Intelligent Early Warning System for Gas and Smoke Detection in Multiple Environments Using MQ-2 and Arduino in Cajamarca

González Castañeda, Jairo; Marquina-Vásquez Jheferson Fernando[2], Estudiante de Ingeniería Industrial[2]; Quiroz-Choroco Jhoselin Valeria[3], Estudiante de Ingeniería Industrial[3] ; Sanchez-Ravines Max Edwin[4], Estudiante de Ingeniería Industrial[4]

[1]*Universidad Privada del Norte, Perú, N00317080@upn.pe, n00317080@upn.pe, n00235147@upn.pe, n00239372@upn.pe, n00332424@upn.pe*

Abstract*— The timely detection of flammable gases and smoke is a fundamental aspect of fire prevention and risk reduction in residential, commercial, and industrial settings. In this context, this research aimed to design and implement an intelligent early-warning system based on the MQ-2 sensor, the Arduino platform, and a mobile application for the remote monitoring of multiple environments. A quantitative approach with a pre-experimental design was employed, involving 30 controlled functional tests that evaluated response time, detection accuracy, alert activation, and mobile monitoring availability. The results showed an average response time of 2.1 seconds, a detection accuracy of 96.7%, a local alert activation rate of 100%, and a remote monitoring availability of 98.3%. These results demonstrate the system's adequate functional performance under the evaluated experimental conditions and highlight the capability to integrate local detection and remote monitoring using IoT technologies. It is concluded that the developed system represents a technological alternative for the early detection of flammable gases and smoke with potential application across various environments; its validation under real-world conditions should be addressed in future work.

Sistema inteligente de alerta temprana para detección de gases y humo en múltiples entornos con MQ-2 y Arduino en Cajamarca

González Castañeda, Jairo; Marquina-Vásquez Jheferson Fernando[2], Estudiante de Ingeniería Industrial[2]; Quiroz-Choroco Jhoselin Valeria[3], Estudiante de Ingeniería Industrial[3] ; Sanchez-Ravines Max Edwin[4], Estudiante de Ingeniería Industrial[4]

[1]*Universidad Privada del Norte, Perú, N00317080@upn.pe, n00317080@upn.pe, n00235147@upn.pe, n00239372@upn.pe, n00332424@upn.pe*

Resumen– ***La detección oportuna de gases inflamables y humo constituye un aspecto fundamental para prevenir incendios y reducir riesgos en entornos residenciales, comerciales e industriales. En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo diseñar e implementar un sistema inteligente de alerta temprana basado en el sensor MQ-2, la plataforma Arduino y una aplicación móvil para el monitoreo remoto de múltiples entornos. Se empleó un enfoque cuantitativo con diseño preexperimental, mediante 30 pruebas controladas de funcionamiento, en las cuales se evaluaron el tiempo de respuesta, la precisión de detección, la activación de alertas y la disponibilidad del monitoreo móvil. Los resultados evidenciaron un tiempo promedio de respuesta de 2.1 segundos, una precisión de detección del 96.7 %, una activación de alertas locales del 100 % y una disponibilidad del monitoreo remoto del 98.3 %. Estos resultados muestran un desempeño funcional adecuado del sistema bajo las condiciones experimentales evaluadas y evidencian la capacidad de integrar detección local y monitoreo remoto mediante tecnologías IoT. Se concluye que el sistema desarrollado constituye una alternativa tecnológica para la detección temprana de gases inflamables y humo, con potencial de aplicación en diferentes entornos, cuya validación en condiciones reales deberá abordarse en trabajos futuros.***

Palabras clave-- Arduino; detección de gases; Internet de las Cosas (IoT); monitoreo remoto; sensor MQ-2; sistema de alerta temprana.

I. INTRODUCCIÓN

A. CONTEXTO Y PROBLEMÁTICA

En la actualidad, la detección temprana de gases inflamables y humo constituye una necesidad fundamental para la seguridad de las personas, la protección de bienes materiales y la prevención de accidentes en entornos residenciales, comerciales e industriales. Las fugas de gases combustibles como el gas licuado de petróleo (GLP), metano, propano y butano representan una de las principales causas de incendios, explosiones y afectaciones a la salud, especialmente en espacios donde se utilizan sistemas de combustión, cocinas, equipos industriales o instalaciones de almacenamiento de combustibles. En este contexto, la implementación de tecnologías de monitoreo continuo permite identificar situaciones de riesgo antes de que se conviertan en emergencias, contribuyendo a la reducción de pérdidas humanas y económicas [1].

Por otra parte, los avances tecnológicos en sensores de gases, sistemas embebidos e Internet de las Cosas (IoT) han permitido desarrollar soluciones cada vez más accesibles para el monitoreo ambiental en tiempo real. Los sensores de la serie MQ se han consolidado como una alternativa de bajo costo y alta sensibilidad para la detección de gases inflamables y humo, siendo ampliamente utilizados en aplicaciones de seguridad, automatización y monitoreo inteligente. Según Díaz Blasco et al. [1], los sensores MQ presentan capacidades adecuadas para la identificación de compuestos gaseosos en diferentes condiciones operativas, lo que los convierte en una opción viable para el desarrollo de sistemas de alerta temprana.

