

Power supply	2.7 V – 3.6 V (NEO-6Q/6M) 1.75 V – 2.0 V (NEO-6G)
Power consumption	111 mW @ 3.0V (continuous) 33 mW @ 3.0V Power Save Mode (1 Hz) 68 mW @ 1.8V (continuous) 22 mW @ 1.8V Power Save Mode (1 Hz)
Backup power	1.4 V – 3.6V, 22 µA
Supported antennas	Active and passive

Interfaces

Serial interfaces	1 UART 1 USB V2.0 full speed 12 Mbit/s 1 DDC (I ² C compliant) 1 SPI
Digital I/O	Configurable timepulse 1 EXTINT input for Wakeup
Serial and I/O	Voltages 2.7 – 3.6 V (NEO-6Q/6M) 1.75 – 2.0 V (NEO-6G)
Timepulse	Configurable 0.25 Hz to 1 kHz
Protocols	NMEA, UBX binary, RTCM

Legal Notice

u-blox reserves all rights to this document and the information contained herein. Products, names, logos and designs described herein may in whole or in part be subject to intellectual property rights. Reproduction, use, modification or disclosure to third parties of this document or any part thereof without the express permission of u-blox is strictly prohibited.

The information contained herein is provided "as is". No warranty of any kind, either express or implied, is made in relation to the accuracy, reliability, fitness for a particular purpose or content of this document. This document may be revised by u-blox at any time. For most recent documents, please visit www.u-blox.com.

Copyright © 2011, u-blox AG

Specification applies to FW 7

Package

24 pin LCC (Leadless Chip Carrier): 12.2 x 16.0 x 2.4 mm, 1.6 g

Pinout

13	GND	GND	12
14	MOSI/CFG_COM0	RF_IN	11
15	MISO/CFG_COM1	GND	10
16	CFG_GPS0/SCK	VCC_RF	9
17	Reserved	Reserved	8
18	SDA2	VDDUSB	7
19	SCL2	USB_DP	6
20	TxD1	USB_DM	5
21	RxD1	EXTINT0	4
22	V_BCKP	TIMEPULSE	3
23	VCC	SS_N	2
24	GND	Reserved	1

Environmental data, quality & reliability

Operating temp. -40° C to 85° C

Storage temp. -40° C to 85° C

RoHS compliant (lead-free)

Qualification according to ISO 16750

Manufactured in ISO/TS 16949 certified production sites

Support products

u-blox 6 Evaluation Kits:

Easy-to-use kits to get familiar with u-blox 6 positioning technology, evaluate functionality, and visualize GPS performance.

EVK-6H: u-blox 6 Evaluation Kit with TCXO, suitable for NEO-6G, NEO-6Q

EVK-6P: u-blox 6 Evaluation Kit with crystal, suitable for NEO-6M

Ordering information

NEO-6G-0	u-blox 6 GPS Module, 1.8V, TCXO, 12x16mm, 250 pcs/reel
NEO-6M-0	u-blox 6 GPS Module, 12x16mm, 250 pcs/reel
NEO-6Q-0	u-blox 6 GPS Module, TCXO, 12x16mm, 250 pcs/reel

Available as samples and tape on reel (250 pieces)

Contact us

HQ Switzerland
+41 44 722 7444
info@u-blox.com

EMEA
+41 44 722 7444
info@u-blox.com

Americas
+1 703 483 3180
info_us@u-blox.com

APAC – Singapore
+65 6734 3811
info_ap@u-blox.com

China
+86 10 68 133 545
info_cn@u-blox.com

Japan
+81 3 5775 3850
info_jp@u-blox.com

Korea
+82 2 542 0861
info_kr@u-blox.com

Taiwan
+886 2 2657 1090
info_tw@u-blox.com

ANEXO N°13: MATRIZ DE CONSISTENCIA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE EQUIPO PORTÁTIL DETECTOR DE GASES (H2S, CH4, CO Y O2) CON GEOLOCALIZACIÓN, UTILIZANDO TECNOLOGÍA DE MODULACIÓN LORA Y SISTEMA AUTOMÁTICO DE CONTROL DE EMERGENCIAS BASADO EN IOT			
Problemas	Objetivos	Variables	Metodologías
General	General	Variable 1	
¿Cómo se puede diseñar e implementar un equipo portátil detector de gases (H2S, CH4, CO y O2) con geolocalización, utilizando un sistema automático de control de emergencias y tecnología de modulación LoRa basada en IoT, con el fin de mejorar la detección y monitoreo de los gases mencionados y proporcionar una respuesta más rápida y eficiente en situaciones de emergencia?	Diseñar e implementar un equipo portátil detector de gases (H2S, CH4, CO y O2) con geolocalización, utilizando un sistema automático de control de emergencias y tecnología de modulación LoRa basada en IoT.	Sistema automático de control de emergencias basado en IoT	El alcance de la investigación es Explicativo. El diseño de esta investigación es experimental. La investigación en cuestión se efectuará en el periodo 2023, durante los meses de junio y Julio. La unidad de estudio será el grupo de personas, que realizaran pruebas en diferentes escenarios de trabajo, como galerías, túneles,
Específicos	Específicos	Variable 2	
¿Cuáles son las características y propiedades	Realizar una investigación y análisis sobre las características y	Equipo Portátil detector de gases	

