

Carro robótico para supervisar pruebas de presión y medición de gases en espacios confinados

Robotic cart for monitoring pressure tests and gas measurements in confined spaces

Edwin Arley Trujillo Trujillo¹

Jhon Alexander Coronado Ramírez²

Juan Camilo Montealegre Vanegas³

Pedro Torres Silva⁴

Gilma Paola Andrade Trujillo⁵

Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Colombia

Resumen

El presente trabajo expone el diseño, desarrollo e implementación de un carro robótico teledirigido, concebido como una solución tecnológica para supervisar pruebas de presión y realizar mediciones de gases en espacios confinados de la empresa Maxim Fishing S.A.S., en Neiva, Huila. La problemática central radica en la carencia de métodos eficientes y seguros para el monitoreo en tiempo real de condiciones atmosféricas y de presión en áreas de alto riesgo, lo cual incrementa la probabilidad de accidentes laborales y daños en la infraestructura. El prototipo desarrollado integra un sistema mecánico y electrónico robusto con sensores especializados (MQ-2, MQ-135, entre otros), un controlador basado en Arduino y ESP32, módulos de comunicación inalámbrica NRF24L01 y una interfaz de telemetría. Se aplicó una metodología de enfoque cuantitativo con carácter experimental, que abarcó análisis de

¹ Ingeniero electrónico, <https://orcid.org/0009-0003-5249-9827/> edwinarleytt@gmail.com

² Ingeniero electrónico, <https://orcid.org/0009-0000-0595-2885/> Jhonramirez2007@gmail.com

³ Ingeniero electrónico, <https://orcid.org/0009-0002-5973-9793/> jcmontealegreva@unadvirtual.edu.co

⁴ Ingeniero electrónico, especialista en Computación para la Docencia; magister en Educación, Educación en línea, <https://orcid.org/0000-0003-3649-2281/> pedro.torress@unad.edu.co

⁵ Ingeniera electrónica, especialista en Gerencia Informática, magister en Docencia Universitaria, estudiante del doctorado en Proyectos, <https://orcid.org/0000-0001-8676-3612/> gilma.andrade@unad.edu.co

requerimientos, diseño conceptual, prototipado, pruebas en entornos simulados y reales, y optimización de desempeño. Los resultados evidenciaron la capacidad del robot para detectar gases inflamables y tóxicos, transmitir datos de presión y gases en tiempo real, y reducir significativamente la exposición del personal a entornos peligrosos. La implementación de este sistema contribuye a fortalecer la seguridad ocupacional, optimizar procesos industriales y alinear la operación con normativas internacionales de seguridad y con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura). En conclusión, el carro robótico representa una alternativa innovadora, viable y replicable para la industria de hidrocarburos y otros sectores que requieran supervisión segura en espacios confinados.

Palabras clave: robótica, sensores, monitoreo, seguridad industrial, innovación, automatización.

Abstract

This paper presents the design, development, and implementation of a remotely controlled robotic cart conceived as a technological solution to supervise pressure tests and perform gas measurements in confined spaces at Maxim Fishing S.A.S., located in Neiva, Huila. The central problem addressed is the lack of efficient and safe methods for real-time monitoring of atmospheric and pressure conditions in high-risk areas, which increases the probability of occupational accidents and infrastructure damage. The developed prototype integrates a robust mechanical and electronic system with specialized sensors (MQ-2, MQ-135, among others), an Arduino and ESP32-based controller, NRF24L01 wireless communication modules, and a telemetry interface. A quantitative methodology with an experimental approach was applied, including requirements analysis, conceptual design, prototyping, testing in simulated and real environments, and performance optimization. Results demonstrated the robot's ability to detect flammable and toxic gases, transmit pressure and gas data in real-time, and significantly reduce human exposure to hazardous environments. The implementation of this system strengthens occupational safety, optimizes industrial processes, and aligns operations with international safety standards and the Sustainable Development Goals (SDG 9: Industry, Innovation, and Infrastructure). In conclusion, the robotic cart represents an innovative,

feasible, and replicable alternative for the hydrocarbon industry and other sectors requiring safe supervision in confined spaces.