Asimismo, diversos estudios internacionales han demostrado la importancia de implementar tecnologías inteligentes para la detección y monitoreo de fugas de gases. Wang et al. [2] desarrollaron un sistema portátil para el monitoreo móvil de fugas de metano capaz de alcanzar un límite mínimo de detección de 94 ppb, con un tiempo de respuesta inferior a un segundo y una frecuencia de actualización de un segundo, logrando identificar exitosamente cinco puntos de fuga durante pruebas de campo realizadas en una red de distribución de gas natural. De manera similar, Sonkar et al. [3] emplearon vehículos aéreos no tripulados equipados con sensores y algoritmos de aprendizaje automático para detectar fugas de gas natural, obteniendo niveles de precisión superiores al 95 % en la identificación y estimación de concentraciones de metano. Estos avances reflejan la creciente necesidad de incorporar sistemas inteligentes capaces de proporcionar información precisa y oportuna para fortalecer la seguridad en distintos entornos.

Del mismo modo, la integración de plataformas de hardware libre como Arduino y tecnologías IoT ha impulsado el desarrollo de sistemas de monitoreo remoto con capacidad de comunicación en tiempo real. Alsayaydeh et al. [4] diseñaron un nodo inteligente de bajo costo basado en Arduino UNO, ESP8266 y sensor MQ-2 para la detección de humo y fugas de gas en entornos domésticos, validando experimentalmente la transmisión inalámbrica de datos y la generación automática de alertas mediante una aplicación móvil. Asimismo, Wang et al. [2] desarrollaron un sistema portátil para monitoreo móvil de fugas de metano con un límite mínimo de detección de 94 ppb

y un tiempo de respuesta inferior a un segundo, demostrando la capacidad de los sistemas inteligentes para proporcionar información inmediata en escenarios reales. Por su parte, Gao [8] destacó que la incorporación de microcontroladores y sistemas de monitoreo ambiental permite supervisar continuamente variables críticas del entorno y optimizar la respuesta ante situaciones de emergencia. Estas investigaciones evidencian que la convergencia entre IoT, sensores inteligentes y monitoreo móvil constituye una alternativa efectiva para fortalecer la seguridad preventiva en entornos residenciales, comerciales e industriales.

En el contexto peruano, el uso de gas licuado de petróleo y otros combustibles continúa siendo una práctica común en viviendas, establecimientos comerciales e industrias de pequeña y mediana escala. Esta realidad también se observa en la región Cajamarca, donde el Ministerio de Energía y Minas (MINEM) reportó aproximadamente 145 mil familias beneficiarias mensuales del programa Vale de Descuento GLP, reflejando la amplia utilización de este combustible en actividades domésticas y productivas. Asimismo, Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN) reportó más de 1,200 emergencias relacionadas con hidrocarburos y combustibles entre 2020 y 2025, evidenciando la necesidad de fortalecer los mecanismos de prevención y monitoreo de riesgos. Sin embargo, el incremento en el uso de combustibles inflamables también implica mayores riesgos asociados a fugas de gas, incendios y explosiones. En este sentido, OSINERGMIN ha identificado balones de GLP con fugas y deficiencias en sus condiciones de seguridad durante diversos operativos de supervisión, situación que evidencia la necesidad de fortalecer las medidas de prevención y monitoreo en estos entornos.

A pesar de los avances tecnológicos existentes, persiste una brecha en la disponibilidad de sistemas de monitoreo inteligentes que integren detección de gases, detección de humo, comunicación inalámbrica y notificaciones remotas en una solución económica y adaptable a múltiples entornos. Muchos sistemas comerciales presentan costos elevados o están diseñados para aplicaciones específicas, limitando su implementación en pequeñas empresas, establecimientos comerciales y viviendas. Ante esta problemática surge la siguiente pregunta de investigación: ¿De qué manera un sistema inteligente de alerta temprana basado en sensor MQ-2, Arduino y monitoreo móvil puede contribuir a la detección oportuna de gases inflamables y humo en entornos residenciales, comerciales e industriales?

Diversas investigaciones respaldan la viabilidad de esta propuesta tecnológica. Pérez-Palomino et al. [6] desarrollaron un sistema de vigilancia y detección de fugas de gas para viviendas utilizando Arduino y Raspberry Pi, obteniendo resultados satisfactorios en monitoreo remoto y generación de alertas. Asimismo, Al-Okby et al. [7] evaluaron sensores orientados a la detección de gases peligrosos mediante indicadores de calidad del aire y compuestos orgánicos volátiles, concluyendo que estos dispositivos constituyen herramientas efectivas para mejorar la seguridad ambiental y reducir la exposición a situaciones de riesgo. De igual manera, Sonkar et al. [3] demostraron que la aplicación de algoritmos de aprendizaje automático en sistemas de detección de fugas de gas puede alcanzar niveles de precisión superiores al 95 %, mejorando significativamente la identificación temprana de eventos peligrosos. Complementariamente, Jiang et al. [9] desarrollaron modelos predictivos basados en dinámica de fluidos computacional e inteligencia artificial para analizar la dispersión de fugas de gas natural, demostrando la capacidad de anticipar escenarios de riesgo y optimizar las estrategias de prevención. En conjunto, estos antecedentes evidencian la viabilidad técnica, científica y operativa del desarrollo de sistemas inteligentes de alerta temprana para la detección de gases y humo.

