



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E
INDUSTRIAL**

CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

Tema:

**SISTEMA IOT PARA EL CONTROL Y MONITOREO DE FUGAS DE GLP
EN ENTORNOS DOMÉSTICOS**

Trabajo de titulación modalidad Proyecto de Investigación, presentado previo a la
obtención del título de Ingeniero en Telecomunicaciones

ÁREA: Programación y redes

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Electrónica, Telecomunicaciones y Sistemas de
control

AUTOR: Andrés Mateo Llerena Ortega

TUTOR: Ing. Edgar Freddy Robalino Peña, Mg.

Ambato – Ecuador

julio - 2025

APROBACIÓN DEL TUTOR

En calidad de tutor del trabajo de titulación con el tema: SISTEMA IOT PARA EL CONTROL Y MONITOREO DE FUGAS DE GLP EN ENTORNOS DOMÉSTICOS desarrollado bajo la modalidad Proyecto de Investigación por el señor Andrés Mateo Llerena Ortega, estudiante de la Carrera de Telecomunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, de la Universidad Técnica de Ambato, me permito indicar que el estudiante ha sido tutorado durante todo el desarrollo del trabajo hasta su conclusión, de acuerdo a lo dispuesto en el Artículo 17 del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato y el numeral 6.3 del instructivo del reglamento referido.

Ambato, julio 2025.



Ing. Edgar Freddy Robalino Peña, Mg.

TUTOR

AUTORÍA

El presente trabajo de titulación con el tema: SISTEMA IOT PARA EL CONTROL Y MONITOREO DE FUGAS DE GLP EN ENTORNOS DOMÉSTICOS es absolutamente original, auténtico y personal y ha observado los preceptos establecidos en la Disposición General Quinta del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato. En tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, julio 2025.



Andrés Mateo Llerena Ortega

C.C. 1805271366

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato para que reproduzca total o parcialmente este trabajo de titulación dentro de las regulaciones legales e institucionales correspondientes. Además, cedo todos mis derechos de autor a favor de la institución con el propósito de su difusión pública, por lo tanto, autorizo su publicación en el repositorio virtual institucional como un documento disponible para la lectura y uso con fines académicos e investigativos de acuerdo con la Disposición General Cuarta del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato.

Ambato, julio 2025.



Andrés Mateo Llerena Ortega

C.C. 1805271366

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

En calidad de par calificador del informe final del trabajo de titulación presentado por el señor Andrés Mateo Llerena Ortega, estudiante de la Carrera de Telecomunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, bajo la Modalidad Proyecto de Investigación, titulado SISTEMA IOT PARA EL CONTROL Y MONITOREO DE FUGAS DE GLP EN ENTORNOS DOMÉSTICOS, nos permitimos informar que el trabajo ha sido revisado y calificado de acuerdo al Artículo 19 del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato y el numeral 6.4 del instructivo del reglamento referido. Para cuya constancia suscribimos, conjuntamente con el señor Presidente del Tribunal.

Ambato, julio 2025



Ing. Franklin Oswaldo Mayorga Mayorga, Mg.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL



Ing. Vicente Morales Lozada PhD.
PROFESOR CALIFICADOR



Ing. Martha Sevilla Abarca, PhD
PROFESOR CALIFICADOR

DEDICATORIA

Dedico este trabajo con profundo amor y gratitud a las personas que han sido el pilar fundamental en mi vida.

A mis padres, Iliana y Fabián, por ser mi refugio, mi fuerza y mi mayor ejemplo. Gracias por cada sacrificio silencioso, por cada palabra de aliento en los momentos difíciles y por creer en mí incluso cuando yo dudaba. Su amor incondicional, su guía constante y su apoyo inquebrantable han sido el impulso que me sostuvo y me motivó a nunca rendirme. Este logro no sería posible sin ustedes; esta meta también les pertenece.

A mis hermanos, Nicolás y Emily, por creer en mí. Gracias por su alegría, sus palabras de aliento y por estar siempre presentes en cada parte del camino.

A mis abuelos, Nelly y Galo, por sus enseñanzas, su cariño inmenso y por haber sembrado en mí los valores que hoy me guían.

Agradezco de manera muy especial a Alex Ortega, quien ha sido mucho más que un familiar cercano, ha sido una fuente constante de inspiración y el motivo principal por el cual decidí emprender este camino profesional.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Ing. Mg. Freddy Robalino, tutor de este proyecto, por su valiosa guía, paciencia y compromiso a lo largo del desarrollo de este trabajo.

Su acompañamiento constante, sus observaciones acertadas y su disposición para orientar cada etapa del proceso fueron fundamentales para alcanzar los objetivos propuestos.

Extiendo también mi gratitud a todos los docentes que formaron parte de mi formación académica.

Cada clase, cada consejo y cada exigencia fueron moldeando en mí no solo un profesional más preparado, sino también una persona con mayor sentido crítico, ético y humano.

Gracias por sembrar en mí la pasión por aprender, por impulsarme a superar mis límites y por contribuir significativamente a este logro que hoy celebro con humildad y gratitud.

No puedo dejar de agradecer a Jessica, quien en su momento fue una persona importante a lo largo de mi carrera. Su apoyo y compañía durante una etapa significativa de este camino aportaron motivación y fortaleza. Agradezco con respeto y sinceridad el impacto positivo que dejó en este proceso formativo.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PORTADA.....	i
APROBACIÓN DEL TUTOR.....	ii
AUTORÍA.....	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO.....	v
DEDICATORIA.....	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
ÍNDICE DE ANEXOS	xvii
RESUMEN EJECUTIVO	xviii
ABSTRACT	xix
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1 Tema de investigación.....	1
1.1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Antecedentes investigativos	3
1.3 Fundamentación teórica	5

1.3.1 Gas Licuado de Petróleo (GLP)	5
1.3.2 Internet de las Cosas (IoT)	10
1.3.3 Protocolos de Comunicación	12
1.3.4 Monitoreo y Control en Sistemas IoT	20
1.3.5 Sensores MQ	21
1.3.6 Microcontrolador ESP32.....	24
1.3.7 Servomotor.....	26
1.3.8 Puntos críticos de fuga en sistemas de distribución de GLP.....	27
1.3.9 Monitoreo y Control.....	28
1.3.10 Normas técnicas aplicables	29
1.4 Objetivos	32
1.4.1 Objetivo general	32
1.4.2 Objetivos específicos	32
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA.....	33
2.1 Materiales.....	33

2.1.1 ESP32	33
2.1.2 Sensores MQ	34
2.1.3 Servomotor.....	35
2.1.4 Raspberry Pi.....	35
2.1.5 Protoboard.....	36
2.1.6 PCB.....	37
2.1.7 Cilindro de GLP	38
2.1.8 Válvula de GLP.....	39
2.1.9 Proteus	39
2.1.10 Cura	40
2.2 Métodos.....	41
2.2.1 Modalidad de la investigación	41
2.2.2 Población y muestra	42
2.2.3 Recolección de información.....	42
2.2.4 Procesamiento y análisis de datos	43
CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	45
3.1 Desarrollo del proyecto	45
3.2 Fase de análisis de requerimientos	47
3.3 Fase de diseño y pruebas preliminares	48

3.3.1 Construcción del circuito en protoboard	48
3.3.2 Estabilización de los sensores	49
3.3.3 Pruebas de sensores MQ	51
3.4 Fase de desarrollo físico y estructural	52
3.4.1 Diseño de placa PCB.....	52
3.4.2 Diseño y fabricación del prototipo 3D	54
3.5 Fase de configuración del sistema IoT	56
3.5.1 Configuración del microcontrolador ESP32	57
3.5.2 Servidor local en Raspberry Pi.....	59
3.5.3 Creación del servidor en la nube	61
3.5.4 Instalación de servicios	61
3.5.5 Configuración de servicios.....	62
3.6 Fase de pruebas y validación final	70
3.6.1 Prueba de latencia de comunicación y registro de datos.....	70
3.7 Análisis económico	74
3.8 Prototipo Final.....	74
CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	75
4.1 Conclusiones	75
4.2 Recomendaciones.....	76

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77
ANEXOS.....	84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades del Gas Natural y del GLP	6
Tabla 2. Clasificación de GLP	9
Tabla 3. Tipos de sensores MQ y sus gases detectables	23
Tabla 4. Especificaciones técnicas del sensor MQ-5	24
Tabla 5. Especificaciones técnicas del ESP32	25
Tabla 6. Especificaciones técnicas del servomotor MG995	26
Tabla 7. Medición de tiempos de respuesta y estado de válvula en condiciones controladas	71
Tabla 8. Análisis de disponibilidad del sistema	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama técnico de una instalación de GLP con conexión a cocina [13].	7
Figura 2. Identificación visual de cilindros de gas en Ecuador [16]	8
Figura 3. Capacidades de cilindros de GLP en el mercado [18]	9
Figura 4. Aplicaciones del IoT en los diferentes enfoques [20]	10
Figura 5. Capas de arquitectura IoT [23]	11
Figura 6. Comparativa de tecnologías de comunicación inalámbrica en IoT según alcance y velocidad [25]	12
Figura 7. Aplicaciones y usos de wifi [27]	13
Figura 8. Aplicaciones y usos de BLE [28]	13
Figura 9. Aplicaciones y usos de LoRa [29]	14
Figura 10. Aplicaciones y usos de NB-IoT [31]	14
Figura 11. Aplicaciones y usos de ZigBee [33]	15
Figura 12. Interacción del protocolo MQTT [36]	16
Figura 13. Arquitectura de funcionamiento del protocolo CoAP [39]	17
Figura 14. Protocolos http y https [42]	18
Figura 15. Funcionamiento del protocolo AMQP [45]	19
Figura 16. Sensores de gases MQ [50]	21
Figura 17. Sensibilidad del sensor MQ-5 frente a distintos gases [51]	22
Figura 18. Sensibilidad del sensor MQ-6 frente a distintos gases [52]	22
Figura 19. ESP32	25

Figura 20. Servomotor MG995 [55]	26
Figura 21. ESP32 [64].....	33
Figura 22. Sensores de gas de la serie MQ [65].....	34
Figura 23. Raspberry PI [68].....	36
Figura 24. Protoboard [69].....	36
Figura 25. Placa PCB	37
Figura 26. Cilindro de GLP [72]	38
Figura 27. Regulador de presión para cilindros de GLP [71]	39
Figura 28. Diagrama de flujo del proceso de detección y respuesta ante concentraciones críticas de GLP.	46
Figura 29. Diagrama de conexiones	49
Figura 30. Circuito armado en protoboard	49
Figura 31. Fase de estabilización del sensor	50
Figura 32. Comparativa visual del proceso de estabilización MQ-5, MQ-6 y MQ-135	51
Figura 33. Sensores de gas MQ-5, MQ-6 y MQ-135.....	51
Figura 34. Circuito Esquemático de Proteus.....	52
Figura 35. Diseño de ruteo de la PCB.....	53
Figura 36. Vista en 3D del modelo ensamblado	53
Figura 37. Placa PCB final fabricada y ensamblada	54
Figura 38. Modelo 3D del sistema de accionamiento mecánico acoplado a la válvula	55

Figura 39. Simulación del sistema de accionamiento sobre un cilindro de GLP.....	55
Figura 40. Prototipos físicos impresos en 3D	56
Figura 41. Arquitectura lógica del sistema	57
Figura 42. Arquitectura del sistema para pruebas en red interna.	59
Figura 43. Arquitectura de monitoreo distribuido con servidor en la nube	60
Figura 44. Visualización de las tablas del sistema en phpMyAdmin	63
Figura 45. Instalación de complemento de MySQL en Grafana.....	66
Figura 46. Configuración de la conexión a la base de datos	66
Figura 47. Confirmación exitosa de la conexión	67
Figura 48. Interfaz de acceso a la fuente de datos MySQL desde Grafana	67
Figura 49. Interfaz para la creación de paneles visuales en Grafana	67
Figura 50. Selección del panel tipo Gauge en Grafana.....	68
Figura 51. Selección del panel tipo Stat en Grafana	68
Figura 52. Selección del panel tipo Histogram en Grafana	69
Figura 53. Panel de monitoreo en Grafana de los tres prototipos.	69
Figura 54. Verificación de integridad en la transmisión y almacenamiento de datos	70
Figura 55. Mensajes de alerta enviados a Telegram	71
Figura 56. Consulta de registros en la base de datos	72

ÍNDICE DE ANEXOS

Figura A 1. Categorización de Variables	84
Figura A 2. Árbol del problema	84

RESUMEN EJECUTIVO

La seguridad en el uso doméstico del Gas Licuado de Petróleo (GLP) constituye un aspecto crítico dentro de la gestión de riesgos en el hogar, especialmente en contextos donde el control técnico de instalaciones es limitado. La presente investigación propone el diseño e implementación de un sistema basado en tecnología IoT (Internet of Things) que permita la detección oportuna de concentraciones peligrosas de GLP, la activación automática de mecanismos de cierre de válvulas, y el envío de alertas en tiempo real a los usuarios.