Keywords: Robotics, sensors, monitoring, industrial safety, innovation, automation.

1. Introducción

El trabajo en espacios confinados constituye una de las actividades más riesgosas en la industria, debido a la limitada ventilación, la acumulación de gases peligrosos y la dificultad de acceso. En sectores como el petrolero, estas condiciones representan una amenaza directa para la seguridad del personal y la integridad de las instalaciones. Tradicionalmente, las mediciones de gases y las pruebas de presión se han realizado de forma manual, exponiendo a los trabajadores a riesgos críticos y reduciendo la eficiencia de los procesos.

El avance de la robótica y la sensórica ofrece una alternativa innovadora para mitigar estos riesgos. Un carro robótico, diseñado para operar en espacios confinados, constituye una solución tecnológica capaz de proporcionar datos en tiempo real, reducir la exposición humana y optimizar la supervisión. Este proyecto responde a la necesidad de Maxim Fishing S.A.S. de contar con un sistema que permita monitorear de manera segura las condiciones en espacios confinados y realizar pruebas de presión, contribuyendo a la seguridad laboral y a la modernización de la industria.

2. Metodología

La metodología aplicada en este proyecto siguió un enfoque cuantitativo de carácter experimental, estructurado en fases secuenciales que permitieron el desarrollo, validación y optimización del carro robótico.

2.1 Análisis de requerimientos

- Se realizó un levantamiento exhaustivo de necesidades en la empresa Maxim Fishing S.A.S., con entrevistas a personal técnico y de seguridad.

- Se definieron las variables críticas: gases a detectar (H_2S , CO , CH_4 , CO_2 , entre otros), rangos de presión a supervisar, distancias mínimas de operación (>50 m) y condiciones ambientales (humedad, temperatura, presencia de atmósferas explosivas).
- Se identificaron las normativas aplicables: NFPA 350, OSHA 29 CFR 1910.146 y NTC 5802.

2.2 Investigación y estado del arte

Se revisaron 12 estudios internacionales de referencia en robótica móvil, detección de gases y telemetría, lo que permitió establecer criterios comparativos de innovación y pertinencia.

2.3 Diseño conceptual

- Se estructuró la arquitectura en tres capas: mecánica (chasis y tracción diferencial), electrónica (sensores MQ-2, MQ-135, sensores de presión, Arduino, ESP32, módulos NRF24L01), y software (algoritmos de control y comunicación).
- Se elaboraron planos isométricos, ortogonales y diagramas de interconexión de componentes.

2.4 Desarrollo y prototipado

- Se ensambló el chasis con materiales metálicos ligeros y resistentes.
- Se programaron los microcontroladores con rutinas de control de motores, adquisición de datos sensoriales y transmisión inalámbrica.
- Se calibraron sensores MQ (H_2S , CO , CH_4) mediante curvas logarítmicas con gases patrón.

2.5 Pruebas y evaluación

- Simuladas: validación en entornos controlados para verificar precisión en detección de gases y estabilidad de comunicación.
- Reales: pruebas en campo en instalaciones de Maxim Fishing, supervisando mediciones de gases y pruebas de presión.

- Se midieron variables de desempeño: alcance de comunicación, tiempo de respuesta de sensores, autonomía de batería, estabilidad mecánica y confiabilidad de datos.

2.6 Optimización y ajustes

- Se ajustaron algoritmos de navegación y transmisión de datos.
- Se implementaron mejoras en el acondicionamiento de señal del ESP32.
- Se reforzó la carcasa protectora para entornos hostiles.

3. Resultados

3.1 Detección de gases

Se utilizaron sensores de la serie MQ calibrados con gases patrón, desarrollando curvas logarítmicas R_s/R_o (resistencia del sensor vs. concentración).

- Sensor MQ-136 (H_2S)

Pruebas de exposición controlada a sulfuro de hidrógeno mostraron un comportamiento de resistencia inversamente proporcional a la concentración.

Se obtuvieron lecturas confiables entre 10 ppm y 200 ppm, con una desviación estándar promedio $<5\%$.

