

# Mobile robotic platform IoT-based for LP gas detection

Ángel J. Barajas Cortes, Techn<sup>1</sup>, Ernesto Monroy Cruz<sup>2</sup>, PhD<sup>2</sup>, Abel García Barrientos<sup>3</sup>, PhD<sup>3</sup>, Natanaeli Pérez Jiménez, Tech<sup>1</sup>, Mitzi X. Hernández Almaraz, Techn<sup>1</sup>, Alberto Marroquín<sup>4</sup>, MSc<sup>4</sup>, Alejandro Martínez Flores, MSc<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>CETIS No. 026, Atitalaquia, Hgo. México; {ajbarcor, nperjim, mxheralm}@cetis26.edu.mx

<sup>2</sup>Tecnológico Nacional de México/ Campus Atitalaquia, México; ernesto.mz@atitalaquia.tecnm.mx, alexander\_mtz\_flores@hotmail.com

<sup>3</sup>Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México; abel.garcia@uaslp.mx

<sup>4</sup>Universidad Don Bosco, El Salvador; alberto.marroquin@udb.edu.sv

*The Internet of Things (IoT) is a revolutionary technological paradigm that has enabled communication with many devices over the Internet. This article presents the design through the V-type methodology of a low-cost mobile robot that uses IoT platforms and various sensors that allow it to autonomously navigate controlled environments in which at the same time it can detect the existence of liquefied petroleum (LP) gas leaks. As a result, on the one hand, the cloud platform allows storing the data of the LP gas sensor and the global positioning system (GPS) sensor for the robot location, as well as the transmission of commands between the server and the vehicle using a mobile application. On the other hand, the robot has a camera that allows to obtain video in real time and monitor the inspection environment remotely. Some tests were carried out in domestic areas and academic laboratories, allowed to validate the functionality of the obtained platform.*

**Keywords:** *IoT, mobile robot, autonomous systems, gas detection.*

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LACCEI).

**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).

**DO NOT REMOVE**

# Plataforma robótica móvil para la detección de gas LP basado en IoT

Ángel J. Barajas Cortes, Techn<sup>1</sup>, Ernesto Monroy Cruz<sup>2</sup>, PhD<sup>2</sup>, Abel García Barrientos<sup>3</sup>, PhD<sup>3</sup>, Natanaeli Pérez Jiménez, Tech<sup>1</sup>, Mitzí X. Hernández Almaraz, Techn<sup>1</sup>, Alberto Marroquín<sup>4</sup>, MSc<sup>4</sup>, Alejandro Martínez Flores, MSc<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CETIS No. 026, Atitalaquia, Hgo. México; {ajbarcor, nperjim, mxheralm}@cetis26.edu.mx

<sup>2</sup>Tecnológico Nacional de México/ Campus Atitalaquia, México; ernesto.mz@atitalaquia.tecnm.mx, alexander\_mtz\_flores@hotmail.com

<sup>3</sup>Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México; abel.garcia@uaslp.mx

<sup>4</sup>Universidad Don Bosco, El Salvador; alberto.marroquin@udb.edu.sv

*El Internet de las cosas (IoT) es un paradigma tecnológico revolucionario que ha permitido la comunicación con una gran cantidad de dispositivos a través de Internet. Este artículo presenta el diseño mediante la metodología tipo V de un robot móvil de bajo costo que utiliza plataformas IoT y diversos sensores que le permiten navegar de forma autónoma entornos controlados en los que al mismo tiempo puede detectar la existencia de fugas de gas licuado de petróleo (gas LP). Como resultado, por una parte, la plataforma en la nube permite almacenar los datos del sensor de gas LP y del sensor del sistema de posicionamiento global (GPS) para la ubicación del robot, así como la transmisión de comandos entre el servidor y el vehículo mediante el uso de una aplicación móvil. Por otra parte, el robot cuenta con una cámara que permite obtener video en tiempo real y monitorear el ambiente de inspección de manera remota. Una serie de pruebas realizadas en áreas de tipo doméstico y de laboratorio académico, permitieron validar la funcionalidad de la plataforma obtenida.*

**Palabras clave:** IoT, Robot móvil, Sistemas autónomos, Detección de gas.

## I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas autónomos se han incrementado en la última década debido al surgimiento de las tecnologías emergentes que abarca la industria 4.0 (I4.0) [1]. Uno de los pilares de la cuarta revolución industrial es la robótica móvil, su principal objetivo es crear máquinas automatizadas no estáticas que cumplan una tarea de forma automática, o que traten de simular las conductas del ser humano [2]. Estos robots deben diseñarse de acuerdo a la tarea que van a realizar y al entorno en el que se van a desempeñar. A partir de esto, los vehículos robóticos pueden tener la capacidad de desenvolverse en ambientes estáticos o dinámicos [3]. Por un lado, los robots tele operados son aquellos controlados por un usuario a distancia desde una estación remota. Por otro lado, los robots autónomos tienen la aplicabilidad y capacidad de poder ejecutar actividades y tareas sin la necesidad de algún tipo de comando y control directamente explícito de los humanos [4].