El sistema integra sensores de gas de bajo costo, microcontroladores programables, actuadores para control de flujo y módulos de comunicación inalámbrica que facilitan su implementación en espacios residenciales. La propuesta se basa en una arquitectura distribuida que opera mediante una lógica de monitoreo continuo, identificación de umbrales de riesgo y ejecución inmediata de respuestas correctivas. A través de un enfoque aplicado e interdisciplinario, se articula la electrónica, la programación embebida, las redes de datos y los principios de automatización para construir una solución integral frente al riesgo de fugas de GLP.

Además de su funcionalidad técnica, el sistema busca fomentar una cultura preventiva en la población usuaria, mediante herramientas de interacción accesibles y de fácil comprensión. Este trabajo no solo responde a la necesidad de fortalecer la seguridad en entornos domésticos, sino que también aporta al desarrollo de tecnologías asequibles, replicables y orientadas al bienestar comunitario, promoviendo así la adopción de soluciones inteligentes en el ámbito de la vivienda.

Palabras clave: Internet de las cosas, microcontrolador, válvulas, gas licuado de petróleo, detección de fugas, automatización, monitoreo en tiempo real

ABSTRACT

Safety in the domestic use of Liquefied Petroleum Gas (LPG) is a critical component of household risk management, particularly in contexts where technical oversight of installations is limited. This research proposes the design and implementation of an Internet of Things (IoT)-based system aimed at the early detection of hazardous LPG concentrations, automatic activation of shut-off mechanisms, and real-time alert delivery to users.

The proposed system integrates low-cost gas sensors, programmable microcontrollers, actuators for flow control, and wireless communication modules, enabling seamless deployment in residential environments. The design follows a distributed architecture based on continuous monitoring, risk threshold identification, and the immediate execution of corrective responses. Through an applied and interdisciplinary approach, the project combines electronics, embedded programming, data networks, and automation principles to construct a comprehensive solution to LPG leakage risks.

Beyond its technical functionality, the system aims to promote a culture of prevention among end-users through accessible and user-friendly interaction tools. This work addresses the urgent need to enhance safety in domestic settings while contributing to the development of affordable, replicable technologies that improve community well-being and encourage the adoption of intelligent solutions in the residential sector.

Keywords: Internet of things, microcontroller, valves, liquefied petroleum gas, leak detection, automation, real-time monitoring.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

1.1 Tema de investigación

SISTEMA IOT PARA EL CONTROL Y MONITOREO DE FUGAS DE GLP EN ENTORNOS DOMÉSTICOS

1.1.1 Planteamiento del problema

El Gas Licuado de Petróleo (GLP) es una de las principales fuentes de energía utilizadas en el sector doméstico a nivel mundial, especialmente para la cocción de alimentos, calentadores de agua y calefacción. Su popularidad se debe a su eficiencia energética, bajo costo, facilidad de almacenamiento y transporte. De acuerdo con la International Energy Agency (IEA), más de 2.3 mil millones de personas utilizan GLP para fines domésticos [1]. No obstante, su uso conlleva riesgos importantes cuando no se cuenta con sistemas adecuados de seguridad, lo que puede desencadenar eventos peligrosos como intoxicaciones, incendios o explosiones.

En Ecuador, el GLP es la principal fuente de energía para uso doméstico, utilizada por el 92% de los hogares, según el Instituto Nacional de Estadística y Censos [2]. Esta alta dependencia ha generado múltiples incidentes relacionados con fugas y explosiones. En 2022, el Cuerpo de Bomberos de Quito reportó más de 200 emergencias por escapes de gas, muchas con consecuencias graves. Sin embargo, la mayoría de las viviendas no cuenta con sistemas de detección temprana ni mecanismos automáticos de cierre, lo que incrementa el riesgo de accidentes. Esta falta de prevención deja a las familias vulnerables ante eventos que podrían evitarse [3].

El uso de GLP en el hogar conlleva riesgos cuando no existen sistemas adecuados de monitoreo y control. Las fugas pueden originarse por fallas en válvulas, cilindros deteriorados o conexiones defectuosas [4]. Sin detección temprana, el gas puede acumularse y causar intoxicaciones, incendios o explosiones. Muchos hogares carecen de sensores que alerten sobre niveles peligrosos, lo que impide una respuesta oportuna. Además, la ausencia de mecanismos automáticos de cierre obliga a una acción manual,

que no siempre es posible o inmediata, incrementando así la vulnerabilidad de las familias ante emergencias [5].

Esta situación se ve agravada por la limitada cultura preventiva y la escasa revisión técnica de cilindros, mangueras y conexiones, permitiendo que fallos pequeños pasen desapercibidos por largos periodos [5].

Esta problemática refleja una brecha crítica entre el uso masivo del GLP y las medidas efectivas para garantizar su manejo seguro en el entorno doméstico. A pesar del evidente riesgo, la mayoría de las soluciones actuales no abordan de manera integral la prevención, detección y respuesta ante fugas. La inexistencia de tecnologías asequibles que combinen supervisión continua, alertas inmediatas y control autónomo del suministro agrava la exposición de las familias a eventos potencialmente catastróficos.

La persistencia de esta problemática evidencia una brecha significativa entre la alta dependencia del GLP en los hogares y la ausencia de mecanismos eficaces para su monitoreo y control. Aunque existen tecnologías capaces de detectar fugas, su adopción en el entorno doméstico es limitada debido a factores como el desconocimiento, el costo o la falta de soluciones integrales accesibles. Esta situación deja a las familias expuestas a eventos que podrían prevenirse con sistemas de detección temprana y respuestas automáticas. Por tanto, el análisis de esta situación revela la necesidad de soluciones que aborden no solo la detección, sino también la reacción oportuna ante incidentes relacionados con el GLP.

1.2 Antecedentes investigativos

En la actualidad, la incorporación de tecnologías basadas en el Internet de las Cosas (IoT) en el ámbito de la seguridad doméstica ha cobrado gran relevancia. A medida que los costos de los componentes electrónicos disminuyen y las plataformas de desarrollo se hacen más accesibles, crece el interés por aplicar soluciones inteligentes que permitan detectar y responder ante emergencias en tiempo real. La tendencia investigativa muestra un avance progresivo desde sistemas sofisticados y de alto nivel técnico, hacia propuestas más accesibles, adaptadas a contextos locales y aplicables directamente en entornos domésticos.

En el contexto ecuatoriano se destaca el trabajo Chérrez y Vintimilla que en 2022 desarrollaron un prototipo de sistema IoT para la detección de fugas de gas GLP en viviendas, utilizando un sensor MQ-2 y un microcontrolador NodeMCU ESP8266. Los resultados obtenidos confirmaron la eficacia del sistema, evidenciando su capacidad para detectar concentraciones anómalas de gas y generar alertas en tiempo real, tanto mediante alarmas sonoras dentro del hogar como a través de notificaciones por WhatsApp cuando los usuarios se encontraban fuera de la vivienda. Además, las pruebas demostraron que la solución propuesta contribuye a la seguridad doméstica, permitiendo una respuesta oportuna ante situaciones de riesgo, a un costo accesible y utilizando herramientas de software libre, lo que facilita su implementación en entornos de bajos recursos [5].

En India, Jagadish y Sonam en 2023 desarrollaron un sistema IoT para la detección de fugas de GLP en entornos residenciales, integrando sensores MQ-6 conectados a un microcontrolador NodeMCU. El sistema incorporó un módulo GSM para envío de alertas, un servomotor para el cierre automático de la válvula, un extractor de gases y un sistema de rociadores ante presencia de fuego. Los resultados evidenciaron que el sistema tiene un funcionamiento eficaz, activando de forma automática las alarmas, cerrando válvulas, encendiendo ventilación y enviando notificaciones a los usuarios incluso a distancia. Además, la integración con la plataforma IoT ThingSpeak permitió visualizar en tiempo real los niveles de gas y las incidencias registradas, confirmando la utilidad de la propuesta tanto en viviendas como en instituciones educativas para mitigar riesgos asociados a fugas de GLP [6].

En el estudio realizado por Barajas y Monroy del Tecnológico Nacional de México en 2023, se desarrolló una plataforma robótica móvil equipada con sensores MQ-6, GPS y una cámara ESP32-CAM, diseñada para detectar fugas de GLP en distintos entornos. Los resultados mostraron que la plataforma robótica es efectiva en la navegación autónoma, la detección de GLP y la transmisión de coordenadas geográficas junto con imágenes en tiempo real. Las pruebas experimentales evidenciaron que el robot fue capaz de detectar fugas de GLP incluso a una altura de 1.5 metros, enviar notificaciones inmediatas al usuario mediante una aplicación móvil, y visualizar la ubicación exacta de la fuga a través de la plataforma IoT Firebase, validando su aplicación en espacios domésticos, académicos y de riesgo [7].

En el trabajo publicado por Camargo y Alarcon en el 2024 se desarrolló un sistema IoT para el monitoreo del nivel de gas en tanques domésticos, utilizando visión artificial y una cámara ESP32-CAM. El sistema interpreta la lectura de un manómetro analógico y permite visualizar el estado del gas mediante una aplicación web. Los resultados evidenciaron que el prototipo presentó un funcionamiento correcto, logrando capturar e interpretar con precisión las mediciones. Además, las pruebas demostraron que el sistema permitió el registro histórico de datos, el monitoreo continuo y el acceso remoto, aportando a la prevención de riesgos por fallas en el suministro de GLP [8].

En India, Murty y Dhanikonda en 2024 desarrollaron un sistema de detección de fugas de GLP utilizando tecnología IoT, orientado a aplicaciones domésticas e industriales. El sistema se basa en un sensor MQ-6, un módulo GSM para envío de alertas por SMS y una válvula solenoide que se activa automáticamente al detectar una fuga. Durante las pruebas, el sistema demostró una respuesta rápida y confiable, logrando cortar el suministro de gas y alertar al usuario sin intervención manual. Su bajo costo, facilidad de montaje y autonomía lo convierten en una alternativa práctica para entornos con acceso limitado a tecnologías más complejas [9].

Por otro lado, en India, Niveditha y Harshini en 2025 desarrollaron un sistema de detección de fugas de GLP con tecnología IoT, orientado a entornos domésticos e industriales. El sistema integra un sensor MQ-6, un módulo GSM para alertas por SMS, un módulo GPS para ubicación y una válvula solenoide para el cierre automático

del gas. Los resultados demostraron que el sistema reaccionó de manera rápida y confiable, activando alarmas, cortando el suministro de gas y notificando al usuario con la ubicación del evento. Además, las pruebas evidenciaron su bajo costo, fácil montaje y utilidad en espacios con acceso limitado a tecnologías avanzadas [10].

Los antecedentes revisados muestran cómo el IoT ha ido avanzando desde soluciones complejas y costosas, hasta propuestas más accesibles y adaptadas a las necesidades reales de los hogares. Se evidencia una clara línea de tendencia en sistemas que detecten a tiempo situaciones de riesgo. Esta investigación busca continuar esa línea, proponiendo un sistema que combine detección, cierre automático y alertas en tiempo real, pensado especialmente para la seguridad de las familias que usan GLP en casa.