Por lo expuesto anteriormente, el objetivo general de la presente investigación es desarrollar y validar un sistema inteligente de alerta temprana para la detección de gases y humo en entornos residenciales, comerciales e industriales mediante el uso del sensor MQ-2, una plataforma Arduino y una aplicación móvil para monitoreo y alertas en tiempo real. De manera específica, se busca diseñar la arquitectura del sistema, implementar el prototipo electrónico, desarrollar el monitoreo móvil, evaluar el desempeño mediante pruebas experimentales y determinar la viabilidad de la solución como alternativa tecnológica de bajo costo para la prevención de riesgos asociados a fugas de gases e incendios.

La principal contribución de esta investigación radica en el desarrollo y validación experimental de un sistema inteligente de alerta temprana de bajo costo que integra la detección de gases inflamables y humo mediante sensor MQ-2, procesamiento de datos mediante Arduino y monitoreo remoto a través de una aplicación móvil. Esta propuesta busca proporcionar una solución accesible, escalable y adaptable para entornos residenciales, comerciales e industriales, contribuyendo a la prevención de accidentes, la reducción de riesgos operacionales y el fortalecimiento de la seguridad mediante tecnologías IoT aplicadas al monitoreo en tiempo real.

B. TRABAJOS RELACIONADOS

Diversas investigaciones han desarrollado sistemas inteligentes orientados a la detección y monitoreo de fugas de gases mediante sensores, plataformas embebidas y tecnologías de comunicación. Wang et al. [2] desarrollaron un sistema portátil para el monitoreo móvil de fugas de metano, alcanzando un límite mínimo de detección de 94 ppb y un tiempo de respuesta inferior a un segundo. El sistema permitió identificar puntos de fuga durante pruebas de campo en una red de distribución de gas natural, evidenciando la utilidad del monitoreo portátil para la detección oportuna de eventos asociados a fugas de combustible.

De manera complementaria, Sonkar et al. [3] emplearon vehículos aéreos no tripulados equipados con sensores y algoritmos de aprendizaje automático para la detección y estimación de fugas de gas natural. Los autores reportaron niveles de precisión superiores al 95 % en la identificación y estimación de concentraciones de metano, mostrando el potencial de la integración entre sensores y técnicas computacionales para mejorar la detección de eventos peligrosos.

En aplicaciones orientadas al monitoreo doméstico, Alsayaydeh et al. [4] desarrollaron un nodo inteligente de bajo costo basado en Arduino UNO, ESP8266 y el sensor MQ-2 para la detección de humo y fugas de gas. El sistema incorporó comunicación inalámbrica y generación automática de alertas mediante una aplicación móvil, evidenciando la viabilidad de integrar sensores MQ-2, plataformas de hardware libre y tecnologías IoT para aplicaciones de seguridad.

Asimismo, Patchmuthu et al. [5] abordaron la detección de fugas de gas licuado de petróleo mediante una solución basada en IoT y una aplicación móvil. Este trabajo evidencia la aplicación de tecnologías de comunicación y monitoreo remoto para complementar la detección local de fugas y facilitar la notificación de eventos de riesgo.

En el ámbito de la vigilancia de viviendas, Pérez-Palomino et al. [6] desarrollaron un sistema de bajo costo para la detección y supervisión de fugas de gas en viviendas unifamiliares mediante la integración de Arduino y Raspberry Pi, incorporando mecanismos de monitoreo remoto y generación de alertas. Por otra parte, Al-Okby et al. [7] evaluaron sensores basados en indicadores de calidad del aire y compuestos orgánicos volátiles para la detección y generación de alarmas frente a gases peligrosos, resaltando la utilidad de estos dispositivos para fortalecer la seguridad ambiental.

Desde una perspectiva de monitoreo ambiental, Gao [8] analizó un sistema inteligente basado en microcontroladores para el monitoreo y control de variables ambientales, destacando la capacidad de las plataformas embebidas para realizar supervisión continua y apoyar la respuesta ante condiciones anómalas. De manera complementaria, Jiang et al. [9] desarrollaron modelos basados en dinámica de fluidos computacional y redes neuronales para analizar la dispersión de fugas de gas natural y predecir tasas de fuga, demostrando el potencial de las técnicas computacionales para anticipar escenarios de riesgo.

En conjunto, los trabajos revisados muestran diferentes aproximaciones para la detección de gases y humo, incluyendo sensores MQ, plataformas Arduino, comunicación inalámbrica, aplicaciones móviles, aprendizaje automático y modelos predictivos. Sin embargo, los antecedentes analizados abordan de manera diferenciada estas tecnologías y aplicaciones, lo que evidencia la pertinencia de desarrollar una solución que integre en un mismo sistema la detección de gases y humo mediante el sensor MQ-2, el procesamiento con Arduino y el monitoreo remoto mediante una aplicación móvil.