Otro de los pilares de la I4.0 es el internet de las cosas (IoT - Internet of Things). El IoT son aquellos softwares que conectan el hardware, puntos de acceso y redes de datos a las aplicaciones de las cuales disfruta el usuario [5]. Actualmente, el IoT representa un mundo complejo donde hay mucho interés por parte de la comunidad científica. Y dentro de este paradigma, las plataformas IoT son clave para el desarrollo de

aplicaciones, software y servicios para la interconexión de personas y “cosas”. De acuerdo a lo anterior, el impulso en el uso de robots móviles autónomos se expresa en la necesidad de combinarlos con disciplinas como el IoT para extender el campo de aplicaciones de la robótica [6], generando ventajas desde el punto de vista de la protección y seguridad del usuario. Gracias a esa combinación de tecnologías, es posible que los robots equipados con diversos sensores [7], [8] realicen trabajos en ambientes inseguros, inestables o con sustancias potencialmente peligrosas, como químicos o explosivos, para no arriesgar la integridad física del operador [9]. Además, las nuevas tecnologías basadas en IoT están teniendo un crecimiento exponencial.

El gas licuado de petróleo o “Gas LP” es un producto químico muy inflamable y ocupado en diversas actividades rutinarias. Ante estas características, algunos trabajos han mostrado interés en los robots móviles para la detección fugas de gas LP. Por ejemplo, en la ref. [10] se desarrolló un robot móvil autónomo como detector de gas LP. Sin embargo, la interfaz utiliza Bluetooth para comunicarse con el vehículo, lo cual limita el alcance de conexión al momento de explorar y enviar información. Además, tener un robot estático es una limitante para este tipo de aplicaciones, tal como se observa en la ref. [11]. El trabajo desarrollado en la ref. [12] muestra un prototipo de robot móvil para rastrear fuentes de gas y avisar al momento de detectar, solo que, en este punto, al usuario no le es posible monitorear y conocer la ubicación de la fuente detectada. En cuanto a lo reportado en [13] el robot solo activa una alarma de tipo zumbador cuando detecta fuga de gas LP por lo que no es posible conocer el punto de la fuga de forma remota. Ante las limitantes descritas en los trabajos relacionados, este artículo se orienta en la siguiente pregunta de investigación: *¿Cómo diseñar un robot móvil de bajo costo basado en tecnologías IoT que sea capaz de detectar fugas de gas LP en ambientes controlados?*

El resto del manuscrito se organiza de la siguiente manera, en la Sección II se presenta la descripción de cada uno de los pasos de la metodología tipo V aplicada para el desarrollo para la plataforma. La Sección III aborda los resultados experimentales de la plataforma para validar su funcionalidad. Finalmente, la Sección IV indica la conclusión a la que se llega en el proyecto y el camino a seguir como trabajo futuro con la plataforma.

## II. METODOLOGÍA DE DESARROLLO

Para el diseño y desarrollo del robot móvil se utilizó la metodología tipo V [14], ver Fig. 1. Esta consiste en etapas, donde se define la funcionalidad del sistema, los subsistemas que lo conforman, así como su integración y la validación de funcionalidad. En este apartado se describen cada una de las etapas realizadas para la obtención de la plataforma IoT.

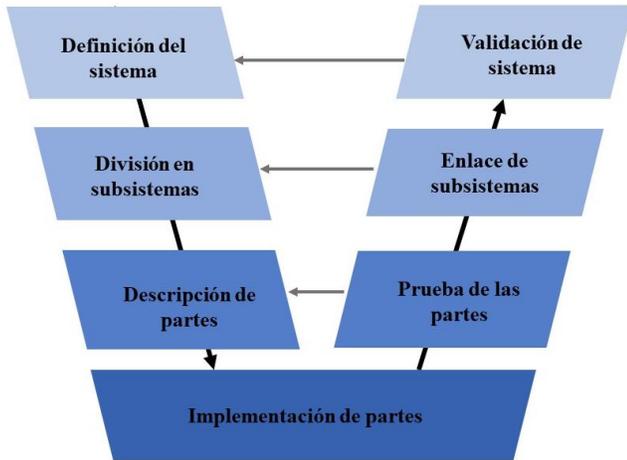


Fig. 1. Metodología tipo V para el desarrollo de la plataforma

### A. Definición del sistema

Como primera fase se especifican los requerimientos de funcionalidad del sistema, la Fig. 2 muestra las características que debe tener la plataforma robótica, entre ellas se encuentra el monitoreo y comunicación de datos a través de una plataforma IoT así como su construcción mediante componentes de bajo costo.

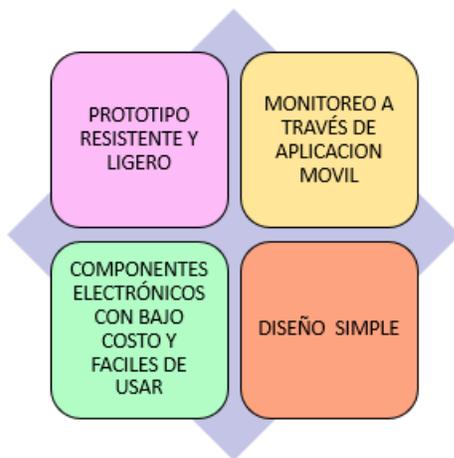


Fig. 2. Esquema de requisitos

Con respecto a la funcionalidad, el vehículo debe ser capaz de recorrer sistemáticamente un espacio de trabajo estático, considerando evasión de obstáculos. La propuesta tiene que considerar equipar el robot con un sistema de

posicionamiento global (GPS) para enviar en tiempo real las coordenadas de latitud y longitud al momento de que el sensor de gas LP detecte el nivel especificado de fuga. Además, el robot tendrá una cámara para mostrar video vía Lenguaje de Marcas de Hipertexto (HTML- HyperText Markup Language) y monitorear de manera remota el entorno que se está explorando. Así, los datos que envía el microcontrolador se deben visualizar desde una aplicación IoT. Finalmente, esta información tiene que ser almacenada en una base de datos en la nube.