La curva de calibración ajustada arrojó un coeficiente de correlación $R^2 = 0,97$, lo que valida su precisión.

Tabla 1. Calibración del sensor MQ-136 (H_2S)

Concentración H_2S (ppm)	R_s/R_o medida	R_s/R_o teórica	Error (%)
10	4.8	5.0	4.0
50	2.9	3.0	3.3

100	2.1	2.0	5.0
200	1.5	1.5	0.0

El sensor MQ-136 mostró un comportamiento estable, con un coeficiente de correlación $R^2 = 0,97$ en la curva R_s/R_o vs ppm, validando su precisión para la detección de H_2S en atmósferas industriales.

- Sensor MQ-7 (CO)

Durante pruebas con monóxido de carbono, el sensor respondió de forma lineal en el rango de 20–200 ppm.

Se obtuvo una correlación $R^2 = 0,95$ respecto a los valores de referencia del gas patrón.

Las gráficas mostraron una pendiente estable en la relación ADC (valores digitalizados) vs ppm, confirmando la fiabilidad del acondicionamiento de señal.

Tabla 2. Calibración del sensor MQ-7 (CO)

Concentración CO (ppm)	Valor ADC medido	Valor ADC esperado	Error (%)
20	102	100	2.0
100	420	410	2.4
150	615	600	2.5
200	820	800	2.5

El MQ-7 registró lecturas confiables en el rango de 20–200 ppm, con una desviación menor al 3 %.

- Sensor MQ-2 (CH_4)

Se realizaron pruebas de exposición a metano en atmósferas controladas.

El sensor registró variaciones estables de R_s/R_o en concentraciones de 50–500 ppm.

La respuesta fue rápida (<5 s), lo que favorece la detección en tiempo real de fugas.

Tabla 3. *Calibración del sensor MQ-2 (CH_4)*

Concentración CH_4 (ppm)	R_s/R_o medida	R_s/R_o teórica	Error (%)
50	4.5	4.7	4.2
100	3.2	3.3	3.0
300	2.0	2.0	0.0
500	1.4	1.5	6.7

El MQ-2 respondió adecuadamente en rangos de 50–500 ppm de metano, con error promedio $<5\%$.

3.2 Monitoreo de presión

- Se utilizó un sensor de presión calibrado en banco de pruebas con un rango operativo de 0–10 bar.
- Durante las pruebas en tuberías de Maxim Fishing, el sistema registró presiones con una precisión del 97 % respecto a los equipos comerciales certificados utilizados como referencia.
- Se verificó la estabilidad de las lecturas en condiciones de vibración y cambios de temperatura, con una variación máxima de ± 2 %.

3.3 Pruebas de comunicación inalámbrica (NRF24L01)

- Se midió el alcance operativo del sistema de telemetría en campo abierto y en instalaciones industriales:

Campo abierto: rango efectivo de 80 m sin pérdida de paquetes.

Ambiente industrial (con obstáculos): rango confiable de 55–60 m.

- La tasa de pérdida de datos fue inferior al 2 %, con un retardo promedio en transmisión de 180 ms.
- Estas pruebas demostraron que el sistema cumple con el requisito de operación a más de 50 m de distancia.

Tabla 4. *Pruebas de comunicación inalámbrica (NRF24L01)*

<i>Entorno de prueba</i>	<i>Distancia máxima (m)</i>	<i>Pérdida de paquetes (%)</i>	<i>Retardo promedio (ms)</i>
Campo abierto	80	0.5	150
Instalación industrial	55	2.0	180

La comunicación fue estable y cumplió con el requisito de operación a más de 50 m.

3.4 Desempeño mecánico y energético

- Autonomía energética:

El sistema de baterías recargables 18650 (Li-Ion) ofreció una autonomía de 3 horas de operación continua bajo carga completa.

Con ajustes de optimización en el algoritmo de control, se estimó que la autonomía podría extenderse hasta 4 horas en condiciones de uso moderado.

- Robustez estructural:

El chasis soportó pruebas de resistencia a vibraciones, humedad y golpes leves sin comprometer la funcionalidad de sensores ni módulos electrónicos.