1.3 Fundamentación teórica

1.3.1 Gas Licuado de Petróleo (GLP)

a) Características y Composición

El Gas Licuado de Petróleo (GLP) es una mezcla compuesta principalmente por propano y butano, obtenida tanto del refinado del petróleo como de la separación de gases en plantas de procesamiento de gas natural. En Ecuador, por ejemplo, se utiliza una mezcla típica del 60 % de propano y 40 % de butano [11]

- A temperatura y presión ambientales es gaseoso, pero se convierte en líquido mediante compresión o enfriamiento, facilitando su almacenamiento y transporte
- Su densidad en fase gaseosa es aproximadamente 1.7 veces la del aire, por lo que tiende a acumularse en zonas bajas en caso de fuga
- Como hidrocarburo, es incoloro e inodoro, por lo que se adicionan mercaptanos como odorizantes para mejorar la detección por olor
- Presenta puntos de ebullición alrededor de $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$ para el propano y $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ para el butano, lo que asegura su licuado en condiciones normales manejables

- Su presión de vapor varía según composición y temperatura, oscilando típicamente entre 2–8 bar a 20–25 °C
- Tiene un alto poder calorífico, aproximadamente 11 000 kcal/kg (≈ 46 MJ/kg), comparable al propano (11 082 kcal/kg) y butano (10 938 kcal/kg)

Tabla 1. Componentes y propiedades del Gas Natural y del GLP [12]

Nombre del Gas	Componente Principal	Observación	PCS volumen kWh/m ³	PCS masa kWh/kg	Índice de Wobbe (MJ/m ³)	Límites de inflamabilidad	Odorante
Gas manufacturado	Metano + H ₂ + CO	Tóxico, en desuso	5,23	-----	19,13 a 27,64	6 a 45	
Gas Natural	Metano CH ₄	No tóxico Inodoro Incoloro	12,2	-----	39,1 a 54,7	5 a 15	Tetra hidrotiofeno
GLP	Propano C ₃ H ₈	No tóxico Inodoro Incoloro	27,29	14,0	72,9 a 87,3	2,4 a 9,5	Mercaptano
	Butano C ₄ H ₁₀	No tóxico Inodoro Incoloro	36,0	13,95	-----	1,8 a 8,4	Mercaptano

b) Usos domésticos del GLP

El Gas Licuado de Petróleo tiene una amplia gama de usos domésticos debido a su alto poder calorífico, facilidad de transporte y relativa seguridad cuando se maneja adecuadamente.

En el entorno doméstico, se utiliza principalmente como fuente de energía para:

- **Cocción de alimentos:** Es el uso más común en los hogares. El GLP alimenta cocinas y hornillas, brindando una fuente de calor regulable y eficiente para preparar alimentos. En Ecuador, más del 90 % de los hogares lo utilizan para este fin [13].
- **Calentamiento de agua:** Se utiliza en calefones o calentadores de agua a gas para uso sanitario, proporcionando agua caliente de manera continua sin requerir electricidad [14].
- **Calefacción ambiental:** En zonas frías, el GLP se emplea en estufas y sistemas de calefacción doméstica, permitiendo mantener ambientes interiores confortables [13].

- **Secado de ropa:** Algunos hogares cuentan con secadoras de ropa, que funcionan con GLP, siendo más eficientes en términos energéticos que las eléctricas [13].

c) Instalación de GLP

En Ecuador, la instalación de sistemas de gas licuado de petróleo (GLP) en entornos domésticos está regulada por normativas técnicas que buscan garantizar la seguridad de los usuarios y la eficiencia del sistema. Estas instalaciones deben ejecutarse conforme a lo establecido en la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 116-3, que regula específicamente los requisitos para sistemas de distribución de GLP en instalaciones internas [15]. La conexión desde el cilindro hacia los artefactos de consumo como cocinas o calefones debe realizarse mediante tuberías de materiales certificados, válvulas de corte, reguladores de presión y accesorios normalizados, garantizando la hermeticidad del sistema.

Además, la Norma NEC INEN 2260 establece requisitos adicionales sobre diseño, instalación y mantenimiento, orientados a minimizar riesgos de fuga, acumulación de gas y explosiones [12]. Estas instalaciones deben ser ejecutadas como se muestra en la Figura 1 el diagrama de instalación del cilindro de GLP, tal como lo exigen los marcos normativos ecuatorianos, y deben someterse a pruebas de presión y verificación funcional para su posterior certificación. La correcta aplicación de estas normativas no solo garantiza el cumplimiento legal, sino que constituye un pilar esencial para la prevención de accidentes domésticos relacionados con el GLP.



Figura 1. Diagrama técnico de una instalación de GLP con conexión a cocina [13].

d) Políticas públicas de acceso a GLP

El acceso al Gas Licuado de Petróleo (GLP) en el Ecuador ha sido una prioridad dentro de las políticas públicas de seguridad energética y equidad social. A través de programas estatales impulsados por el Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, se ha establecido un sistema de distribución nacional que garantiza el intercambio gratuito de cilindros de 15 kg de GLP, sin importar el color o la marca comercial, como lo establece la campaña comunicacional del ARCH (Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables). Esta medida busca asegurar el abastecimiento continuo del gas doméstico, especialmente en sectores vulnerables y rurales, promoviendo la inclusión energética y evitando prácticas monopólicas o especulativas en la comercialización del combustible. Asimismo, el Estado mantiene un régimen de subsidios al GLP, permitiendo que millones de hogares accedan a esta fuente energética [16].



Figura 2. Identificación visual de cilindros de gas en Ecuador [16]

e) Tipos de cilindros de GLP

En el mercado ecuatoriano, los cilindros de GLP se comercializan en una amplia gama de capacidades que van desde los 3 kg hasta los 50 kg, dependiendo del tipo de uso: doméstico, comercial o industrial. La Figura 3 ilustra las presentaciones más comunes, siendo el cilindro de 15 kg el más utilizado en entornos residenciales por su portabilidad, capacidad y disponibilidad. Esta diversidad de tamaños permite adaptar el suministro de gas a diferentes necesidades energéticas, optimizando su uso en función del consumo [17].



Figura 3. Capacidades de cilindros de GLP en el mercado [18]

La Tabla 2 presenta la clasificación de los cilindros de GLP según su uso, capacidad y sistema de identificación. En el ámbito doméstico, se utilizan cilindros de 5 kg, 10 kg y 15 kg, empleados en cocinas, calefones y secadoras, identificados por el color asignado por la comercializadora. En aplicaciones industriales, como restaurantes y hornos o industrias predominan los cilindros de 15 kg y 45 kg, los cuales incluyen una válvula industrial adicional como medida de seguridad y diferenciación técnica [16], [18].

Tabla 2. Clasificación de GLP

Categoría	Capacidad	Uso	Identificación
Domestico	5kg, 10kg, 15kg	Cocina, calefón, secadora	Color registrado por comercializadora
Industrial	15kg, 45kg	Restaurantes, hornos, industrias	Color + válvula industrial

1.3.2 Internet de las Cosas (IoT)

El Internet de las Cosas es un paradigma tecnológico que describe la interconexión de objetos físicos a través de redes digitales, permitiéndoles recopilar, transmitir y procesar datos de forma autónoma y en tiempo real. Estos objetos, también llamados “cosas”, pueden incluir sensores, actuadores, electrodomésticos, vehículos, dispositivos médicos, entre otros, los cuales están equipados con capacidades de comunicación, procesamiento y almacenamiento [19].



Figura 4. Aplicaciones del IoT en los diferentes enfoques [20]

El objetivo del IoT es facilitar la interacción entre el mundo físico y los sistemas digitales, optimizando procesos, automatizando tareas y generando información útil para la toma de decisiones. Este ecosistema se apoya en tecnologías como redes inalámbricas, computación en la nube, inteligencia artificial, big data y protocolos de comunicación especializados, lo que lo convierte en una herramienta clave para el desarrollo de soluciones inteligentes en sectores como la industria, la salud, el transporte, la agricultura y la seguridad doméstica [21], [22].

a) Arquitectura del IoT

La arquitectura del Internet de las Cosas (IoT) está compuesta por un conjunto de capas funcionales interrelacionadas que permiten la captura, transmisión, procesamiento y presentación de datos provenientes de dispositivos físicos conectados. Esta estructura jerárquica permite construir sistemas inteligentes capaces de interactuar con el entorno y de automatizar procesos en tiempo real [20].

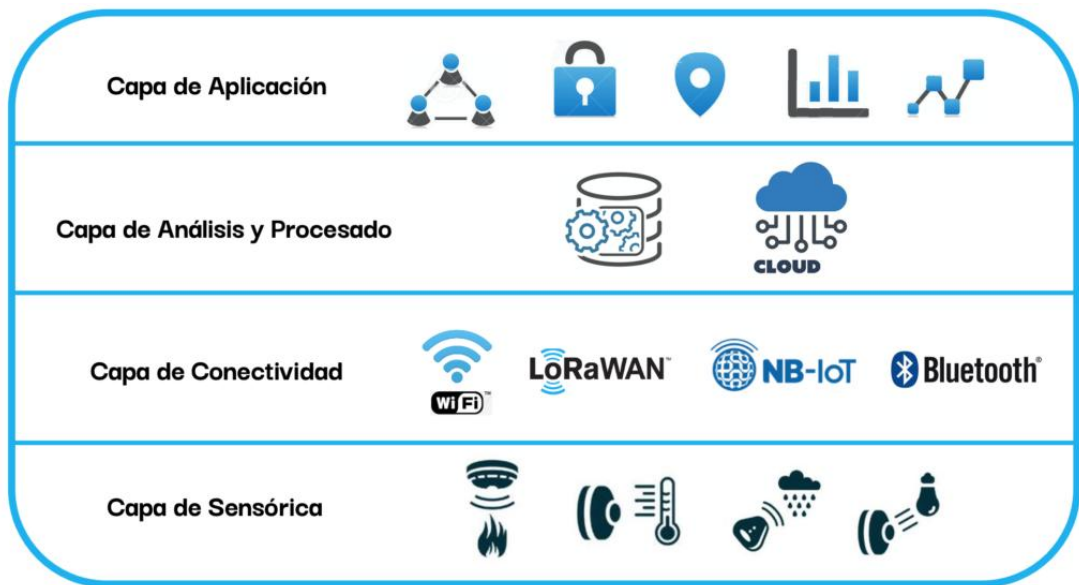


Figura 5. Capas de arquitectura IoT [23]

- **Capa de percepción:** Es la base del sistema IoT y se encarga de captar datos físicos del entorno mediante sensores. Estos dispositivos permiten medir variables como temperatura, gas, humedad, movimiento o luz. La información recolectada se transmite a los niveles superiores para su análisis [24].
- **Capa de red o comunicación:** Esta capa permite la transmisión de datos entre sensores y sistemas de procesamiento utilizando tecnologías de comunicación como Wi-Fi, LoRaWAN, NB-IoT o Bluetooth. La elección del protocolo depende de factores como alcance, consumo energético y ancho de banda requerido [24].
- **Capa de análisis y procesamiento:** En esta capa se almacenan, procesan y analizan los datos recibidos. Esto puede realizarse localmente (edge computing) o en la nube (cloud computing), utilizando bases de datos, motores de reglas, algoritmos de aprendizaje automático [24].

- **Capa de aplicación:** Su función principal es proporcionar interfaces de interacción donde se pueda visualizar la información procesada, acceder a reportes, recibir alertas en tiempo real y gestionar el control de dispositivos conectados. Facilita la toma de decisiones mediante herramientas gráficas, aplicaciones móviles, páginas web u otros entornos de visualización, permitiendo tanto la supervisión como la ejecución de acciones automáticas o manuales [24].

1.3.3 Protocolos de Comunicación

a) Protocolos de red o enlace

Los protocolos de red o de enlace son fundamentales para la transmisión de datos entre los sensores, los nodos de borde (edge nodes) y los gateways. Su elección depende del entorno, el alcance, el consumo energético, la velocidad de transmisión y los costos operativo

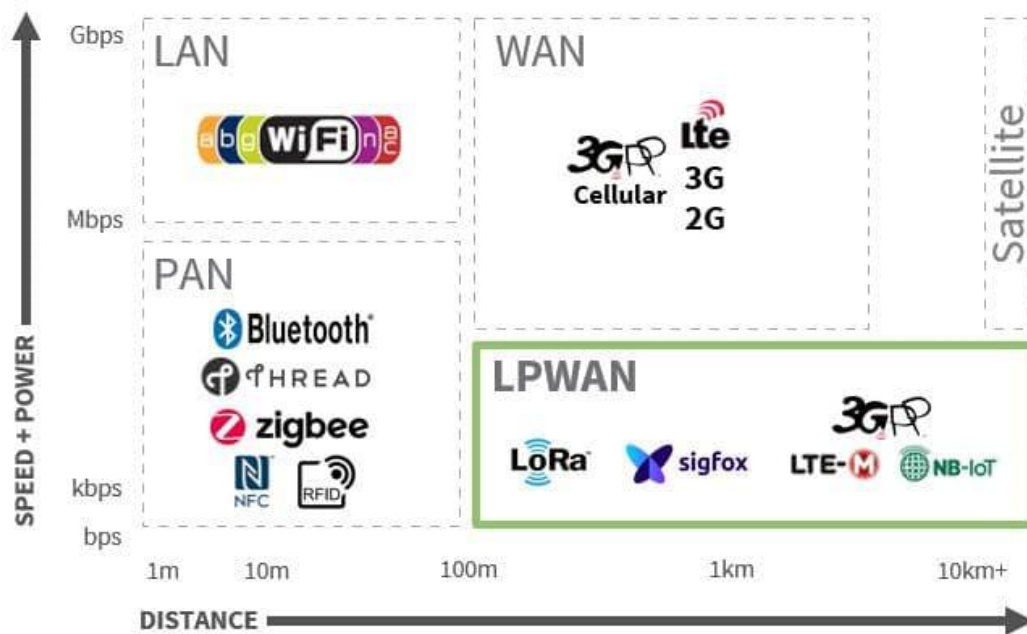


Figura 6. Comparativa de tecnologías de comunicación inalámbrica en IoT según alcance y velocidad [25]

- **Wi-Fi (IEEE 802.11):** Es uno de los protocolos más comunes en entornos domésticos debido a su alta velocidad de transmisión y disponibilidad. Sin embargo, presenta un consumo energético elevado, lo cual lo hace menos adecuado para dispositivos alimentados por batería [26].