### B. División en subsistemas

La plataforma general se basa en el conjunto de dos subsistemas; uno de hardware y otro de software. Cada uno de ellos está compuesto por elementos propios del área para lograr su funcionalidad en conjunto.

- 1) *Hardware*: se compone del conjunto de sensores que envían datos al microcontrolador NodeMCU-32 ESP como controlador principal y que, mediante la lógica de control implementada a partir del software, el microcontrolador tiene dominio sobre los actuadores.
- 2) *Software*: se basa en el desarrollo de la lógica de control del robot móvil con base en la recopilación de datos, además del desarrollo de aplicaciones a través de análisis de datos en Firebase y HTML, así como su visualización en una aplicación móvil vinculada mediante conexión inalámbrica Wifi.

### C. Descripción de partes

En esta fase se describen los componentes individuales que conforman cada subsistema de la etapa anterior, elegidos con base en los requerimientos de funcionalidad del sistema.

- 1) *Elementos de hardware*: los diversos sensores, el controlador y los actuadores serán descritos en términos de principales características de operación.

Para el sensor de distancia, se optó por un sensor ultrasónico HC-RS04, ver Fig. 3a. La Tabla I muestra las principales características del sensor ultrasónico. Este sensor sirve para la detección de obstáculos durante la navegación autónoma del robot.

TABLA I  
DATOS DEL SENSOR HC-RS04.

Voltaje	5VDC
Corriente de operación	15 mA
Rango de medición	2 cm - 400 cm
Frecuencia de trabajo	40 KHz
Ángulo de medición efectivo	< 15°
Ángulo de medición	30°
Precisión	+/- 3mm
Dimensiones	45*20*15 mm

Para el detector de gas, se optó por el sensor MQ-6 mostrado en la Fig. 3b. Este es un sensor electro-químico que varía su resistencia al estar en contacto con el gas LP y gas natural. La Tabla II describe las principales características del sensor de gas utilizado. El MQ-6 tiene una salida analógica que permite medir el cambio en la concentración de gases de entre 200 a 1000 ppm (partes por millón) y envía una señal digital.

TABLA II  
DATOS DEL SENSOR MQ-6.

Voltaje	5VDC
Corriente de operación	160 mA
Rango de detección	200 ppm a 10000 ppm
Temperatura de Operación	-10 °C ~ 50 °C
Dimensiones	32*20*21.4mm

El módulo del sensor GPS es importante debido a que al detectar gas LP [15], el sistema debe enviar al instante la ubicación de la localización de la fuga. La Fig. 3c muestra el modelo NEO6M V2 del GPS utilizado. En la Tabla III se observan sus principales características de operación. Este es un módulo receptor que ayuda en la geolocalización, cuenta con una antena y una memoria EEPROM para recibir las señales de los satélites.

TABLA III  
DATOS DEL MÓDULO NEO6M V2.

Voltaje	3.3V a 5V
Corriente de operación	45 mA
Comunicación	UART
Velocidad de comunicación	9600 bps
Sistema de coordenadas	WGS-84
Dimensiones Antena	25*25 mm
Dimensiones Módulo	36*25.9 mm

Con respecto a visualizar el entorno en que el robot se desplaza al durante la búsqueda de fuga, se utiliza una tarjeta de desarrollo basada en el microcontrolador ESP32-S. Esta incluye una cámara OV2640 para obtener video en tiempo real. De esta manera, será más fácil que el usuario tome decisiones de acuerdo a las condiciones del entorno de la fuga. La Tabla IV describe las principales características de la ESP32S-CAM y la Fig. 3d muestra este dispositivo.

TABLA IV  
DATOS ESP32S-CAM.

Interfaz de programación	MicroUSB
Voltaje	Pines: 3.3V y MicroUSB / Pines: 5V
RAM	520KB SRAM+4M PSRAM
Formato de imagen	JPEG, BMP, GPAYSCALE
Resolución video	1080p30, 720p60 y 640x480p90
Temperatura	-40°C a 85°C
Dimensiones	48*27*16mm

En relación con las salidas del sistema, una de ellas es el accionamiento del puente H modelo L298N, ver Figura 3e. Las características de este driver se observan en la Tabla V. Este permite la manipulación del giro de los motores de DC del robot móvil.

TABLA V  
DATOS DEL L298N.

Voltaje	5 VDC
Voltaje de operación	5 V-35 V
Capacidad de corriente	2A
Canales	2
Dimensiones	43*43 mm*27mm

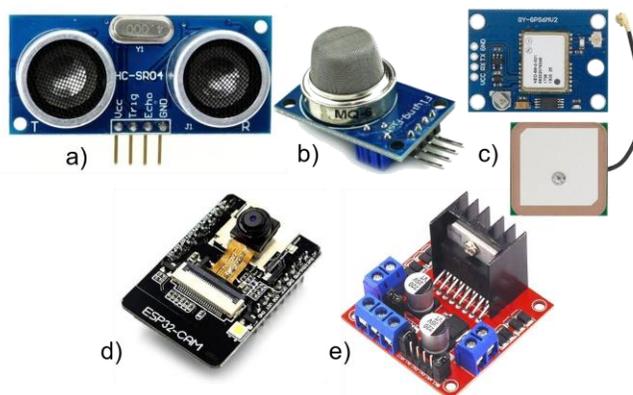


Fig. 3. Componentes sistema de control. a) Sensor de proximidad, b) Sensor detector de gas, c) Módulo GPS, d) ESP32-CAM., e) Puente H

El controlador principal de la plataforma robótica es la tarjeta NodeMCU ESP8266, ver Fig. 4. Este microcontrolador es un módulo Wifi para Arduino, compatible con todos los sensores y actuadores antes mencionados. Además, es de bajo costo y de tamaño reducido. La tabla VI muestra las principales características de la tarjeta.