El carro robótico logró desplazarse con estabilidad en superficies irregulares, gracias al sistema de tracción diferencial con motores DC y controladores L298N.

3.5 Indicadores de seguridad industrial

Con la implementación del robot en pruebas reales, se eliminó el 100 % de la exposición directa del personal a atmósferas de riesgo durante la supervisión.

Los datos recogidos en tiempo real permitieron anticipar condiciones inseguras, reduciendo el tiempo de respuesta ante posibles emergencias.

4. Conclusiones

- El carro robótico desarrollado es una alternativa segura y eficaz para la supervisión de pruebas de presión y la medición de gases en espacios confinados, reduciendo la exposición humana a entornos de alto riesgo.
- La integración de sensores calibrados, sistemas de comunicación inalámbrica y control teledirigido garantizó una operación confiable, validada en condiciones reales de campo.
- La autonomía energética y la robustez mecánica hacen del prototipo una solución replicable y adaptable a diferentes escenarios industriales.
- La propuesta se alinea con normativas internacionales (NFPA, OSHA, ISO) y nacionales (NTC, Ley 1286 de 2009), lo que fortalece su pertinencia en el contexto colombiano.
- El proyecto contribuye directamente al ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura), al promover la innovación tecnológica en procesos industriales críticos.
- A nivel académico, la investigación demostró la importancia de un enfoque multidisciplinario, integrando conocimientos en robótica, electrónica, mecánica y seguridad industrial.

Como líneas futuras, se recomienda:

- Incorporar algoritmos de inteligencia artificial para navegación autónoma.
- Ampliar la capacidad de detección con sensores adicionales (NH_3 , SO_2).
- Optimizar la interfaz de usuario con integración en plataformas IoT y aplicaciones móviles.

Referencias

- Arduino. (2024). *Arduino Nano technical documentation*.
<https://docs.arduino.cc>
- Baque, B., Marcillo, K., Cedeño, J. & Gutiérrez, J. (2023). La mecatrónica y su importancia en la sociedad. *Journal TechInnovation*, 1(1), 46–54.
<https://doi.org/10.47230/Journal.TechInnovation.v1.n1.2022.46-54>
- Cedeño, D., & Gómez, L. (2020). *Aplicaciones del Internet de las cosas en entornos industriales*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD.
- Coca, C. (2020). Diseño e implementación de un sistema de monitoreo de gases tóxicos en espacios confinados utilizando sensores MQ y microcontrolador ESP32. *Revista Boliviana de Ciencias*, 27(1), 21–31.
http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2519-53522020000100003
- Dargie, W., & Poellabauer, C. (2010). *Fundamentals of wireless sensor networks: Theory and practice*. Wiley.
- Das, T., Sut, D., Gupta, V., Gohain, L., Kakoty, P., & Kakoty, N. (2020). A mobile robot for hazardous gas sensing. *Proceedings of the International Conference on Computational Performance Evaluation (ComPE)*, 62–66.
https://www.researchgate.net/publication/344311562_A_Mobile_Robot_for_Hazardous_Gas_Sensing
- ExRobotics. (2020). *ExR-1 – Autonomous robot for gas detection in hazardous industrial environments*. (Estudio de caso).
<https://e7552ege7qf.exactdn.com/wp-content/uploads/2020/04/ExRobotics-Case-Study.pdf>
- Fernández, D., & López, S. (2022). *Sistema de monitoreo de calidad del aire con sensores MQ-2 y MQ-135*. (Tesis de grado). Universidad Tecnológica de Panamá.
- Garcés, A., Zambrano, J., & Armijos, C. (2021). Diseño e implementación de un sistema de monitoreo remoto de gases en ambientes industriales. *Revista Tecnológica-ESPOL*, 34(2), 55–66.
- González, J., & Salazar, M. (2020). *Automatización industrial con Arduino*. Alfaomega.
- Hernández, V., Lilienthal, A., Neumann, P., Trincavelli, M., & Zell, A. (2014). Mobile robot multi-sensor unit for unsupervised gas discrimination in uncontrolled environments. *Robotics and*

Autonomous Systems, 62(11), 1748–1762.
<https://www.smokebot.eu/papers/Mobile%20robot%20multi-sensor%20unit%20for%20unsupervised%20gas%20discrimination%20in%20uncontrolled%20environments.pdf>

ISO. (2015). *ISO 14001:2015 – Environmental management systems*. International Organization for Standardization.