Figura 7. Aplicaciones y usos de wifi [27]

- **Bluetooth Low Energy (BLE):** Diseñado para aplicaciones de corto alcance que requieren bajo consumo, como dispositivos portátiles o sensores personales. BLE permite conexiones eficientes en términos energéticos, lo que lo convierte en una opción popular en aplicaciones móviles y de salud [26].



Figura 8. Aplicaciones y usos de BLE [28]

- **LoRa y LoRaWAN:** Son tecnologías de modulación y protocolos de red de baja potencia y largo alcance. LoRaWAN permite la comunicación entre dispositivos en entornos rurales o industriales donde no existe cobertura Wi-Fi o celular, con una topología tipo estrella y una alta eficiencia energética [26].

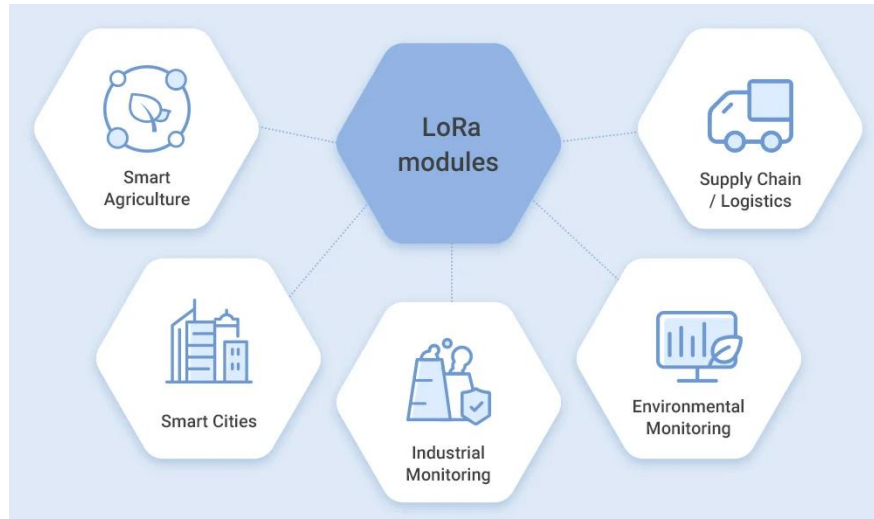


Figura 9. Aplicaciones y usos de LoRa [29]

- **NB-IoT (Narrowband IoT):** Es una tecnología basada en redes celulares que ofrece cobertura extendida, alta penetración en interiores y consumo reducido. Está diseñada para comunicaciones M2M (machine-to-machine) y es ideal para aplicaciones que requieren bajo ancho de banda y gran alcance [30]

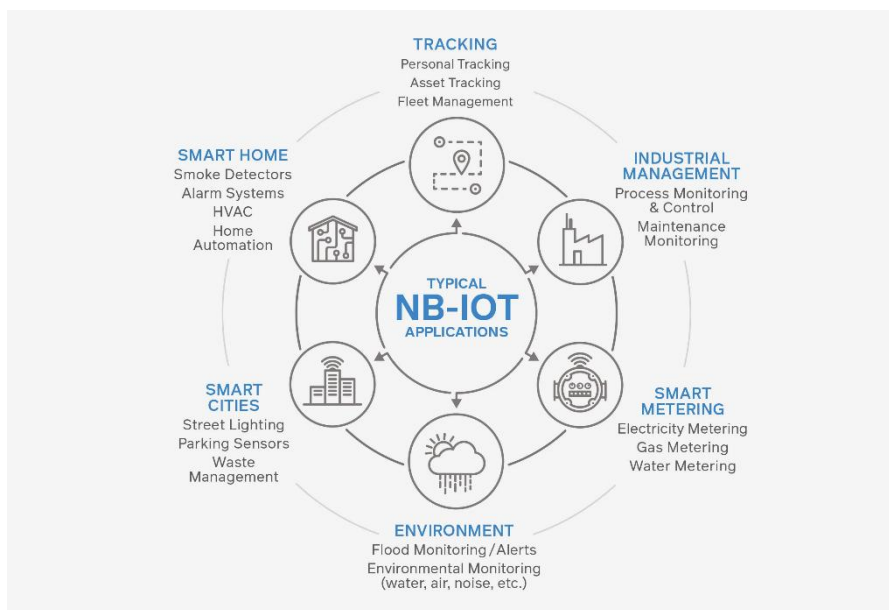


Figura 10. Aplicaciones y usos de NB-IoT [31]

- **ZigBee y Z-Wave:** Son protocolos de corto alcance que operan en topologías malladas (mesh) y se utilizan ampliamente en domótica y automatización del hogar. ZigBee se basa en el estándar IEEE 802.15.4 y permite la interoperabilidad entre distintos dispositivos de bajo consumo [32]

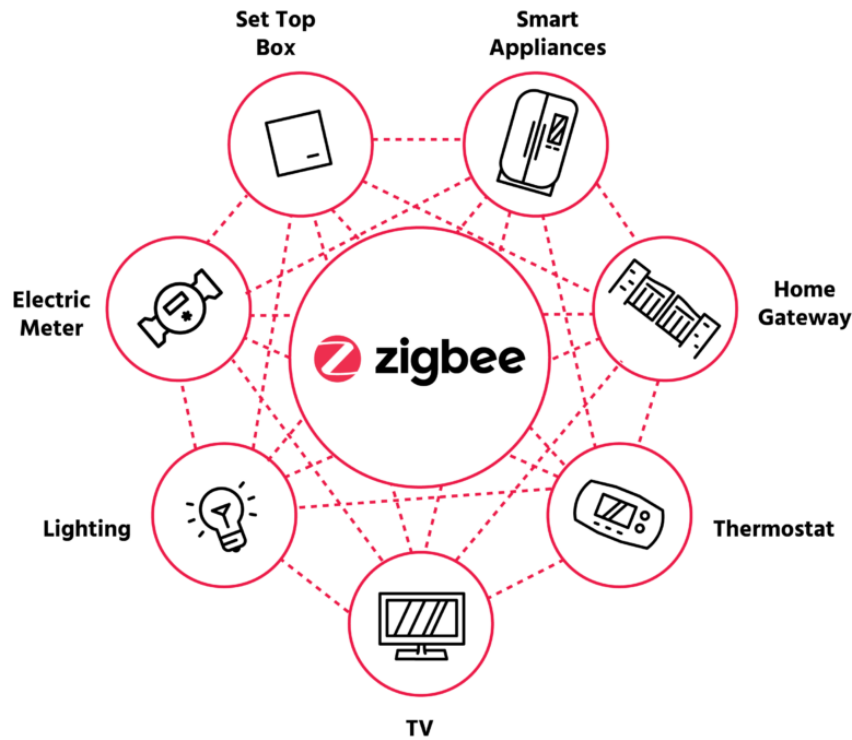


Figura 11. Aplicaciones y usos de ZigBee [33]

b) Protocolos de aplicación

Los protocolos de aplicación son componentes esenciales en la arquitectura del Internet de las Cosas (IoT), ya que permiten el intercambio estructurado y eficiente de información entre los dispositivos sensores, actuadores, gateways intermedios y las plataformas de gestión o almacenamiento en la nube. Su función no se limita únicamente al envío y recepción de datos, sino que también define el formato del mensaje, la sintaxis de las operaciones, las reglas de acceso y la forma de interacción entre dispositivos heterogéneos que pueden operar con distintas arquitecturas, sistemas operativos y capacidades [34].

A través de estos protocolos se habilita la comunicación M2M (machine-to-machine) y D2C (device-to-cloud), estableciendo mecanismos para el envío de datos en tiempo real o diferido, la confirmación de recepción, la priorización de mensajes y la gestión de errores. Además, muchos de estos protocolos están diseñados para operar eficientemente en entornos con limitaciones de ancho de banda, latencia elevada, topologías distribuidas o dispositivos con recursos restringidos (memoria, procesamiento y energía) [34].

- **MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)**

Es un protocolo de comunicación ligero, diseñado específicamente para dispositivos con recursos limitados y redes con restricciones de ancho de banda, latencia o disponibilidad. Su eficiencia lo convierte en una solución ideal para aplicaciones del Internet de las Cosas (IoT), donde la optimización del consumo energético y la fiabilidad en entornos inestables son fundamentales [35].

Trabaja bajo una arquitectura de publicador/suscriptor, en la cual los dispositivos publicadores envían mensajes a un intermediario central denominado broker, y los dispositivos suscriptores reciben solo los mensajes de los temas a los que se han suscrito. Esta separación entre los productores y consumidores de datos permite una comunicación asincrónica, escalable y desacoplada, facilitando la integración de múltiples nodos sin una conexión directa entre ellos [35].

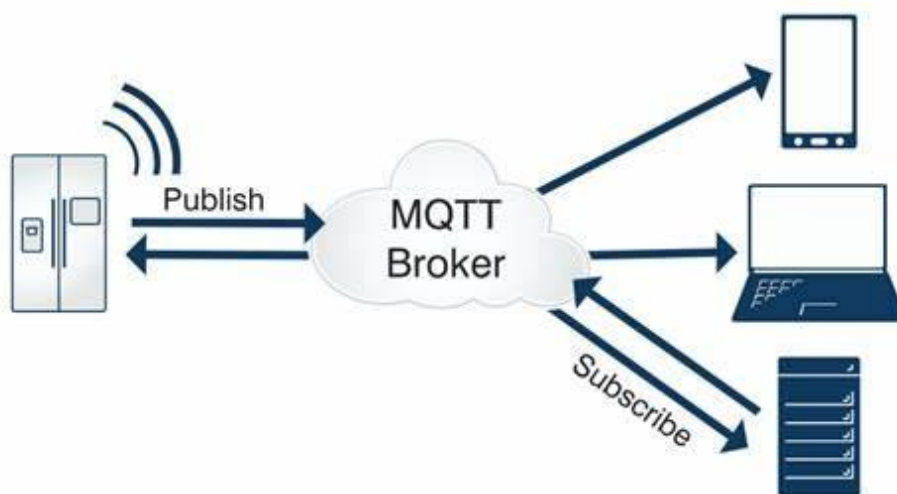


Figura 12. Interacción del protocolo MQTT [36]

- **CoAP (Constrained Application Protocol)**

Es un protocolo de comunicación diseñado específicamente para dispositivos con recursos limitados, tales como sensores embebidos, nodos de baja potencia o microcontroladores utilizados en entornos IoT. A diferencia de protocolos más robustos como HTTP, CoAP está optimizado para funcionar en redes con anchos de banda restringidos y en dispositivos que cuentan con limitaciones de procesamiento, memoria y energía [37].

CoAP opera sobre el protocolo de transporte UDP (User Datagram Protocol), lo cual permite reducir la sobrecarga en la transmisión de mensajes, favoreciendo la eficiencia energética y la baja latencia. Su estructura se basa en el modelo RESTful, similar a HTTP, permitiendo operaciones básicas como GET, POST, PUT y DELETE, pero con encabezados mucho más livianos (a partir de 4 bytes), ideales para su uso en redes de sensores inalámbricos o entornos M2M (Machine to Machine) [38].

Una característica importante de CoAP es su capacidad para integrarse con redes IPv6 mediante mecanismos como 6LoWPAN, permitiendo el direccionamiento eficiente de nodos en redes IoT extensas. Además, incluye funcionalidades como retransmisiones, confirmaciones y mensajes observables (observe), lo cual lo hace robusto pese a su diseño minimalista [38].