TABLA VI  
DATOS DE LA ESP8266.

Voltaje de salida en los pines	3.3VDC
Corriente nominal por pin	12mA
Tipo de conector	Bluetooth, USB, Wifi
Pines GPIO	13
Pines PWM	12
Dimensiones	58*31*13mm.



Fig. 4. Módulo WiFi NodeMCU ESP8266

- 2) *Elementos de software*: el subsistema de software está conformada, por un lado, por el algoritmo de control para la navegación autónoma del robot móvil a través de la plataforma de Arduino y, por otro lado, por la generación de la aplicación móvil en el entorno libre de MIT App Inventor.

Como primer elemento de software, la Fig. 5 muestra el diagrama de flujo del algoritmo de control que implica la toma de decisiones para el controlador con base en la información de los sensores.

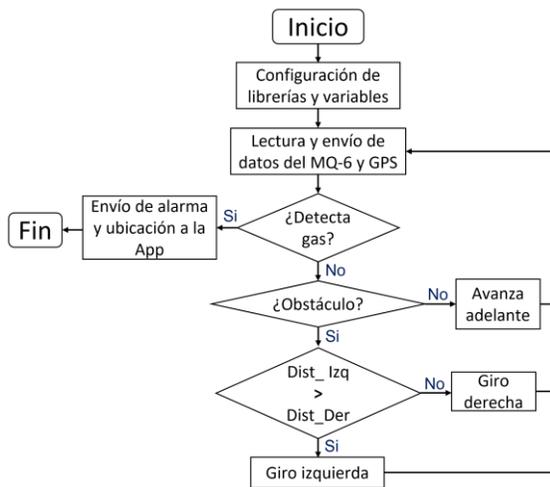


Fig. 5. Diagrama de flujo del funcionamiento del robot

Las tareas del robot que abarca el algoritmo son: la detección de gas, evasión de obstáculos en la navegación y registro de ubicación GPS. Para ello, la programación de la tarjeta se realizó en el software Arduino mediante lenguaje C. Esta plataforma es de acceso libre y permite el desarrollo de prototipos en diversas áreas como los reportados en [16], [17]. En el código de este caso de estudio, se importan varias librerías necesarias para la implementación de estas funciones, tales como: *TinyGPSPlus*. H para el GPS, *SoftwareSerial.h* para la comunicación en serie, *Firebase\_ESP\_Client.h* para la conexión a la base de datos en la nube y *Servo.h* para controlar el servomotor.

De manera general, en la función *setup()* se inician las variables y las configuraciones necesarias de las funciones. También, se define la configuración de la conexión Wifi, permitiendo conectarse a la red. Después, se define el objeto para la Firebase y se inicia la comunicación con la base de datos.

En la función *loop()* se realizan las siguientes acciones:

- Se actualiza la ubicación del robot a través del GPS.
- Se realiza la lectura del sensor de gas LP para determinar si hay fuente o no.
- Si se detecta fuente de gas, se envía la alarma y la ubicación del robot en la Aplicación móvil, de lo contrario el robot se desplaza a otra posición.

- Medición de la distancia de obstáculos mediante un sensor ultrasónico.
- Si se detecta un objeto a menos de 15cm, el robot se detiene, retrocede por 800ms y luego gira a la izquierda o derecha dependiendo de la lectura del ultrasónico.
- Se actualiza la lectura del sensor MQ-6 y la ubicación del vehículo en la base de datos.

Adicionalmente, se definen otras funciones para realizar acciones específicas, como *displayInfo()* para mostrar la información del GPS en el monitor serial. Las funciones *lookRight()* y *lookLeft()* se utilizan para girar el servomotor (que tiene montado el sensor ultrasónico) a la derecha e izquierda, respectivamente, y medir la distancia con el sensor ultrasónico en dichas direcciones. También, se definen funciones para la activación del robot hacia adelante, hacia atrás y girar a la derecha o izquierda.

Debido a que el robot autónomo necesita mostrar los datos obtenidos, como segundo elemento de software se desarrolló una aplicación móvil en MIT App Inventor. Este software es un entorno de programación que permite crear aplicaciones móviles de forma simple, compatible con celulares inteligentes y tabletas, tanto de Android como iOS. Desde ella, cualquier usuario es capaz de observar la posición del robot vía Firebase y se le puede dar seguimiento en tiempo real mediante la información de latitud y longitud que brinda el GPS. La aplicación móvil está soportada en la base de datos en la nube Firebase, ayuda a almacenar y visualizar los datos recolectados por el microcontrolador en tiempo real desde cualquier dispositivo. En la Fig. 6 se muestra una parte del diagrama de bloques del desarrollo de la aplicación.