C. BRECHA DE INVESTIGACIÓN, OBJETIVO Y CONTRIBUCIÓN

Brecha de investigación. A partir de la revisión de los trabajos relacionados, se identifica una brecha asociada a la integración de mecanismos de detección de gases y humo, procesamiento mediante plataformas de hardware libre, comunicación inalámbrica y notificaciones remotas dentro de una solución adaptable a diferentes entornos. Los estudios revisados han demostrado la viabilidad de sensores, plataformas Arduino, tecnologías IoT, aplicaciones móviles y métodos computacionales para la detección y monitoreo de gases; sin embargo, estas tecnologías han sido abordadas desde diferentes enfoques y aplicaciones. En este sentido, se plantea la necesidad de evaluar una solución integrada que combine el sensor MQ-2, Arduino y monitoreo móvil para proporcionar una respuesta oportuna ante la presencia de gases inflamables y humo.

Pregunta de investigación. En función de la brecha identificada, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿De qué manera un sistema inteligente de alerta temprana basado en sensor MQ-2, Arduino y monitoreo móvil puede contribuir a la detección oportuna de gases inflamables y humo en entornos residenciales, comerciales e industriales? Esta pregunta orienta la evaluación experimental del desempeño del sistema mediante indicadores relacionados con el tiempo de respuesta, la precisión de detección, la activación de alertas y la disponibilidad del monitoreo móvil.

Objetivo general y objetivos específicos. El objetivo general de la investigación es desarrollar y validar un sistema inteligente de alerta temprana para la detección de gases y humo en entornos residenciales, comerciales e industriales mediante el uso del sensor MQ-2, una plataforma Arduino y una aplicación móvil para monitoreo y alertas en tiempo real. Para alcanzar este propósito, se plantearon los siguientes objetivos específicos: **i)** diseñar la arquitectura del sistema; **ii)** implementar el prototipo electrónico; **iii)** desarrollar el sistema de monitoreo móvil; **iv)** evaluar el desempeño del sistema mediante pruebas experimentales; y **v)** determinar la viabilidad de la solución como alternativa tecnológica de bajo costo para la prevención de riesgos asociados a fugas de gases e incendios.

Contribución del estudio. La principal contribución de esta investigación consiste en el desarrollo y validación experimental de un sistema inteligente de alerta temprana que integra la detección de gases inflamables y humo mediante el sensor MQ-2, el procesamiento de datos mediante Arduino y el monitoreo remoto a través de una aplicación móvil. La propuesta busca proporcionar una solución accesible, escalable y adaptable para entornos residenciales, comerciales e industriales, orientada a fortalecer la prevención de accidentes

y la seguridad mediante tecnologías IoT aplicadas al monitoreo en tiempo real.

Organización del artículo. El resto de este artículo se encuentra organizado de la siguiente manera: la Sección II detalla la metodología de diseño preexperimental y la arquitectura de hardware empleada; la Sección III presenta los resultados de las pruebas funcionales de detección; la Sección IV discute los hallazgos frente al estado del arte; y finalmente, la Sección V expone las conclusiones extraídas.

II. METODOLOGÍA

A. Contexto de la Investigación

La presente investigación se desarrolló en el contexto de la seguridad en entornos residenciales, comerciales e industriales de la región Cajamarca, Perú, donde el uso de gases combustibles y equipos generadores de calor constituye un factor potencial de riesgo asociado a fugas de gas, acumulación de humo e incidentes por incendio. Debido a la ausencia de sistemas inteligentes de monitoreo continuo en diversos entornos, se planteó el desarrollo de un sistema de detección y alerta temprana basado en tecnologías de bajo costo y monitoreo en tiempo real.

El estudio estaba orientado al diseño, implementación y evaluación de un prototipo inteligente utilizando sensores MQ-2, una plataforma Arduino y una aplicación móvil para supervisión remota.

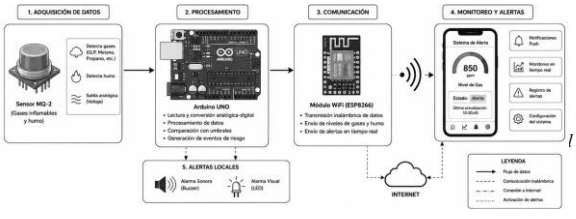
B. Diseño de Investigación

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, debido a que se realizaron mediciones objetivas de las variables relacionadas con la detección de gases inflamables y humo, permitiendo evaluar el desempeño del sistema mediante datos obtenidos durante las pruebas experimentales. Asimismo, corresponde a una investigación aplicada, ya que estuvo orientada al desarrollo de una solución tecnológica para atender una problemática relacionada con la seguridad en entornos residenciales, comerciales e industriales.

El diseño de investigación fue preexperimental, debido a que se implementó y evaluó un prototipo funcional basado en el sensor MQ-2, una placa Arduino UNO y una aplicación móvil para monitoreo remoto.