específicas de los gases H ₂ S, CH ₄ , CO y O ₂ , y cuáles son los riesgos asociados a su presencia en entornos industriales en términos de salud y seguridad?	propiedades de los gases H ₂ S, CH ₄ , CO y O ₂ , así como los riesgos asociados a su presencia en entornos industriales.		interior de minas, entre otros, con el objetivo de evaluar el desempeño del equipo en situaciones reales y observar su capacidad para detectar gases de manera precisa y oportuna.
¿Cómo diseñar un circuito electrónico que pueda detectar con precisión y sensibilidad los gases H ₂ S, CH ₄ , CO y O ₂ , y que tenga un tiempo de respuesta adecuado para garantizar la detección oportuna de estos gases peligrosos?	Diseñar un circuito electrónico para la detección de los gases H ₂ S, CH ₄ , CO y O ₂ , utilizando sensores adecuados, para ello se considerará la precisión, sensibilidad y tiempo de respuesta del equipo detector.	Dimensiones: • Monitoreo y detección de situaciones de emergencia. • Notificación de alertas. • Automatización de acciones de emergencia. • Capacidad de detección • Tecnología de comunicación • Geolocalización	Las estrategias para la realización de este proyecto son las siguientes: Revisión bibliográfica sobre la detección de gases en el rubro minero. Diseño del prototipo equipo portátil detector de gases con geolocalización y control de emergencias. Implementación del prototipo en la realización de pruebas.
¿Qué enfoque se debe seguir para desarrollar un sistema de geolocalización eficiente que permita identificar la ubicación exacta del equipo y los usuarios en tiempo real, y cómo se puede utilizar esta información para mejorar la gestión de emergencias y la toma de	Desarrollar un sistema de geolocalización eficiente que permita identificar la ubicación exacta del equipo y de los usuarios en tiempo real, facilitando la gestión de emergencias, el seguimiento del equipo y la toma de decisiones basada en la información geográfica.		

decisiones basada en la información geográfica?			Evaluación del desempeño del equipo en condiciones de trabajo reales.
¿Cuáles son los requisitos y consideraciones clave para implementar una interfaz de usuario que pueda visualizar los datos de detección de gases y la información de geolocalización en dispositivos móviles o en una plataforma web, y cómo se puede diseñar de manera efectiva para facilitar el monitoreo y la toma de decisiones en situaciones de emergencia?	Implementar una interfaz de usuario que permita la visualización de los datos de detección de gases y la información de geolocalización en un dispositivo móvil o en una plataforma web. Esto facilitará el monitoreo y la toma de decisiones en situaciones de emergencia.	Indicadores: • Tiempo de detección de emergencias. • Precisión de la detección. • Eficacia de la comunicación. • Tiempo de respuesta a emergencias. • Rango de detección • Portabilidad y facilidad de uso. • Precisión y exactitud. • Calibración y mantenimiento.	
¿Cómo se puede lograr la integración exitosa del sistema de detección de gases y geolocalización con una red de comunicación inalámbrica utilizando tecnología de modulación LoRa, y cuáles son los desafíos	Integrar el sistema de detección de gases y geolocalización con una red de comunicación inalámbrica utilizando tecnología de modulación LoRa.		

técnicos y logísticos asociados con esta integración?			
¿Cuáles son los criterios y las metodologías adecuadas para validar la funcionalidad y precisión del Equipo Portátil Detector de Gases en entornos controlados y situaciones reales, y cómo se puede garantizar su efectividad y confiabilidad en la detección precisa de gases peligrosos?	Validar la funcionalidad y precisión del Equipo Portátil Detector de Gases mediante pruebas y experimentos en entornos controlados y situaciones reales, garantizando su efectividad y confiabilidad en la detección de gases peligrosos.		