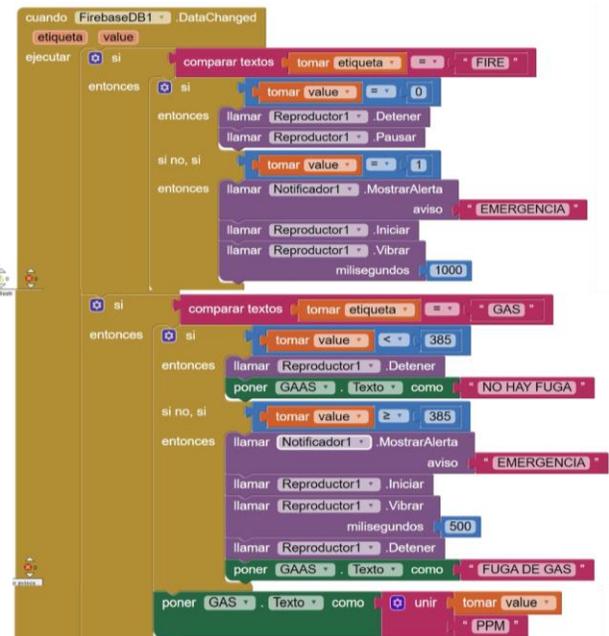


Fig. 6. Diagrama de bloques en el desarrollo de la aplicación móvil

#### D. Implementación de partes

En esta etapa se describe la conexión de los elementos de cada subsistema.

- 1) *Integración de partes de hardware*: el diagrama de conexiones de los elementos de hardware descritos en la etapa anterior se muestra en la Fig. 7.

En el esquema se observa la conexión de las entradas del sistema: el sensor de gas, la cámara, el sensor ultrasónico, el servomotor, el puente H a la tarjeta controladora. De igual forma se observa como salida: los motores como tracción diferencial del robot móvil. Además, se visualiza la conexión del sistema con la fuente de alimentación.

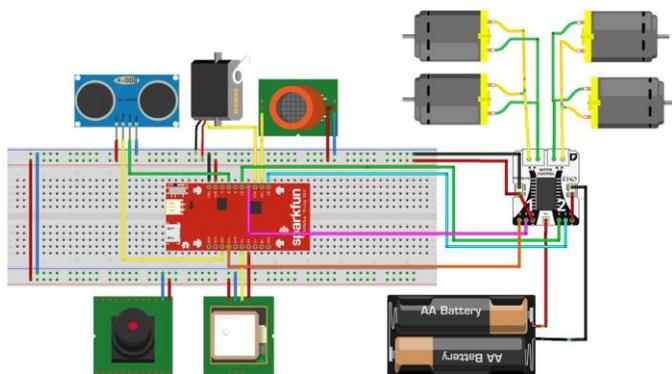


Fig. 7. Diagrama de conexiones del sistema de hardware

- 2) *Integración de partes de software*: en este punto, la Fig. 8 muestra del lado izquierdo una captura de pantalla de una prueba de enlace del sensor de gas y el GPS con la aplicación, así mismo, del lado derecho se observa la conexión de la base de datos de la plataforma IoT Firebase.

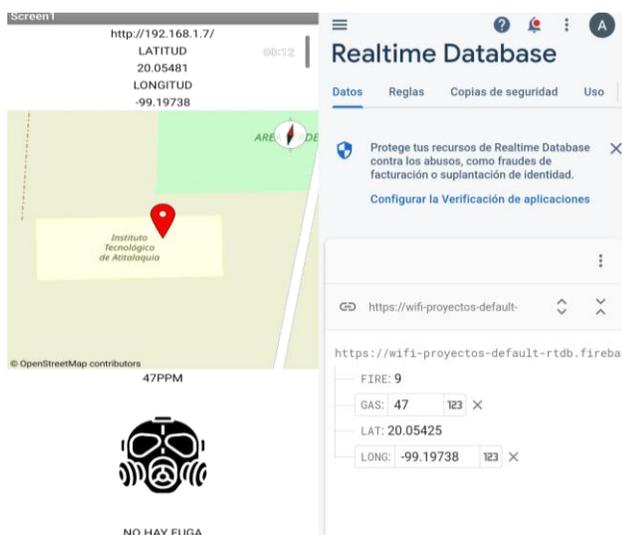


Fig. 8. Enlace de la App con la base de datos Firebase

#### E. Prueba de las partes

Para esta fase fue necesario validar el funcionamiento de las partes de cada subsistema. En ese sentido, tanto las pruebas de elementos de hardware como de software fueron realizadas en conjunto.

Por un lado, la calibración de los sensores requiere de la conexión con la plataforma de Arduino para la lectura de sus datos, como el caso del sensor de gas MQ-6, ver Fig. 9. Así mismo, la activación de los motores para la tracción del robot se valida a través del envío de comandos desde la plataforma de programación. Así, se verifica la funcionalidad y buen estado de todos los sensores y actuadores involucrados.

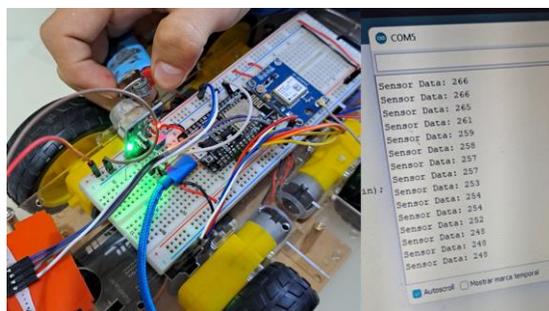


Fig. 9. Calibración del sensor detector de gas MQ-6

Por otro lado, se realizaron pruebas de comunicación de la aplicación móvil con la base de datos Firebase a través del módulo Wifi. Al final, se verificó el envío y recepción de datos. Esta interfaz se utilizará para poder tener acceso a la información del robot móvil, y principalmente para recibir una alerta y los datos de coordenadas al momento de detectar la fuga de gas LP.