El estudio comprendió las etapas de diseño, tal como se muestra en la Figura 1: construcción, programación, integración y validación experimental del sistema:

Fig. 1 Flujo de diseño preexperimental del sistema



C. Población y Muestra

La población de estudio estuvo conformada por entornos potenciales de detección de gases inflamables y humo que pueden presentarse en ambitos residenciales, comerciales e industriales donde exista riesgo de fugas de gas o generación de humo por procesos de combustión.

La muestra estuvo constituida por 30 pruebas experimentales controladas realizadas al prototipo desarrollado. Estas pruebas permitieron evaluar la capacidad de detección del sensor MQ-2, el tiempo de respuesta del sistema, la activación de alertas y la transmisión de información hacia la aplicación móvil bajo diferentes condiciones de exposición a gases inflamables y humo.

D. Materiales y Herramientas

Para el desarrollo del sistema inteligente de alerta temprana se emplearon los siguientes materiales y herramientas:

Materiales

- Sensor MQ-2 para detección de gases inflamables y humo.
- Placa Arduino UNO como unidad de procesamiento.
- Buzzer para alarma sonora.
- Diodos LED para señalización visual.
- Protoboard y cables de conexión.
- Fuente de alimentación de 9 V.
- Dispositivo móvil con sistema operativo Android.

Herramientas

- Arduino IDE para la programación del microcontrolador.
- Aplicación móvil para monitoreo y recepción de alertas.
- Microsoft Excel para el registro y procesamiento de datos experimentales.
- Software de diseño electrónico para la elaboración del esquema de conexión del sistema.

E. Procedimiento Metodológico

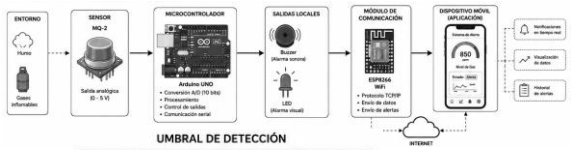
La metodología de desarrollo del sistema se ejecutó en cinco etapas:

- ✓ *Etapa 1:* Diseño del sistema

Se definió la arquitectura general del sistema, estableciendo los componentes de adquisición de datos, procesamiento, comunicación y monitoreo, tal como se ilustra en la Figura 2. Asimismo, se determinaron los umbrales de detección y las estrategias de alerta para eventos de riesgo.

Fig. 2 Arquitectura general del sistema inteligente de alerta temprana para la detección de gases inflamables y humo mediante sensor MQ-2, Arduino UNO y monitoreo móvil.

En la Figura 3 se presenta el diagrama de bloques de hardware del sistema, donde el sensor MQ-2 capta la concentración de gases y humo, el Arduino UNO procesa la señal, y según el nivel de riesgo (bajo, medio o alto) se activan las alertas locales (buzzer y LED) y la transmisión de datos hacia la aplicación móvil.



UMBRAL DE DETECCIÓN

NIVEL	CONCENTRACIÓN	RIESGO	ACCIÓN
BAJO	< 300 ppm	Bajo	Sin alerta
MEDIO	300 – 1000 ppm	Moderado	Alerta visual
ALTO	> 1000 ppm	Alto	Alerta sonora y visual

Fig. 3 Diagrama de bloques de hardware del sistema inteligente de alerta temprana para la detección de gases inflamables y humo.

✓ *Etapa 2:* Implementación del prototipo

Se realizó el ensamblaje físico de los componentes electrónicos, integrando el sensor MQ-2, la placa Arduino UNO y los dispositivos de alerta visual y sonora, tal como se observa en la Figura 4.

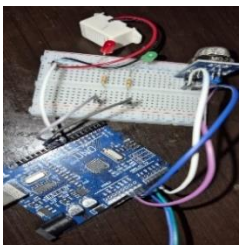
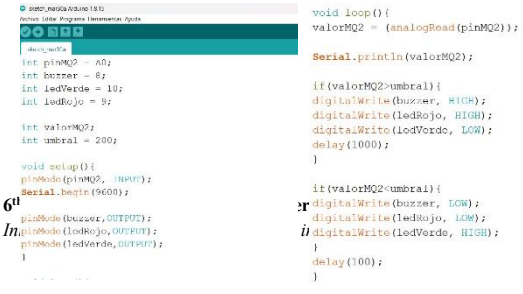


Fig. 4 Ensamblaje físico de los componentes electrónicos del prototipo (sensor MQ-2, Arduino UNO y sistema de alerta).