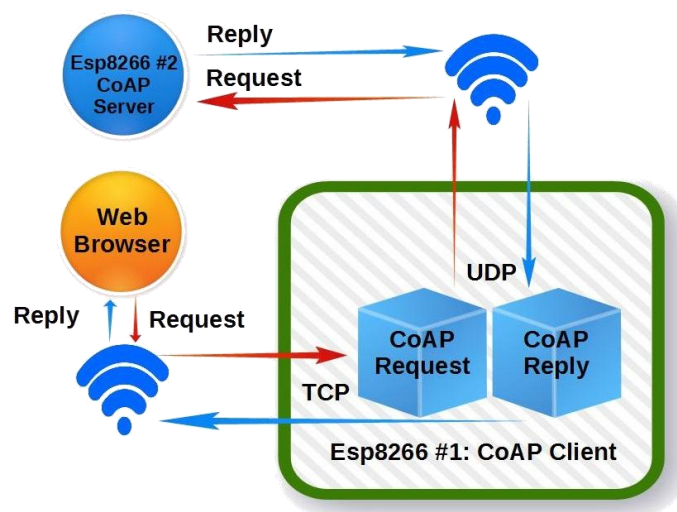


Figura 13. Arquitectura de funcionamiento del protocolo CoAP [39]

- **HTTP/HTTPS**

El protocolo HTTP (Hypertext Transfer Protocol) y su versión segura HTTPS (con cifrado TLS/SSL) continúan siendo ampliamente utilizados en aplicaciones IoT, a pesar de no estar específicamente diseñados para dispositivos con restricciones de recursos. Su principal ventaja radica en su compatibilidad universal con tecnologías web y su capacidad para integrarse fácilmente con APIs RESTful, servidores web, bases de datos y servicios en la nube [40].

HTTP opera sobre el protocolo de transporte TCP y utiliza el modelo de comunicación cliente-servidor, lo que facilita la conexión de dispositivos IoT a plataformas existentes sin necesidad de adaptar infraestructura o desarrollar soluciones propietarias. Si bien presenta una mayor sobrecarga en comparación con protocolos optimizados como MQTT o CoAP, sigue siendo útil en entornos donde los dispositivos cuentan con recursos suficientes, la estabilidad de la red es alta y se requiere el uso de servicios web estándar [40].

La versión segura, HTTPS, añade una capa de cifrado mediante el protocolo TLS (Transport Layer Security), lo que resulta fundamental en aplicaciones donde se manejan datos sensibles, como en la salud digital, domótica, seguridad ciudadana o servicios financieros. Este cifrado protege la integridad y confidencialidad de la información transmitida, minimizando el riesgo de ataques de intermediarios o suplantación [41].

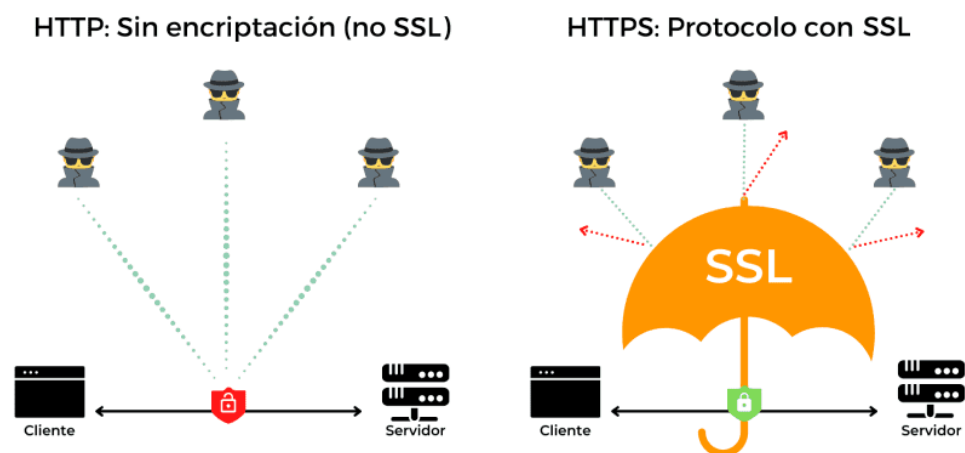


Figura 14. Protocolos http y https [42]

- **AMQP (Advanced Message Queuing Protocol)**

Es un protocolo abierto y estandarizado para la mensajería orientada a middleware, diseñado para garantizar una entrega fiable, ordenada y segura de mensajes entre aplicaciones distribuidas. Aunque no fue creado específicamente para el entorno IoT, se ha adoptado en ciertas implementaciones donde se requiere alta robustez, interoperabilidad y tolerancia a fallos, como en sistemas industriales, financieros o de misión crítica [43].

AMQP opera sobre TCP y proporciona características avanzadas como enrutamiento flexible de mensajes, colas persistentes, confirmaciones de recepción (acknowledgement), autenticación, control de acceso, y transacciones. AMQP está diseñado para aplicaciones empresariales donde la integridad de los datos y la fiabilidad de la comunicación son prioritarias, incluso en condiciones adversas o entornos con múltiples intermediarios [44].

En el contexto del Internet de las Cosas, AMQP es menos común en dispositivos de bajo consumo, ya que requiere mayor capacidad de procesamiento, almacenamiento y conectividad. Sin embargo, puede implementarse eficientemente en gateways, servidores intermedios o en la capa de aplicación de arquitecturas IoT más complejas, donde actúa como puente entre dispositivos y plataformas de gestión o análisis de datos [44].

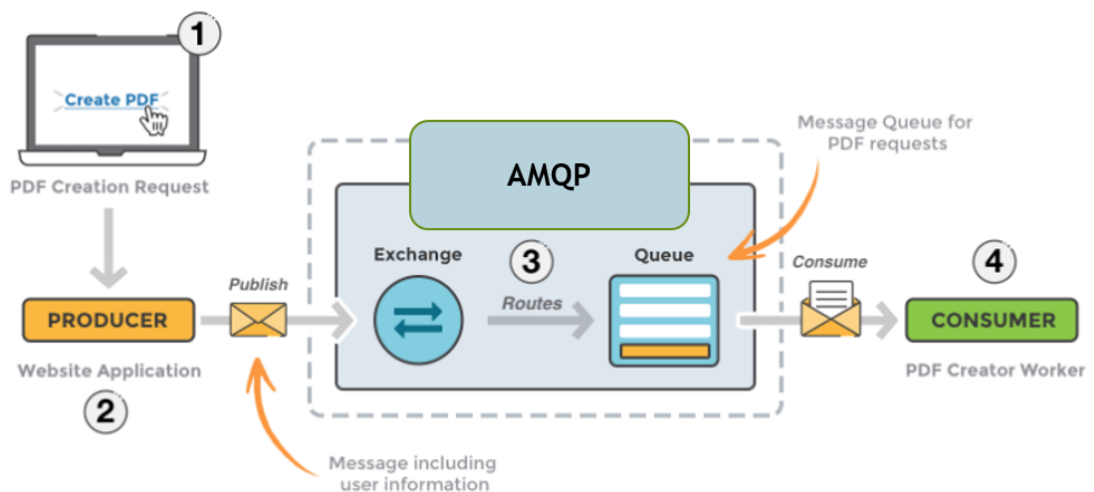


Figura 15. Funcionamiento del protocolo AMQP [45]

1.3.4 Monitoreo y Control en Sistemas IoT

El monitoreo remoto se refiere al proceso de recopilación y supervisión continua de variables físicas, químicas o digitales a distancia, utilizando sensores, dispositivos de comunicación y plataformas de visualización. Este proceso permite detectar condiciones anómalas, evaluar el estado de un sistema o entorno en tiempo real, y almacenar registros históricos para su posterior análisis [46].

Por otro lado, el control remoto implica la capacidad de ejecutar acciones o modificar el comportamiento de un sistema desde una ubicación distinta a la de operación física. Esto puede incluir el encendido o apagado de dispositivos, la activación de mecanismos de seguridad, o la modificación de parámetros operativos. Ambos procesos suelen estar integrados en plataformas digitales que permiten la interacción entre el usuario y el sistema, facilitando la toma de decisiones basada en datos [46].

En conjunto, el monitoreo y el control remoto permiten mejorar la eficiencia operativa, la seguridad, la capacidad de respuesta y la gestión preventiva de fallas. Estos conceptos son aplicables a una amplia variedad de contextos, incluyendo domótica, sistemas industriales, energía, salud, agricultura y gestión ambiental. Su implementación requiere la integración de sensores, microcontroladores, protocolos de comunicación y plataformas de análisis, asegurando una arquitectura confiable y segura para la supervisión distribuida [46].

Interacción Máquina a Máquina (M2M) es un paradigma de comunicación en el que dos o más dispositivos electrónicos intercambian información de manera automática y sin intervención humana, a través de redes cableadas o inalámbricas. Esta tecnología permite que sensores, actuadores, controladores y otros equipos embebidos recopilen datos, tomen decisiones locales o remotas y ejecuten acciones de control en tiempo real. M2M constituye la base operativa de muchos sistemas automatizados y es uno de los pilares tecnológicos del Internet de las Cosas (IoT) [47].

1.3.5 Sensores MQ

Los sensores de la serie MQ constituyen una familia de sensores de gas basados en tecnología de semiconductores, ampliamente utilizados en aplicaciones de detección de gases inflamables, tóxicos y contaminantes en ambientes industriales, domésticos y académicos. Estos dispositivos se destacan por su bajo costo, facilidad de uso, rápida respuesta y versatilidad, lo que los convierte en una solución accesible para sistemas de monitoreo ambiental y seguridad [48].

El principio de funcionamiento de los sensores MQ se basa en la variación de la conductividad eléctrica de un material sensible, comúnmente óxido de estaño (SnO_2), cuando entra en contacto con gases presentes en el ambiente. En condiciones normales, este material actúa como un semiconductor tipo n; sin embargo, en presencia de gases reductores (como metano, propano, monóxido de carbono, etc.), se produce una transferencia de electrones que modifica la resistencia del sensor. Esta variación de resistencia se traduce en una señal eléctrica que puede ser leída y procesada mediante un microcontrolador [48].

Los sensores MQ requieren un ciclo de calentamiento (precalentamiento) para alcanzar una temperatura de funcionamiento estable, ya que integran un elemento calefactor que mantiene activo el proceso de detección [49].



Figura 16. Sensores de gases MQ [50]

La Figura 17 y Figura 18 presentan las curvas de sensibilidad del sensor MQ-5 y MQ-6, que indican la relación entre la resistencia del sensor (R_s) y su resistencia base en aire limpio (R_o) frente a diferentes concentraciones de gases. Este sensor es capaz de detectar una variedad de gases inflamables, como GLP, CH_4 , H_2 , CO y alcohol, siendo más sensible al GLP, como se observa en la caída más pronunciada de su curva. A medida que aumenta la concentración de gas, la resistencia del sensor disminuye, permitiendo inferir la presencia y cantidad de gas mediante la conversión de voltaje a ppm [51], [52].

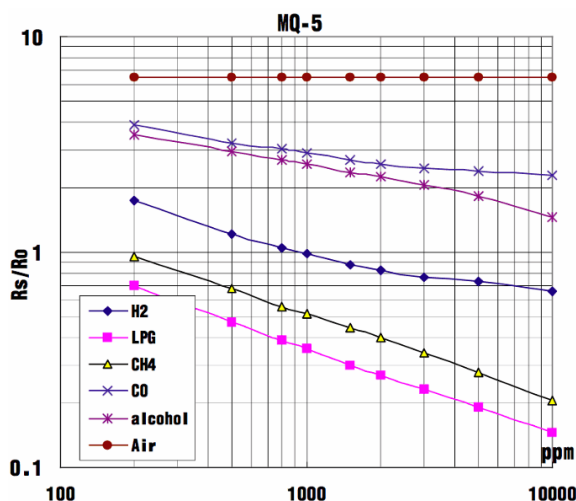


Figura 17. Sensibilidad del sensor MQ-5 frente a distintos gases [51]

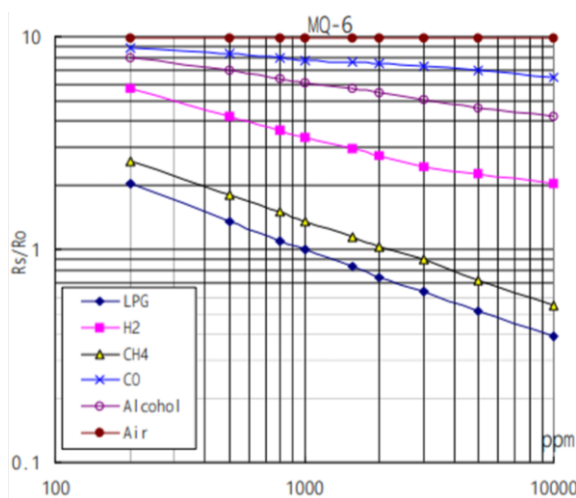


Figura 18. Sensibilidad del sensor MQ-6 frente a distintos gases [52]

La Tabla 3 resume las principales características de los sensores de gases pertenecientes a la serie MQ, ampliamente utilizados en aplicaciones de monitoreo ambiental, seguridad industrial y detección de fugas. Cada modelo presenta una sensibilidad diferenciada ante determinados compuestos químicos, tales como metano, butano, GLP, monóxido de carbono, hidrógeno, alcoholes, amoníaco y otros gases inflamables o tóxicos. Estos sensores funcionan mediante la variación de su resistencia interna ante la presencia de un gas objetivo, lo que permite obtener una señal eléctrica proporcional a la concentración de este [51].