Otro aspecto de suma importancia que se verificó en esta etapa, es la prueba de funcionamiento de la ESP32-CAM para que envíe video en tiempo real, mediante comunicación HTML en la aplicación, ver Fig. 10, con la finalidad de poder hacer un seguimiento e inspección a la zona de búsqueda.

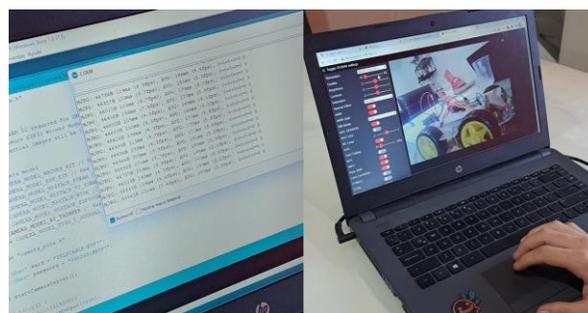


Fig. 10. Funcionamiento de la ESP32-CAM

#### F. Enlace de subsistemas

Una vez que se ha comprobado individualmente la funcionalidad de los componentes, se procede a enlazar los subsistemas. En este caso, se integra una plataforma que contiene tanto el hardware como el software. Esto permite

probar en conjunto el control del hardware mediante el software diseñado. Es decir, se integran el algoritmo de control del robot móvil y la funcionalidad de la lectura y almacenamiento de datos por parte de la aplicación móvil y el monitoreo de datos en la plataforma IoT. La Fig. 11 muestra en conjunto los subsistemas de hardware y software, así como la manera en la que estos se relacionan.

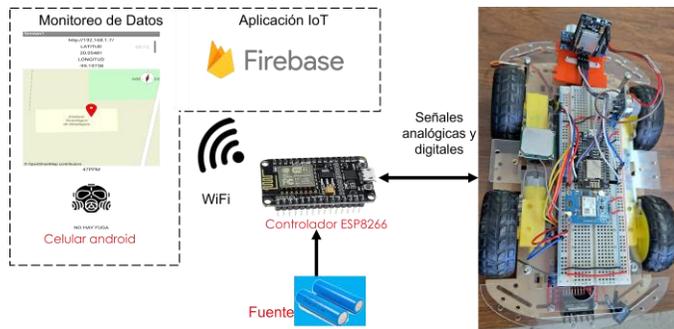


Fig. 11. Diagrama esquemático de la plataforma desarrollada

### G. Validación del sistema

Para la última etapa de la metodología aplicada, se considera validar el funcionamiento del sistema de acuerdo a los requisitos de funcionalidad establecidos en la *Etapa A*. La siguiente sección del artículo aborda la validación del sistema a través de una serie de pruebas realizadas al prototipo obtenido.

## III. EXPERIMENTACIÓN

En este apartado se muestran una serie de pruebas experimentales con el fin de validar la funcionalidad de la plataforma. De igual forma, se presentan los resultados principales en comparación con los trabajos relacionados.

### A. Pruebas de funcionamiento

Los experimentos están enfocados a que el robot móvil realice la tarea de navegación en entornos de interiores controlados, como los laboratorios institucionales donde manejan gas LP para las prácticas. Durante el recorrido, el robot tiene la tarea de detectar una fuga de gas LP y enviar la ubicación en latitud y longitud a una base de datos IoT, que puede ser consultada por una aplicación móvil. Las pruebas se describen a continuación:

- *Prueba 1:* fue realizada en el laboratorio de química del TecNM campus Atitalaquia. Como primera etapa de la prueba el robot se puso en funcionamiento después de que un grupo salió de realizar prácticas en el espacio, con la finalidad de verificar si todas las llaves de gas LP de las mesas de trabajo fueron cerradas correctamente. En la Fig. 12 se observa el mapa del laboratorio, los espacios en gris son obstáculos, el espacio en blanco es libre para recorrido del robot, y con línea discontinua se aprecia

la trayectoria del robot desde el punto de inicio (color verde) hasta el punto final (color rojo) en la exploración. Se aprecia que el robot es capaz de navegar el entorno por completo, en este caso, no se detecta fuga por lo que la exploración del área es concluida.

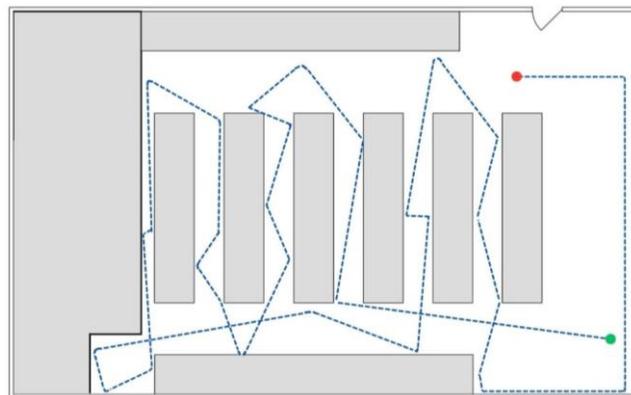


Fig. 12. Navegación autónoma del robot para detectar fugas de gas en un laboratorio de química

Como segunda etapa de la prueba, se abrió una de las perillas de gas de una de las mesas de trabajo durante 10 segundos. Nuevamente se puso en marcha el robot para la exploración, después de 245 segundos de navegación, este llega a la mesa de trabajo con la fuga de gas LP, ver Fig. 13a, en este punto, el robot realiza la detección de gas LP enviando la alarma al teléfono de la encargada del laboratorio, que además en la aplicación le indica el nivel de concentración de gas detectado de 398ppm, ver Fig. 13b.