✓ *Etapa 3:* Programación e integración

Se desarrolló el algoritmo de control encargado de realizar la lectura continua de los niveles de gases y humo detectados por el sensor MQ-2. Asimismo, se implementó la comunicación entre Arduino y la aplicación móvil para la transmisión de datos y generación de alertas en tiempo real, como se observa en la Figura 5.



```
int pinMQ2 = A0;
int buzzer = 8;
int ledVerde = 10;
int ledRojo = 9;

int valorMQ2;
int umbral = 200;

void setup(){
pinMode(pinMQ2, INPUT);
Serial.begin(9600);
pinMode(buzzer,OUTPUT);
pinMode(ledRojo,OUTPUT);
pinMode(ledVerde,OUTPUT);
}

void loop(){
valorMQ2 = (analogRead(pinMQ2));

Serial.println(valorMQ2);

if(valorMQ2>umbral){
digitalWrite(buzzer, HIGH);
digitalWrite(ledRojo, HIGH);
digitalWrite(ledVerde, LOW);
delay(1000);
}

if(valorMQ2<umbral){
digitalWrite(buzzer, LOW);
digitalWrite(ledRojo, LOW);
digitalWrite(ledVerde, HIGH);
}
delay(100);
}
```

Fig. 5 Algoritmo de programación para la lectura del sensor MQ-2 y activación de alertas.

✓ *Etapa 4:* Validación experimental

El sistema fue sometido a 30 pruebas experimentales controladas bajo diferentes condiciones de exposición a gases inflamables y humo, tal como se muestra en la Figura 6.

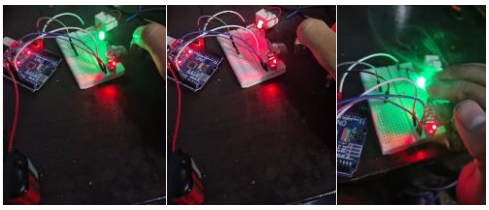


Fig. 6 Ejecución de pruebas experimentales de detección de gases inflamables y humo.

✓ *Etapa 5:* Análisis de resultados

Los datos obtenidos durante las pruebas fueron organizados y procesados para evaluar el desempeño del sistema. Finalmente, se analizaron los indicadores establecidos con el propósito de determinar la viabilidad de la solución propuesta para aplicaciones de monitoreo y alerta temprana, tal como se observa en la Figura 7.



Fig. 7 Interfaz de la aplicación móvil SmokeGuard mostrando el análisis de resultados del sistema.

F. Análisis Estadístico

Los resultados obtenidos durante las pruebas experimentales fueron analizados mediante estadística descriptiva. Para evaluar el desempeño del sistema se emplearon los siguientes indicadores:

➢ **Tiempo promedio de respuesta (TPR)**

Se utilizó para determinar el tiempo promedio transcurrido entre la detección del evento y la activación de la alerta.

I

$$TPR = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i}{n}$$

TPR = tiempo promedio de respuesta.
t_i = tiempo registrado en cada prueba.
n = número total de pruebas realizadas.

- **Precisión de detección (PD)**

Permitió evaluar la capacidad del sistema para identificar correctamente eventos de presencia de gases y humo.

$$PD = \frac{NDC}{NTP} \times 100$$

Donde: PD = precisión de detección (%).
NDC = número de detecciones correctas.
NTP = número total de pruebas.

- **Tasa de activación de alertas (TAA)**

Se utilizó para medir la efectividad del sistema en la generación de alertas cuando se detectaron condiciones de riesgo.

$$TAA = \frac{NAA}{NTP} \times 100$$

Donde: TAA = tasa de activación de alertas (%).
NAA = número de alertas activadas correctamente.
NTP = número total de pruebas realizadas.

III. RESULTADOS

A. Resultados de las pruebas de detección:

Se realizaron 30 pruebas experimentales para evaluar el desempeño del sistema inteligente de alerta temprana. Los resultados se presentan en la Tabla I, donde se registró la detección de gases inflamables o humo mediante el sensor MQ-2 y la posterior activación de las alertas correspondientes. Los tiempos de respuesta obtenidos oscilaron entre 1.7 s y 2.8 s.

TABLA I

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE DETECCIÓN

Prueba	Gas/Humo Detectado	Tiempo de Respuesta (s)	Alerta Local	Alerta Móvil
1	Sí	2.2	Sí	Sí
2	Sí	1.9	Sí	Sí
3	Sí	2.2	Sí	Sí
4	Sí	1.7	Sí	Sí
5	Sí	2.2	Sí	Sí
6	Sí	2.7	Sí	Sí
7	Sí	2.6	Sí	Sí
8	Sí	2.3	Sí	Sí
9	Sí	2.1	Sí	Sí
10	Sí	2.2	Sí	Sí
11	Sí	2.8	Sí	Sí
12	Sí	1.7	Sí	Sí
13	Sí	2.0	Sí	Sí
14	Sí	2.1	Sí	Sí
15	Sí	1.8	Sí	Sí
16	Sí	2.1	Sí	Sí
17	Sí	2.8	Sí	Sí
18	Sí	2.4	Sí	Sí
19	Sí	2.6	Sí	Sí
20	Sí	1.7	Sí	Sí
21	Sí	2.4	Sí	Sí
22	Sí	2.6	Sí	Sí
23	Sí	2.3	Sí	Sí
24	Sí	1.9	Sí	Sí
25	Sí	1.7	Sí	Sí
26	Sí	2.3	Sí	Sí
27	Sí	1.9	Sí	Sí
28	Sí	2.8	Sí	Sí
29	Sí	1.7	Sí	Sí
30	Sí	1.7	Sí	Sí

B. Tiempo de respuesta del sistema

El tiempo promedio de respuesta registrado durante las pruebas fue de 2.1s, como se detalla en la Tabla II. Asimismo, se observó un tiempo mínimo de 1.7 s y un tiempo máximo de 2.8 s.