Tabla 3. Tipos de sensores MQ y sus gases detectables

Modelo	Sustancias detectadas
MQ-2	Metano, butano, GLP, humo
MQ-3	Alcohol, etanol, humo
MQ-4	Metano, gas natural comprimido (GNP)
MQ-5	Gas natural, GLP
MQ-6	Butano, GLP
MQ-7	Monóxido de carbono
MQ-8	Hidrógeno
MQ-9	Monóxido de carbono
MQ-131	Ozono
MQ-135	Monóxido de carbono, benceno, amoníaco alcohol y humo
MQ-137	Amoníaco

El sensor MQ-5 presenta un conjunto de características técnicas que lo hacen adecuado para aplicaciones de detección de gases inflamables en entornos controlados o integrados. Como se muestra en la Tabla 4, estos parámetros permiten comprender sus condiciones óptimas de operación, límites de detección y requerimientos eléctricos, lo cual es fundamental para garantizar una implementación efectiva. Estas especificaciones deben ser consideradas al momento de diseñar circuitos de lectura, establecer umbrales de alarma y definir entornos de funcionamiento seguros [51].

Tabla 4. Especificaciones técnicas del sensor MQ-5

Especificaciones Técnicas	Valor
Voltaje de operación	5V DC
Corriente de operación	160 mA
Temperatura de operación	-10 a 50
Consumo de potencia	750 mW
Rango de detección	200 a 10000 ppm
Resistencia de detección Rs	10 K Ω - 60 K Ω / 5000ppm
Peso	9g

1.3.6 Microcontrolador ESP32

El ESP32 es un microcontrolador de alto rendimiento desarrollado por Espressif Systems, diseñado especialmente para aplicaciones del Internet de las Cosas (IoT), sistemas embebidos y automatización. Este chip integra en un solo paquete conectividad Wi-Fi 802.11 b/g/n y Bluetooth 4.2 (Classic y BLE), lo que permite el desarrollo de soluciones inalámbricas sin necesidad de módulos externos. Está basado en una arquitectura de doble núcleo (dual-core) de 32 bits Xtensa LX6, con velocidades de reloj que pueden alcanzar hasta 240 MHz, y cuenta con una memoria SRAM interna, así como soporte para memoria flash externa. Estas características hacen del ESP32 una plataforma eficiente para tareas que requieren procesamiento concurrente, conectividad estable y consumo energético optimizado [53].

Además, el ESP32 incorpora una amplia gama de periféricos integrados, tales como convertidores analógico-digitales (ADC), convertidores digital-analógicos (DAC), interfaces PWM, puertos UART, SPI, I²C, y sensores táctiles capacitivos, lo que le permite interactuar con una gran variedad de sensores y actuadores. Otra ventaja clave es su capacidad para operar en modo de bajo consumo energético (deep sleep), lo que lo hace ideal para aplicaciones alimentadas por batería o con requisitos de eficiencia energética [53].

Su entorno de desarrollo es flexible, compatible tanto con el Arduino IDE, como con ESP-IDF, lo cual ha contribuido a su popularidad entre desarrolladores, makers y académicos. Gracias a su combinación de potencia, conectividad y bajo costo, el ESP32 se ha convertido en uno de los microcontroladores más utilizados en soluciones de sensado remoto, automatización del hogar, sistemas de monitoreo ambiental y control industrial [53].



Figura 19. ESP32

Tabla 5. Especificaciones técnicas del ESP32

Especificaciones Técnicas	Valor
Voltaje de operación	5V
Consumo de corriente	5uA modo suspensión
Microprocesador	WROOM-32 SMD
Pines Digitales GPIO	24
Conversor Analógico Digital	2 ADC de 12 bits tipo SAR
Conectividad Wifi	802.11 b/g/n
Conectividad Bluetooth	4.2 BR/EDR y BLE
Frecuencia de reloj	80 a 240 MHz
Chip USB-Serial	CP2101/04
Dimensiones	55 x 27 mm
Peso	10g

1.3.7 Servomotor

Un servomotor es un dispositivo electromecánico capaz de convertir señales eléctricas de control en un movimiento mecánico preciso, normalmente de tipo angular. A diferencia de un motor eléctrico convencional que gira libremente de forma continua, el servomotor está diseñado para posicionarse en un ángulo específico dentro de un rango determinado, gracias a un sistema de realimentación (feedback) que le permite controlar con exactitud su posición, velocidad y aceleración [54].



Figura 20. Servomotor MG995 [55]

Para comprender las capacidades y limitaciones operativas de un servomotor, es fundamental revisar sus parámetros técnicos específicos. En la Tabla 6 se detallan las principales especificaciones técnicas del modelo MG995, ampliamente utilizado en sistemas de automatización por su alto torque, construcción robusta y buena compatibilidad con plataformas de desarrollo embebido [53].

Tabla 6. Especificaciones técnicas del servomotor MG995

Parámetro	Valor
Tipo	Servomotor de rotación limitada a 180°
Voltaje de operación	5v – 7.2v
Torque	9.4 kg x cm – 11 kg x cm
Corriente máxima	2.5 A
Peso	55 g

1.3.8 Puntos críticos de fuga en sistemas de distribución de GLP

Las fugas de Gas Licuado de Petróleo (GLP) en entornos domésticos pueden producirse en diversas partes del sistema de almacenamiento y distribución, muchas de ellas debido al desgaste, deficiencias de instalación, falta de mantenimiento o fallas de fabricación. Identificar estos puntos críticos de fuga es esencial para el diseño de sistemas de detección que permitan una respuesta oportuna y efectiva [56], [57].

Entre las zonas más comunes donde pueden originarse fugas de GLP se encuentran:

Válvula del cilindro: Es el principal mecanismo de control de salida del gas. Puede presentar fugas si se encuentra mal cerrada, deteriorada por el uso, corroída o si ha sufrido daño físico. Las fugas también pueden originarse en el eje del vástago o en la rosca si no está correctamente sellada [57].

Regulador de presión: Encargado de reducir la presión del gas al nivel adecuado para el consumo doméstico. Una fuga puede producirse por roturas internas, fisuras o mal acoplamiento con la válvula del cilindro [57].

Mangueras flexibles: Las mangueras de conexión entre el cilindro y los artefactos de consumo son componentes especialmente vulnerables. Pueden presentar fugas por envejecimiento del material, exposición al calor, grietas, pinchazos o desajustes en las conexiones. Por esta razón, diversos organismos especializados en seguridad recomiendan reemplazarlas periódicamente y asegurarse de que cuenten con certificación para uso con GLP, cumpliendo normas de resistencia, sellado y compatibilidad con gases combustibles [58].

Conectores y abrazaderas: Las uniones entre la manguera y otros elementos del sistema (regulador, artefacto de consumo) pueden tener fugas si no están correctamente fijadas. El uso de abrazaderas de baja calidad o mal ajustadas es una causa frecuente de escapes [58].

Hornillas o juntas de sellado: Estos pequeños elementos, ubicados en los extremos de los reguladores o conectores, garantizan la estanqueidad del sistema. El desgaste,

resequedad, o mal posicionamiento de estas juntas puede comprometer el sellado y permitir la salida de gas [58].

Fallas de fabricación o defectos en cilindros: Aunque poco comunes, pueden presentarse micro fisuras o porosidades en la soldadura del cilindro, principalmente en cilindros viejos o que no han pasado controles periódicos de seguridad [58].

1.3.9 Monitoreo y Control

El monitoreo y control son funciones fundamentales en los sistemas inteligentes, especialmente en aplicaciones de seguridad, automatización y gestión de riesgos. En el contexto de la ingeniería y la electrónica, el monitoreo se refiere a la observación continua y en tiempo real de variables físicas o de proceso mediante sensores y sistemas de adquisición de datos; mientras que el control implica la ejecución de acciones automáticas o manuales en respuesta a condiciones previamente definidas, con el objetivo de mantener la seguridad, estabilidad o funcionalidad del sistema [59]

En los sistemas basados en Internet de las Cosas (IoT), el monitoreo se realiza a través de sensores que captan información del entorno (como temperatura, presión, concentración de gases, entre otros) y la transmiten a un microcontrolador o servidor mediante protocolos de comunicación. Estos datos pueden ser visualizados en interfaces web, aplicaciones móviles o plataformas en la nube [59].

El control puede clasificarse en dos tipos:

Control manual

en el que el usuario toma decisiones basadas en los datos recibidos.

Control automático

en el que el sistema ejecuta respuestas predeterminadas sin intervención humana, como encender una alarma, cerrar una válvula o cortar el suministro de energía.

En el presente proyecto, el monitoreo consiste en la lectura continua de concentraciones de GLP mediante sensores de gas, y el control se manifiesta en la activación automática del mecanismo de cierre de la válvula y el envío inmediato de

alertas al usuario, una vez que se detecta una condición peligrosa. Esta integración de monitoreo en tiempo real y control autónomo permite mitigar riesgos domésticos de forma proactiva, optimizando la seguridad mediante tecnología accesible [59].

1.3.10 Normas técnicas aplicables

El diseño, instalación y operación de sistemas que emplean gas licuado de petróleo (GLP), así como el uso de dispositivos electrónicos para detección o control, deben estar alineados con un conjunto de normas técnicas que garanticen la seguridad, confiabilidad y calidad del sistema. Estas normativas, tanto nacionales como internacionales, establecen criterios fundamentales para la manipulación segura del GLP, las condiciones estructurales y ambientales requeridas, y los parámetros funcionales que deben cumplir los dispositivos de detección o actuación. A continuación, se presentan algunas de las normativas más relevantes aplicables en contextos donde se utilicen instalaciones de GLP y tecnologías asociadas [60].

- **NEC 2021**

La Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC 2021) constituye el conjunto oficial de disposiciones técnicas obligatorias para la planificación, diseño, ejecución y mantenimiento de edificaciones en el Ecuador. Emitida por el Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI), esta norma abarca aspectos estructurales, eléctricos, sanitarios, y de instalaciones especiales, entre las que se incluyen las instalaciones de gas combustible, como el Gas Licuado de Petróleo (GLP) [60].

En relación con el GLP, la NEC 2021 establece múltiples requisitos técnicos destinados a garantizar la seguridad y eficiencia de las instalaciones. Entre los principales aspectos regulados se encuentran:

Ubicación de cilindros de GLP: La norma indica que los cilindros deben colocarse en espacios abiertos, ventilados y accesibles, preferentemente en exteriores o áreas semicerradas con ventilación cruzada. Se prohíbe su instalación en baños, dormitorios, sótanos o recintos cerrados sin ventilación natural [60].

Distancias mínimas de seguridad: Establece separaciones obligatorias entre los cilindros de GLP y elementos como tomacorrientes, interruptores, fuentes de calor, aberturas al interior de la vivienda (ventanas o puertas), así como otros cilindros o tanques de diferentes gases. Por ejemplo, se exige una distancia mínima de 1,5 metros entre un cilindro y una llama abierta [60].

Materiales de instalación: Define los tipos de materiales aprobados para tuberías, conexiones y mangueras, priorizando aquellos con resistencia a la presión, la temperatura y a la corrosión generada por el GLP. Las conexiones deben ser metálicas y seguras, con uniones roscadas, prensadas o soldadas, según el caso [60].

Elementos de control y seguridad: Exige la incorporación de válvulas de cierre manual de fácil acceso, así como reguladores de presión certificados. Se deben prever dispositivos que permitan aislar rápidamente el suministro en caso de emergencia [60].

Ventilación obligatoria: En los espacios donde se almacenan o manipulan cilindros, debe garantizarse ventilación inferior y superior permanente, considerando que el GLP es más pesado que el aire y tiende a acumularse en zonas bajas [60].