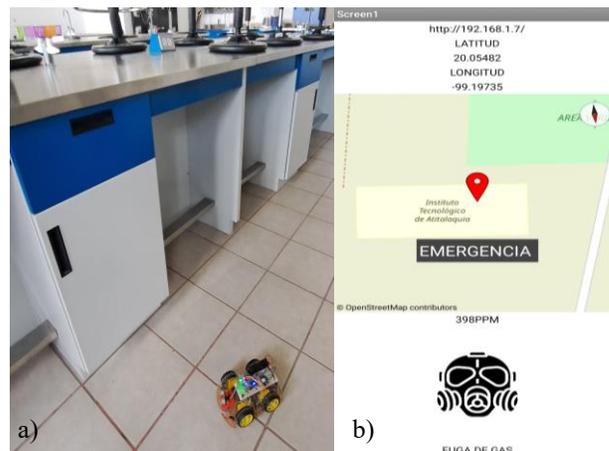


Fig. 13. a) Robot móvil al momento de detectar la fuga en una llave de gas a 0.9 de altura del vehículo; b) Alerta recibida en la aplicación móvil

- *Prueba 2:* esta fue realizada en el laboratorio de física del CETIS No. 026, ver Fig. 14a. Consistió en abrir la perilla de gas de una de las mesas durante 10 segundos. La llave de gas está a una altura de 1 metro respecto al piso donde explora el robot.

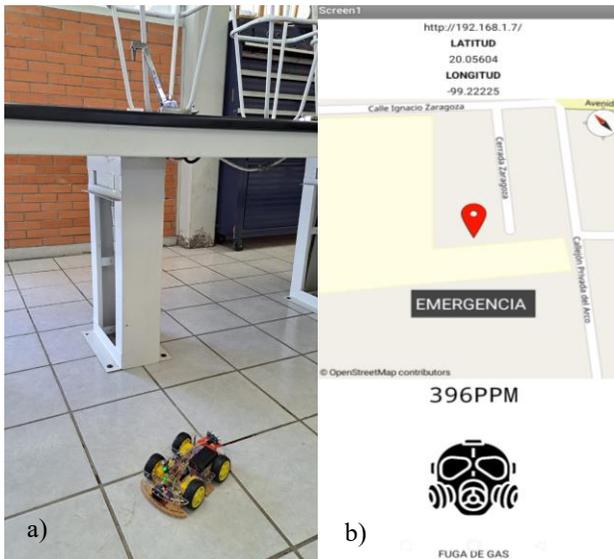


Fig. 14. a) Robot móvil explorando un laboratorio de física; b) Alerta recibida en la aplicación móvil al momento de detectar fuga de gas LP

Después de 100 segundos de recorrido por parte del vehículo móvil, este se posiciona en la mesa con fuga y se detiene, simultáneamente, envía los datos a la Firebase así como a la aplicación móvil, ver Fig. 14b, detectando 396 ppm de concentración de gas.

### B. Resultados

De acuerdo a las pruebas realizadas se observa que la plataforma desarrollada puede detectar fugas de gas LP en laboratorios institucionales donde es ocupado este gas en prácticas académicas. Como puntos principales es importante destacar lo siguiente:

- 1) El robot puede detectar la fuente de gas incluso a una altura de 1.5 m de altura.
- 2) Por arriba de un valor de 380 ppm de concentración detectada se considera fuga de gas LP. Lo anterior debido a que el robot puede detectar valores por debajo de 380, sin embargo, eso se puede deber a que el gas está siendo ocupado como combustible para generar fuego en alguna parrilla, mechero, etc.
- 3) La base de datos Firebase así como la aplicación desarrollada permiten monitorear el estado del robot durante la exploración, lo que ayuda a tomar acciones prontas al momento de una detección de fuga.
- 4) Los componentes utilizados son de bajo costo y comercialmente accesibles, lo que puede permitir su fácil construcción y replicación.

En la Tabla VII se resumen las principales ventajas de la presente investigación en comparación con los trabajos de la literatura reportada. En dicha tabla, se observa que las características de evasión de obstáculos, eficiencia en la localización de la fuente de gas, el monitoreo a través de aplicaciones IoT y su autonomía de navegación son consideradas en nivel alto con respecto a los otros trabajos, haciendo notar la contribución del artículo.

TABLA VII  
COMPARACIÓN CON LOS TRABAJOS REFERENCIADOS.

Referencias	Principales características					
	E	V	L	M	C	A
García-Barrientos, Abel et al. [10]	++	++	+	+	+	+
Tisa, J. et al. [11]	-	+	+	+	-	+
Sharma, Jinesha & Dhotay, Megha [12]	+	+	+	+	++	-
Akor, Ukechi [13]	+	++	+	-	++	-
Contribución del trabajo	++	+	++	++	++	++

E: Evasión de obstáculos, V: Velocidad de avance, L: Localización de las fugas, M: Monitoreo del carro, C: Costo bajo, A: Autonomía en la navegación  
Niveles: ++: Alto, +: Medio, -: Bajo

## IV. CONCLUSIÓN

El diseño y construcción de una plataforma robótica móvil de acuerdo a la metodología tipo V fue llevado exitosamente en este trabajo de investigación. El robot construido es capaz de navegar de forma autónoma en entornos cerrados de tipo laboratorios académicos con la posibilidad de detectar una fuente o fuga de gas LP y enviar la ubicación de esta a una base de datos en la nube y además mandar una alarma en una aplicación móvil. La estructura final está conformada por tres sensores: un sensor ultrasónico HC-RS04 para la detección de obstáculos en la navegación, un sensor de gas LP MQ-6 capaz de detectar de 200 ppm-10000 ppm y un GPS para enviar en tiempo real las coordenadas de latitud y longitud al momento de que se detecte fuente de gas LP. El controlador utilizado es una tarjeta NodeMCU ESP8266, siendo esta un módulo Wifi que permite enviar la información a la plataforma IoT. El sistema también cuenta con un módulo de cámara que envía video a través de una conexión HTML para monitorear de manera remota el entorno que se está explorando.