TABLA II

ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DEL TIEMPO DE RESPUESTA

Indicador	Valor
Número de pruebas	30
Tiempo promedio	2.1 s
Tiempo mínimo	1.7 s
Tiempo máximo	2.8 s
Desviación estándar	0.29 s

A. Precisión de detección

De las 30 pruebas realizadas, el sistema identificó correctamente 29 eventos asociados a la presencia de gases inflamables y humo, registrándose una precisión de detección de 96.7 %, tal como se muestra en la Tabla III.

TABLA III

RESULTADOS DE DETECCIÓN DEL SISTEMA

Indicador	Valor
Pruebas realizadas	30
Detecciones correctas	29
Detecciones incorrectas	1
Precisión	96.70%

B. Activación de alertas

Durante las pruebas experimentales se registró una activación correcta de las alertas locales en la totalidad de los ensayos realizados, tal como se muestra en la Tabla IV. Asimismo, las notificaciones enviadas hacia la aplicación móvil alcanzaron una efectividad del 96.7 %.

TABLA IV

RESULTADOS DE ACTIVACIÓN DE ALERTAS

Indicador	Valor
Alertas locales activadas correctamente	30
Alertas móviles enviadas correctamente	29
Tasa de activación local	100%
Tasa de activación móvil	96.70%

C. Monitoreo móvil

El sistema transmitió correctamente la mayor parte de los registros generados durante las pruebas experimentales, como se detalla en la Tabla V. La disponibilidad del monitoreo móvil alcanzó el 98.3 %, observándose una pérdida mínima de datos durante la comunicación.

TABLA V

TRANSMISIÓN DE DATOS HACIA LA APLICACIÓN MÓVIL

Indicador	Valor
Datos transmitidos correctamente	295
Datos perdidos	5
Disponibilidad	98.30%

DISCUCIÓN

En estudios previos relacionados con el desarrollo de sistemas inteligentes para la detección de gases inflamables y humo, los resultados destacan la importancia de integrar sensores, como lo señala Díaz Blasco et al. [1], junto con plataformas de hardware libre y tecnologías de monitoreo remoto para fortalecer la seguridad en diferentes entornos. Estas investigaciones evidencian que los sistemas de alerta temprana permiten identificar condiciones de riesgo y generar respuestas oportunas mediante dispositivos móviles, reduciendo la probabilidad de incidentes. De acuerdo con Wang et al. [2] y Sonkar et al. [3], la implementación de estas tecnologías mejora la capacidad de detección y el monitoreo en tiempo real.

A diferencia de otros sistemas orientados a aplicaciones específicas y con mayores costos de implementación, el sistema desarrollado alcanzó un tiempo promedio de respuesta de 2.1 segundos, una precisión de detección del 96.7 % y una activación correcta de las alertas locales durante las pruebas realizadas. Estos resultados coinciden con lo reportado por Pérez-Palomino et al. [6], quienes concluyeron que la integración de plataformas Arduino con sistemas de monitoreo remoto constituye una alternativa confiable para mejorar la seguridad mediante alertas automáticas y supervisión continua.

Del mismo modo, la incorporación del sensor MQ-2, la plataforma Arduino y la aplicación móvil permitió establecer un sistema de monitoreo continuo con transmisión oportuna de información ante condiciones de riesgo. La solución propuesta presentó una elevada disponibilidad del monitoreo móvil, resultados similares a los obtenidos por Alsayaydeh et al. [4] y Patchmuthu et al. [5], quienes demostraron que la integración de tecnologías IoT fortalece la supervisión remota y mejora la interacción entre el usuario y el sistema.

Por otro lado, los sistemas inteligentes de detección de gases y humo pueden implementarse en viviendas, establecimientos comerciales, laboratorios e instalaciones industriales donde exista riesgo por combustibles inflamables. Asimismo, la incorporación de sensores ambientales y sistemas de comunicación inalámbrica fortalece las estrategias de prevención de accidentes, tal como señalan Gao [8], Jiang et al. [9] y Wang et al. [10], quienes destacan el aporte de las tecnologías inteligentes en la gestión de riesgos.

Finalmente, la implementación de estos sistemas aún presenta desafíos relacionados con la sensibilidad del sensor, la necesidad de calibraciones periódicas y la dependencia de la conectividad para el envío de alertas. Estas limitaciones podrían mitigarse mediante sensores especializados, algoritmos de

inteligencia artificial y plataformas IoT con mayor capacidad de procesamiento, favoreciendo el desarrollo de sistemas de alerta temprana más robustos, precisos y adaptables a diferentes entornos.

IV. CONCLUCIONES

Se logró diseñar e implementar un sistema inteligente de alerta temprana para la detección de gases inflamables y humo mediante la integración del sensor MQ-2, la plataforma Arduino y una aplicación móvil de monitoreo. La arquitectura desarrollada permitió detectar oportunamente condiciones de riesgo y generar alertas locales y remotas, constituyendo una solución tecnológica funcional para fortalecer la seguridad en diferentes entornos.