Señalización y advertencia: Se requiere la colocación de señales visibles que adviertan sobre la presencia de gas inflamable, además de recomendaciones para el uso de extintores cercanos tipo B (líquidos inflamables y gases).

La NEC 2021 actúa como una herramienta normativa que promueve condiciones de construcción seguras, especialmente en edificaciones residenciales, donde el uso del GLP es habitual. Su cumplimiento permite minimizar el riesgo de fugas, explosiones e intoxicaciones, mediante un diseño técnico riguroso y buenas prácticas constructivas[60].

- **NTE INEN 111:2013**

Establece los requisitos técnicos que deben cumplir los cilindros de acero destinados al almacenamiento y uso de Gas Licuado de Petróleo (GLP) en aplicaciones domésticas, garantizando su seguridad estructural y funcional. Según esta norma, los cilindros deben estar fabricados en acero al carbono laminado en caliente, con un espesor mínimo de pared no inferior a 2 mm, y deben someterse a tratamientos

térmicos de normalizado o revenido. Su diseño incluye un cuerpo cilíndrico con extremos semiesféricos y un volumen aproximado para contener 15 kg de GLP, soportando una presión de trabajo cercana a los 17.5 bar y una presión de prueba hidrostática de al menos 30 bar. Las soldaduras longitudinales y circunferenciales deben cumplir ensayos no destructivos para asegurar su integridad [61].

En cuanto a la válvula, esta debe ser de tipo husillo, fabricada en latón o acero forjado, y contar con una rosca de conexión estándar de ¾" UNF o NGT, garantizando la hermeticidad mediante pruebas de fuga con aire o nitrógeno. Debe incorporar un mecanismo de cierre positivo, y puede integrar un dispositivo de alivio de presión como sistema de seguridad. La válvula debe estar protegida por un collarín metálico, que evita daños por impactos y facilita el transporte del cilindro. Adicionalmente, la norma exige que cada unidad lleve un marcado permanente con datos como el número de serie, peso tara, fecha de fabricación, presión de prueba y sello de certificación. La inspección periódica debe realizarse cada cinco años, y la vida útil del cilindro está limitada a un máximo de 15 años, siempre que cumpla con los criterios establecidos para su uso continuo [61].

- **EN 60079-29-1**

Es una norma internacional que establece los lineamientos para el diseño, funcionamiento y evaluación de detectores de gases inflamables que operan en ambientes donde pueden presentarse atmósferas explosivas. Esta regulación aplica a dispositivos que se utilizan para detectar gases como metano, propano, butano o GLP, y es ampliamente adoptada en sectores industriales, comerciales y residenciales debido a su enfoque en la seguridad preventiva [62].

Esta norma define una serie de requisitos técnicos que los sensores deben cumplir para ser considerados confiables. Uno de los más importantes es la capacidad del dispositivo para medir con precisión el gas en el aire, en función de un umbral conocido como el Límite Inferior de Explosividad (LEL). Los sensores deben ser capaces de detectar concentraciones peligrosas antes de que se vuelvan críticas, y hacerlo en un tiempo de respuesta corto, que garantice una alerta rápida y efectiva [62].

Además, la norma EN 60079-29-1 establece que los detectores de gas deben operar con precisión bajo condiciones ambientales variables, como cambios de temperatura, humedad o presión. Además, exige que mantengan su estabilidad a lo largo del tiempo y cuenten con alarmas visuales o sonoras, así como mecanismos que alerten sobre fallos o necesidad de mantenimiento. En conjunto, la normativa garantiza que estos dispositivos sean seguros, confiables y adecuados para la protección de personas y bienes frente a posibles fugas de gas [62].

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Desarrollar un sistema IoT para el control y monitoreo de fugas de GLP en entornos domésticos.

1.4.2 Objetivos específicos

- Diseñar un sistema de detección de fugas de GLP para identificar de forma temprana situaciones de riesgo en entornos domésticos.
- Implementar un control automático de válvulas de GLP con tecnología IoT para evitar la propagación de gas y prevenir accidentes por fugas
- Establecer el nivel de eficiencia del sistema IoT en el control y monitoreo de fugas de GLP en entornos domésticos.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1 Materiales

Para la construcción del sistema se utilizaron componentes electrónicos, módulos de comunicación, elementos de control, herramientas de montaje y software de desarrollo. A continuación, se describen los materiales empleados en el diseño, ensamblaje y funcionamiento del prototipo.

2.1.1 ESP32

El ESP32 es un microcontrolador de arquitectura Xtensa LX6 desarrollado por Espressif Systems, ampliamente utilizado en aplicaciones IoT debido a su alto rendimiento, bajo consumo energético y conectividad integrada Wi-Fi y Bluetooth. En el presente proyecto, el ESP32 cumple un rol central como unidad de control y procesamiento del sistema de monitoreo y detección de fugas de GLP [63].

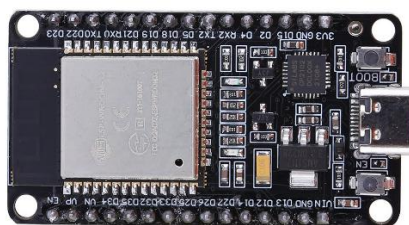


Figura 21. ESP32 [64]

Su utilización se justifica por las siguientes funciones clave

- ***Lectura de sensores***

El ESP32 recibe en tiempo real las señales analógicas generadas por sensores de gas como los MQ-5, MQ-6 y MQ-135, los cuales detectan la presencia de compuestos inflamables en el ambiente. El microcontrolador digitaliza y evalúa esta información para determinar si existe una condición de riesgo.

- ***Procesamiento y toma de decisiones***

Una vez que los datos de los sensores son procesados, el ESP32 ejecuta una lógica de control programada que permite comparar los valores de concentración de gas con umbrales de seguridad previamente definidos. Si se detecta una fuga, el sistema activa el mecanismo para cortar el suministro de gas mediante el control de la válvula.

- ***Comunicación inalámbrica***

Gracias a su conectividad Wi-Fi integrada, el ESP32 permite enviar alertas a plataformas remotas mediante protocolos de comunicación como MQTT o HTTP. Esto hace posible que el usuario reciba notificaciones en tiempo real a través de una aplicación móvil o interfaz web, incluso si no se encuentra en el lugar.

2.1.2 Sensores MQ

Los sensores de la serie MQ son módulos de detección de gases ampliamente utilizados en proyectos de electrónica e IoT por su bajo costo, facilidad de integración y sensibilidad a diversos compuestos químicos. En este proyecto se emplearon los modelos MQ-5, MQ-6 y MQ-135, cada uno con características complementarias para mejorar la cobertura y confiabilidad del sistema de detección de fugas de GLP [51].



Figura 22. Sensores de gas de la serie MQ [65]

- ***MQ-5***

Detecta gases como GLP, gas natural y gas ciudad. Posee buena sensibilidad al GLP y es ideal para aplicaciones de seguridad doméstica.

- ***MQ-6***

Optimizado específicamente para la detección de gas butano, propano y GLP, con alta precisión en rangos de concentración típicos de fuga.

- ***MQ-135***

Sensor multigás, capaz de detectar amoníaco, benceno, humo y gases nocivos presentes en ambientes contaminados.

2.1.3 Servomotor

En este proyecto, el servomotor fue utilizado como mecanismo de accionamiento para el cierre automático del paso de gas, mediante el giro de una palanca o acoplamiento que actúa sobre la válvula del cilindro. Este elemento fue controlado directamente por el microcontrolador ESP32, el cual, al detectar niveles peligrosos de GLP a través del sensor, enviaba una señal para activar el servomotor y ejecutar la acción de cierre [66].

2.1.4 Raspberry Pi

La Raspberry Pi es una minicomputadora de placa única (single-board computer) desarrollada por la Raspberry Pi Foundation. Se caracteriza por su tamaño compacto, bajo consumo energético y capacidad para ejecutar sistemas operativos basados en Linux, lo que la convierte en una herramienta ideal para proyectos educativos, de automatización y desarrollo de sistemas embebidos. A pesar de su reducido tamaño, es capaz de realizar tareas complejas como procesamiento de datos, ejecución de servidores, y gestión de redes y periféricos [67].



Figura 23. Raspberry PI [68]

En el presente proyecto, la Raspberry Pi fue utilizada como servidor local durante la fase inicial de implementación del sistema IoT. Su función principal fue recibir, almacenar y visualizar los datos enviados por el microcontrolador ESP32, que capturaba información desde los sensores de gas. Para ello, se configuraron e integraron servicios como Mosquitto (broker MQTT), una base de datos MariaDB, y plataformas de visualización como Node-RED y Grafana, permitiendo monitoreo en tiempo real y generación de alertas locales. Esta configuración permitió validar el funcionamiento completo del sistema en una red local antes de su migración a la nube.

2.1.5 Protoboard

La protoboard es una placa de pruebas utilizada para construir circuitos electrónicos de forma temporal y sin necesidad de soldadura. Permite conectar componentes mediante pines insertables, facilitando el diseño, modificación y verificación de circuitos en la etapa de prototipado [69].

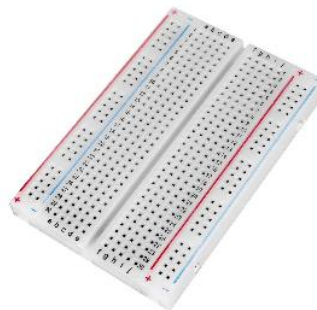


Figura 24. Protoboard [69]

En este proyecto, la protoboard se empleó durante la fase de desarrollo inicial del sistema IoT, permitiendo ensamblar y probar la conexión entre el ESP32, los sensores MQ, el módulo relé y los dispositivos de salida (buzzer, LEDs, válvula). Su uso permitió realizar ajustes en el hardware y en la lógica de control sin comprometer los componentes ni requerir soldaduras, lo que resultó fundamental para validar el funcionamiento del sistema antes del montaje definitivo sobre baquelita.

2.1.6 PCB

La placa PCB (Printed Circuit Board) es una plataforma electrónica diseñada para montar y conectar componentes mediante pistas conductoras impresas, lo que permite una distribución ordenada, compacta y profesional del circuito. A diferencia de las placas perforadas como la baquelita, la PCB se fabrica a partir de un diseño previo en software, lo que optimiza la disposición de los elementos, reduce el riesgo de errores de conexión y mejora la resistencia eléctrica y mecánica del montaje [70].

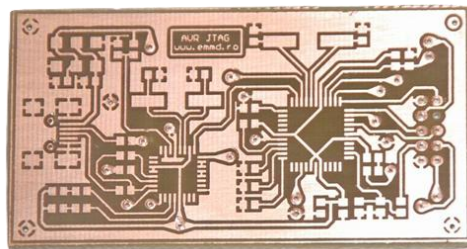


Figura 25. Placa PCB

En este proyecto, la placa PCB fue diseñada como parte de la etapa de optimización del prototipo, con el fin de consolidar el sistema de detección y control de fugas de GLP en una estructura más estable y eficiente. Para su elaboración se utilizó software de diseño electrónico como Proteus, y en algunos casos se complementó con herramientas de modelado e impresión 3D como Ultimaker Cura, para generar soportes físicos y carcasas personalizadas. La implementación de la PCB permitió unificar el ESP32, el sensor MQ-5, el módulo relé y los elementos de señalización en un solo circuito, lo cual facilitó su instalación y redujo el uso de cables externos.

El uso de PCB no solo mejora la estética del sistema, sino que también aumenta su confiabilidad operativa, reduciendo interferencias, mejorando el aislamiento de señales y favoreciendo su uso en contextos reales de instalación doméstica.

2.1.7 Cilindro de GLP

El cilindro de GLP (Gas Licuado de Petróleo) es un recipiente metálico presurizado diseñado para almacenar y suministrar gas combustible en estado líquido. En el ámbito doméstico, es el principal medio de distribución de GLP en Ecuador y se utiliza comúnmente para cocinas, calefones y otros aparatos de combustión. Estos cilindros están fabricados bajo normativas técnicas que garantizan su resistencia a la presión interna del gas, incluyen válvulas de seguridad y deben mantenerse en posición vertical durante su uso para asegurar una operación segura [71].



Figura 26. Cilindro de GLP [72]

El cilindro de GLP utilizado en este proyecto corresponde a un modelo doméstico estándar, comúnmente empleado en hogares ecuatorianos para el suministro de gas en cocinas y calefones. Su inclusión en el sistema permitió reproducir un entorno real de funcionamiento, ya que el diseño del prototipo contempló su instalación directa sobre la estructura del cilindro.