Como trabajo a futuro se pretende mejorar el algoritmo de exploración que permita eliminar la redundancia en el posicionamiento del robot como nuevo punto de búsqueda de fuga y optimizar el tiempo de navegación.

## REFERENCIAS

- [1] M. de M. Fernandes, J. A. Bigheti, R. P. Puntarella, and E. P. Godoy, "Industrial Automation as a Service: A New Application to Industry 4.0," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 19, no. 12, pp. 2046–2053, Dec. 2021, doi: 10.1109/TLA.2021.9480146.
- [2] E. Monroy Cruz, A. García Barrientos, E. S. Espinoza Quesada, L. R. García Carrillo and R. Tapia Olvera, "An Unmanned Ground Vehicles Experimental Setup for Image-Based Object Tracking," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 9, pp. 2845–2850, Sept. 2015, doi: 10.1109/TLA.2015.7350029.
- [3] O. Esan, S. Du and B. Lodewyk, "Review on Autonomous Indoor Wheel Mobile Robot Navigation Systems," 2020 *International Conference on Artificial Intelligence, Big Data, Computing and Data Communication Systems (icABCD)*, Durban, South Africa, 2020, pp. 1–6, doi: 10.1109/icABCD49160.2020.9183838.

- [4] Diaz Celis, Cesar Augusto and Molano, César. (2015). Robot aplicado a la medición de áreas usando GPS. *Visión electrónica*. 9. 206-214. 10.14483/22484728.11029.
- [5] Lornilo, Suria & Alimpuangon, Lornilo & Quimno, Val. (2022). *IOT Methodologies: A Review of IoT System Development Methods*.
- [6] A. Marroquin, A. Gomez and A. Paz, "Design and implementation of explorer mobile robot controlled remotely using IoT technology," 2017 *CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*, Pucon, Chile, 2017, pp. 1-7, doi: 10.1109/CHILECON.2017.8229583.
- [7] Yeong, D.J.; Velasco-Hernandez, G.; Barry, J.; Walsh, J. Sensor and Sensor Fusion Technology in Autonomous Vehicles: A Review. *Sensors* 2021, 21, 2140. <https://doi.org/10.3390/s21062140>.
- [8] Z. Wang, Y. Wu and Q. Niu, "Multi-Sensor Fusion in Automated Driving: A Survey," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 2847-2868, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2962554.
- [9] Yaacob, Megat & Jalani, Jamaludin & Sadun, Amirul & Zulkarnain, Abang. (2022). Development of a low-cost teleoperated and semi-autonomous robotic arm. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 27. 1338. 10.11591/ijeecs.v27.i3.pp1338-1346.
- [10] A. G. Barrientos, J. C. G. Vidal, E. S. E. Quesada, J. P. O. Oliver, F. R. T. Macotela and M. O. Domínguez, "Design and Construction of Mini-Robot for Gas LP Detection Using a Mobile Device," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 11, no. 6, pp. 1295-1300, Dec. 2013, doi: 10.1109/TLA.2013.6710375.
- [11] Tisa, J. & Lepika, J. & Nedumaan, J. (2019). Domestic Robot for LPG and AC Gas Leakage Detection. *International Journal of Computer Applications*. 178. 1-3. 10.5120/ijca2019919090.
- [12] Sharma, Jinesha & Dhotay, Megha. (2022). LPG Gas Leakage Detector with RC - Car: Using Arduino. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*. 321-325. 10.32628/CSEIT228359.
- [13] Akor, Ukechi & Yusuf, Abubakar & Makanjuola, Peter & Hamza, M. (2022). Development Of Gas Detection System Using Autonomous Mobile Robot. *International Journal of Scientific and Engineering Research*. 5. 144-153.
- [14] Durmu,s, M.; Ustoglu, I.; Tsarev, R.; Börcsök, J. Enhanced V-Model. *Informatica* 2018, 42, 577–585.
- [15] Ramírez, Ricardo & Valdez Martínez, Jorge & Villanueva Tavera, Jonatha & Vega, Luis & Escobar, Alberto & Calderón, Enrique & Barojas, Iván & Arias, Hector. (2022). Sistema de telemonitoreo para tanque de gas. 22-27.
- [16] Monroy Cruz, Ernesto & Paredes, Vianey & Hernández, Damián & Simón-Marmolejo, Isaías. "Diseño y construcción de brazo robótico para línea de producción entrenadora". *Memorias del XXVI Congreso Internacional Anual de la SOMIM*, 2020.
- [17] García, Esbeidy & Monroy Cruz, Ernesto & Torres-Rodríguez, Agustín & Hernández, Jonathan. "Sistema automatizado para la clasificación y manipulación de objetos mediante un brazo articulado". *Memorias del XXVII Congreso Internacional Anual de la SOMIM*, 2021.