ISO. (2017). *ISO 10218-1: Robots and robotic devices – Safety requirements for industrial robots*. International Organization for Standardization.

Li, J. (2012). Design and implementation of a gas detection system based on wireless sensor networks. *Procedia Engineering*, 45, 303–308.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.150>

López, R., & Marín, F. (2019). *Protocolos de seguridad en espacios confinados para la industria*. (Informe técnico). Instituto de Seguridad y Salud en el Trabajo.

Maxim Integrated. (2018). *LM2596 regulator datasheet*. Texas Instruments.

Mayab, A. (2024). *¿Qué es la ingeniería mecatrónica y cuál es su campo laboral?* Universidad Anáhuac Mérida.
<https://merida.anahuac.mx/licenciaturas/blog/que-es-la-ingenieria-mecatronica>

Monk, S. (2016). *Programming Arduino: Getting started with sketches* (2.ª ed.). McGraw-Hill Education.

National Fire Protection Association. (2019). *NFPA 350: Guide for safe confined space entry and work*. NFPA.

Nordic Semiconductor. (2023). *nRF24L01+ product specification v2.0*.
<https://infocenter.nordicsemi.com>

Occupational Safety and Health Administration. (2020). *Permit-required confined spaces: Standard – 29 CFR 1910.146*. U.S. Department of Labor.

Oficina Internacional del Trabajo. (2021). *El trabajo informal en Colombia*. Norma.

Patil, S., & Karwankar, A. (2023). Development of gas leakage detection and location identification system. *The International Journal of*

Engineering and Science (IJES), 12(5), 6–12.
<https://www.theijes.com/papers/vol12-issue5/B12050612.pdf>

Pavani, R., Nikhitha, K., Pavani, K., Sri Harsha, K., & Durga Prasad, N. (2022). Hazardous gas detecting robot using Arduino. *Journal of Engineering Sciences*, 13(6), 1376–1380.
<https://jespublication.com/upload/2022-V13I6218.pdf>

Praveen, M., & Sasikumar, M. (2019). Smart gas detection and alerting system using IoT. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 67(7), 108–111. <https://ijettjournal.org/assets/Volume-67/Issue-7/IJETT-V67I7P205.pdf>

Pérez, M. J., García, J. L., & Ruiz, M. (2021). Avances en robótica móvil terrestre para entornos industriales: una revisión. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 18(4), 455–470.

Pravin, B., & Jaya, D. (2021). Intelligent robot for hazardous gas detection. *International Journal of Advances in Engineering and Management (IJAEM)*, 3(3), 443–447.
https://ijaem.net/issue_dcp/Intelligent%20Robot%20for%20Hazardous%20Gas%20Detection.pdf

Quinatoa, M., & Herrera, E. (2023). *Diseño de un sistema de monitoreo remoto para ambientes peligrosos utilizando módulos NRF24L01*. (Tesis de grado). Universidad Politécnica Salesiana.

Romero, C., & Solano, A. (2019). *Diseño y prototipado de un robot móvil para inspección de tuberías* (Tesis de grado). Universidad Politécnica Salesiana.

Sánchez, A. (2021). Comunicación inalámbrica para aplicaciones de monitoreo industrial con NRF24L01. *Ingenium*, 4(1), 78–89.

Vargas, D. (2017). *Fundamentos de robots móviles*. Universidad Nacional de Colombia.

Vargas, J. (2022). Análisis de riesgos y medidas de seguridad en espacios confinados según normativa OSHA [Ponencia]. *Congreso Internacional de Seguridad Industrial*.

Zhang, Q. (2013). Design and implementation of an intelligent mobile robot system for gas detection in hazardous environments.

International Journal of Computer Applications.
<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?doi=9255d9d190b0f5093ffe3cf2c7279562002ee98>