Los resultados obtenidos evidenciaron un desempeño satisfactorio del sistema, alcanzando un tiempo promedio de respuesta de 2.1 segundos, una precisión de detección del 96.7 %, una activación correcta de las alertas locales del 100 % y una disponibilidad del monitoreo móvil del 98.3 %. Estos indicadores demuestran la confiabilidad del prototipo para la detección temprana de eventos asociados a gases inflamables y humo, permitiendo cumplir con los objetivos planteados en la investigación. No obstante, el tiempo de respuesta podría optimizarse mediante la reducción del tiempo de mu estreo del sensor MQ-2 o el uso de un microcontrolador con mayor velocidad de procesamiento, mientras que la precisión de detección podría incrementarse aplicando técnicas de filtrado de señal o calibración periódica del sensor para minimizar falsos negativos.

Las pruebas experimentales confirmaron la estabilidad del sistema y la efectividad de la comunicación entre el dispositivo y la aplicación móvil, favoreciendo el monitoreo continuo y la notificación oportuna de condiciones de riesgo. Con ello, se confirma que el sistema propuesto permite detectar tempranamente gases inflamables y humo, y generar alertas confiables, respondiendo así a la pregunta de investigación planteada. En consecuencia, la solución propuesta representa una alternativa de bajo costo, escalable y adaptable para aplicaciones residenciales, comerciales e industriales, contribuyendo a fortalecer la prevención de accidentes.

REFERENCIAS

[1] Diaz Blasco, F. J., Viciano-Tudela, S., Parra, L., Ahmad, A., Chaloupková, V., Bados, R., Esteban Pascual, L. S., Mediavilla, I., Sendra, S., & Lloret, J. (2024). Employment of MQ gas sensors for the classification of Cistus ladanifer essential oils. *Microchemical Journal, Devoted to the Application of Microtechniques in All Branches of Science*, *206*(111585), 111585. https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.111585

[2] Wang, G., Cui, R., Di, J., Wang, J., Wang, Y., Shang, Z., Liu, X., Tian, Q., Wu, H., & Dong, L. (2025). Portable methane sensor system using miniature multi-pass cell for mobile monitoring of natural gas leaks. Sensors and Actuators. B, Chemical, 431(137457), 137457. https://doi.org/10.1016/j.snb.2025.137457

[3] Sonkar, S. K., Kumar, P., George, R. C., Philip, D., & Ghosh, A. K. (2022). Detection and estimation of natural gas leakage using UAV by machine learning algorithms. IEEE Sensors Journal, 22(8), 8041–8049. https://doi.org/10.1109/jsen.2022.3157872

[4] Alsayaydeh, J. A. J., Irianto, Al-Hilali, A., Nasir, H. B. M., Duhair, H. T. M., & Herawan, S. G. (2026). Low-cost IoT smart-home node for motion and gas leakage monitoring with arduino and ESP8266. International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements, 14(1), 1–16. https://doi.org/10.56578/ijcmem140101

[5] Patchmuthu, R. K., Wan, A. T., & Yaya, M. H. M. (2023). Smart LPG usage and leakage detection using IoT and mobile application. International Journal of Systems Control and Communications, 14(1), 1. https://doi.org/10.1504/ijscc.2023.127491

[6] Pérez-Palomino, X., Rosas-Paredes, K., & Esquicha-Tejada, J. (2022). Low-cost gas leak detection and surveillance system for single family homes using Wit.Ai, Raspberry pi and Arduino. International Journal of Interactive Mobile Technologies (iJIM), 16(09), 206–216. https://doi.org/10.3991/ijim.v16i09.30177

[7] Al-Okby, M. F. R., Neubert, S., Roddelkopf, T., Fleischer, H., & Thurow, K. (2022). Evaluating of IAQ-index and TVOC parameter-based sensors for hazardous gases detection and alarming systems. Sensors (Basel, Switzerland), 22(4), 1473. https://doi.org/10.3390/s22041473

[8] Gao, R. (2025). A comparative study of an STM32F103C8T6-based FreeRTOS smart home system for environmental monitoring and control. Informatica. An International Journal of Computing and Informatics, 49(24). https://doi.org/10.31449/inf.v49i24.11427

[9] Jiang, X., Lu, H., Xia, Z., Shan, Z.-W., Xiang, Y., & Cheng, Y. F. (2025). Above-ground natural gas riser leak dispersion and leakage rate prediction based on CFD and BPNN approaches. Process Safety and Environmental Protection : Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part B, 203(107854), 107854. https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.107854

[10] Wang, X., Hong, Y., Wu, G., Hou, Y., Zhao, S., Dong, B., Fan, J., & Yu, J. (2026). MOF-derived Co3O4 dodecahedrons with abundant active Co3+ for CH4 gas sensing at room temperature. Micromachines, 17(2), 247. https://doi.org/10.3390/mi17020247