2.1.8 Válvula de GLP

La válvula de GLP es un componente esencial en los sistemas de almacenamiento y distribución de gas licuado de petróleo, ya que regula el paso del gas desde el cilindro hacia los artefactos de consumo. Está diseñada para operar bajo presión y posee un mecanismo de apertura y cierre que permite controlar manualmente el flujo del gas. En condiciones normales de uso, esta válvula es accionada por el usuario al conectar o desconectar el cilindro [71].



Figura 27. Regulador de presión para cilindros de GLP [71]

En el presente proyecto, la válvula del cilindro se mantuvo como parte del entorno físico de prueba, ya que sobre ella se instaló un mecanismo adicional de corte automático, controlado por el sistema IoT. Esta configuración permitió validar el comportamiento del sistema ante eventos simulados de fuga, enfocándose en la capacidad de reacción ante una liberación de gas a través de la válvula.

La válvula utilizada cumplió con las características estándar para cilindros domésticos de 15 kg, fabricada en materiales resistentes a la corrosión y compatibles con GLP, y se manipuló respetando las condiciones de seguridad recomendadas en la normativa ecuatoriana vigente. Su función fue clave en la simulación de escenarios reales, ya que representa el principal punto de salida del gas en una instalación residencial.

2.1.9 Proteus

Proteus es un software de diseño electrónico que permite la simulación, esquematización y diseño de circuitos impresos (PCB) en entornos virtuales. Es ampliamente utilizado en ingeniería electrónica por su capacidad para integrar

microcontroladores programables, sensores, actuadores y componentes pasivos en un entorno visual e interactivo [73].

En el presente proyecto, Proteus fue utilizado durante la etapa de diseño del prototipo, específicamente para la elaboración de esquemas eléctricos del sistema IoT y el diseño de la placa PCB. Esta herramienta permitió validar virtualmente la lógica de conexión entre el ESP32, los sensores MQ y el servomotor, antes de proceder al montaje físico. Gracias a sus funciones de simulación, se pudieron anticipar posibles errores de diseño, ajustar la distribución de componentes y optimizar el uso del espacio en la placa.

El uso de Proteus facilitó una transición más precisa desde la fase de prototipado con protoboard hacia un ensamblaje definitivo sobre baquelita o placa PCB, mejorando la organización del circuito y reduciendo la posibilidad de fallas durante el montaje.

2.1.10 Cura

Ultimaker Cura es un software de laminado (slicer) para impresión 3D que convierte modelos tridimensionales en instrucciones G-code compatibles con impresoras FDM. Permite configurar parámetros de impresión como densidad de relleno, altura de capa, soportes y velocidad, optimizando la fabricación de piezas físicas desde archivos digitales STL [74].

En este proyecto, Ultimaker Cura fue utilizado para generar el G-code de las piezas impresas en 3D, específicamente el case del prototipo electrónico y el mecanismo de apertura y cierre de la válvula de gas, diseñado para montarse directamente sobre el cilindro de GLP. Estas piezas fueron modeladas previamente en software CAD y posteriormente ajustadas en Cura para garantizar un ajuste preciso, resistencia mecánica adecuada y facilidad de instalación en el entorno doméstico real.

2.2 Métodos

2.2.1 Modalidad de la investigación

La presente investigación adoptó una metodología de tipo aplicada, experimental y documental, con el propósito de desarrollar una solución tecnológica orientada a la seguridad doméstica mediante el uso de dispositivos IoT. El proyecto se enfocó en el diseño e implementación de un sistema funcional capaz de detectar concentraciones peligrosas de Gas Licuado de Petróleo (GLP), activar mecanismos automáticos de cierre de válvulas, y emitir alertas en tiempo real a través de plataformas conectadas.

En la fase documental, se llevó a cabo una revisión exhaustiva de literatura científica, tesis académicas, artículos especializados, manuales técnicos y normas ecuatorianas vigentes relacionadas con la instalación y seguridad de sistemas de GLP. Esta revisión permitió establecer las bases teóricas del sistema, conocer antecedentes relevantes y definir criterios técnicos para su diseño e implementación.

La modalidad experimental fue fundamental para evaluar el desempeño del prototipo en condiciones controladas que simulaban escenarios reales de uso doméstico. Se efectuaron múltiples pruebas con sensores MQ (modelos MQ-5, MQ-6 y MQ-135), midiendo variables clave como tiempos de detección, activación de mecanismos de cierre y emisión de alertas. Estas pruebas se desarrollaron tanto en un entorno local controlado con servidor alojado en un Raspberry Pi y también en una infraestructura migrada a la nube, lo que permitió validar su funcionamiento en diferentes condiciones de conectividad.

Para complementar el análisis, se emplearon métodos e instrumentos adecuados para la recopilación de datos técnicos y funcionales, incluyendo registros de comportamiento del sistema, observación directa y análisis de respuesta del hardware y software integrados. Esta combinación metodológica permitió abordar el problema de forma integral, generando resultados prácticos, replicables y con aplicación directa en entornos residenciales que utilizan GLP.

2.2.2 Población y muestra

La población objetivo de esta investigación estuvo conformada por usuarios residenciales que utilizan cilindros de Gas Licuado de Petróleo (GLP) en sus hogares, dentro de contextos domésticos donde la implementación de sistemas de monitoreo automatizado resulta pertinente. Debido a la extensión, heterogeneidad y distribución geográfica de este grupo, se consideró como una población de dimensión teórica infinita, lo que imposibilitó una cuantificación precisa.

Dado el carácter exploratorio y tecnológico del estudio, se adoptó un muestreo no probabilístico por conveniencia, fundamentado en criterios de accesibilidad técnica, disponibilidad de los espacios de prueba y viabilidad de implementación del prototipo.

Se seleccionaron intencionalmente viviendas que cumplieran con los criterios establecidos, tales como el uso activo de GLP mediante cilindros, la disposición a colaborar durante el proceso de pruebas, y la existencia de condiciones técnicas adecuadas para la instalación temporal del sistema. En cada una de ellas se llevaron a cabo pruebas replicadas mediante simulaciones controladas de fuga de gas, realizadas en distintos momentos del día y bajo diversas condiciones ambientales.

Estas pruebas permitieron analizar el desempeño técnico del prototipo, evaluando variables clave como el tiempo de detección del gas, la efectividad en el cierre automático de la válvula, la latencia en el envío de alertas al usuario y la estabilidad de la comunicación inalámbrica entre los dispositivos. La aplicación de un diseño experimental con medidas repetidas en escenarios variados contribuyó a generar una base de datos técnica sólida, a pesar del tamaño reducido de la muestra, y brindó insumos valiosos para la validación y mejora del sistema propuesto.

2.2.3 Recolección de información

La información que fundamentó esta investigación fue recolectada a partir de diversas fuentes, como artículos científicos, normas técnicas nacionales e internacionales, tesis universitarias, entrevistas a expertos y pruebas experimentales, lo que permitió construir un enfoque integral y contextualizado.

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica exhaustiva, utilizando bases de datos académicas, libros especializados, manuales técnicos y normativa ecuatoriana vigente. Esta revisión proporcionó el sustento teórico necesario para el diseño del sistema IoT, orientando aspectos técnicos como la arquitectura de red, el tipo de sensores a emplear, los mecanismos de respuesta automática y las buenas prácticas en instalaciones con GLP.

Se realizaron entrevistas y consultas técnicas a profesionales del área de la ingeniería electrónica, automatización y telecomunicaciones, quienes aportaron recomendaciones específicas sobre componentes, estrategias de control y viabilidad operativa del sistema en entornos reales. Esta información cualitativa resultó clave para refinar el diseño y asegurar la aplicabilidad del prototipo.

Durante la fase de implementación, se efectuaron pruebas experimentales controladas en viviendas seleccionadas, donde se simulaban situaciones de fuga de GLP para evaluar el desempeño del sistema. En estas pruebas se recolectaron datos cuantitativos, como tiempos de detección, activación de la válvula y envío de alertas, y datos cualitativos, obtenidos mediante cuestionarios aplicados a los usuarios para conocer su experiencia de uso, percepción de seguridad y sugerencias de mejora.

Esta combinación de métodos de recolección documental, técnica y experimental permitió obtener una comprensión amplia del fenómeno investigado y validar la funcionalidad del sistema IoT como herramienta para la mitigación de riesgos por fugas de GLP en el entorno doméstico.

2.2.4 Procesamiento y análisis de datos

El procesamiento y análisis de los datos en esta investigación tuvo como objetivo evaluar con precisión el desempeño técnico del sistema IoT desarrollado para la detección y control de fugas de GLP en entornos domésticos. El análisis permitió verificar si el prototipo cumplía con los objetivos planteados, especialmente en lo relacionado con la eficiencia de detección, la capacidad de respuesta automática y la emisión oportuna de alertas al usuario.

Para ello, se ejecutaron pruebas experimentales en entornos residenciales seleccionados bajo criterios de accesibilidad, uso activo de GLP y viabilidad técnica. En cada uno de estos escenarios se realizaron simulaciones controladas de fuga de gas en distintos momentos del día, lo cual permitió analizar el comportamiento del sistema ante condiciones variables. Durante estas pruebas se registraron directamente variables técnicas como:

- Tiempo de detección del gas (desde la emisión hasta el reconocimiento por el sensor).
- Nivel de concentración de GLP al momento de la detección (en ppm).
- Tiempo de emisión de la alerta (desde la detección hasta la notificación al usuario).
- Tiempo de activación del mecanismo de cierre de la válvula.

Los datos cuantitativos obtenidos fueron documentados mediante fichas de observación estructuradas, y posteriormente organizados en tablas para su análisis. Se calcularon promedios, máximos, mínimos y se realizaron comparaciones entre las distintas pruebas para identificar el comportamiento del sistema en diferentes escenarios. Los resultados se representaron también en gráficos para facilitar su interpretación.

Adicionalmente, se aplicaron cuestionarios a los usuarios participantes con el fin de obtener datos cualitativos sobre su experiencia de uso, percepción de seguridad, facilidad de interacción con la interfaz del sistema y sugerencias para su mejora. Esta información fue fundamental para evaluar no solo la funcionalidad técnica del sistema, sino también su aceptabilidad y aplicabilidad en entornos reales.

El enfoque integral del análisis de datos permitió obtener una visión completa sobre la efectividad del prototipo, sus fortalezas y oportunidades de optimización, sirviendo además como base para recomendaciones futuras en el desarrollo de tecnologías IoT aplicadas a la seguridad doméstica.

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Desarrollo del proyecto

Para el desarrollo del sistema de detección y control de fugas de Gas Licuado de Petróleo (GLP), se aplica la metodología Rapid IoT Prototyping, ya que permite estructurar el trabajo en fases prácticas que responden directamente a los requerimientos del prototipo. Esta metodología facilita implementar, probar e integrar cada componente de forma progresiva. El sistema incorpora un sensor MQ-5 para captar la concentración de GLP en el ambiente, un ESP32 programado para interpretar las señales del sensor y transmitir los datos mediante el protocolo MQTT, y un servidor que almacena dicha información en una base de datos. La visualización en tiempo real se realiza mediante Grafana, y las alertas se emiten automáticamente al usuario a través de Telegram. Un servomotor acciona el cierre de la válvula cuando se detecta una condición crítica. Gracias al enfoque iterativo de la metodología, se validan cada uno de los módulos por separado antes de la integración total del sistema, lo cual garantiza su funcionamiento bajo condiciones controladas.

El diagrama de flujo mostrado en la Figura 28 representa el comportamiento lógico del sistema, desde la lectura inicial de gas hasta la activación automática de los mecanismos de respuesta. El sensor MQ-5 monitorea continuamente la concentración de GLP, y el ESP32 transmite los valores detectados al servidor utilizando MQTT. Si el sistema identifica que la concentración supera los 2000 partes por millón (ppm), se ejecuta el cierre de la válvula mediante un servomotor, y se envía una alerta inmediata al usuario por Telegram. El valor umbral de 2000 ppm se establece en función de pruebas realizadas directamente sobre el prototipo, en las cuales se simulan fugas con encendedores abiertos; dichas pruebas demuestran que valores superiores a este rango representan un riesgo real. Esta decisión se sustenta también en la norma EN 60079-29-1, que indica que los sensores deben generar alertas antes de que se alcance el Límite Inferior de Explosividad (LEL), así como en el estudio de Chérrez y Vintimilla, quienes aplican criterios similares para la activación de alarmas en sistemas de bajo costo para detección de gas en entornos domésticos.

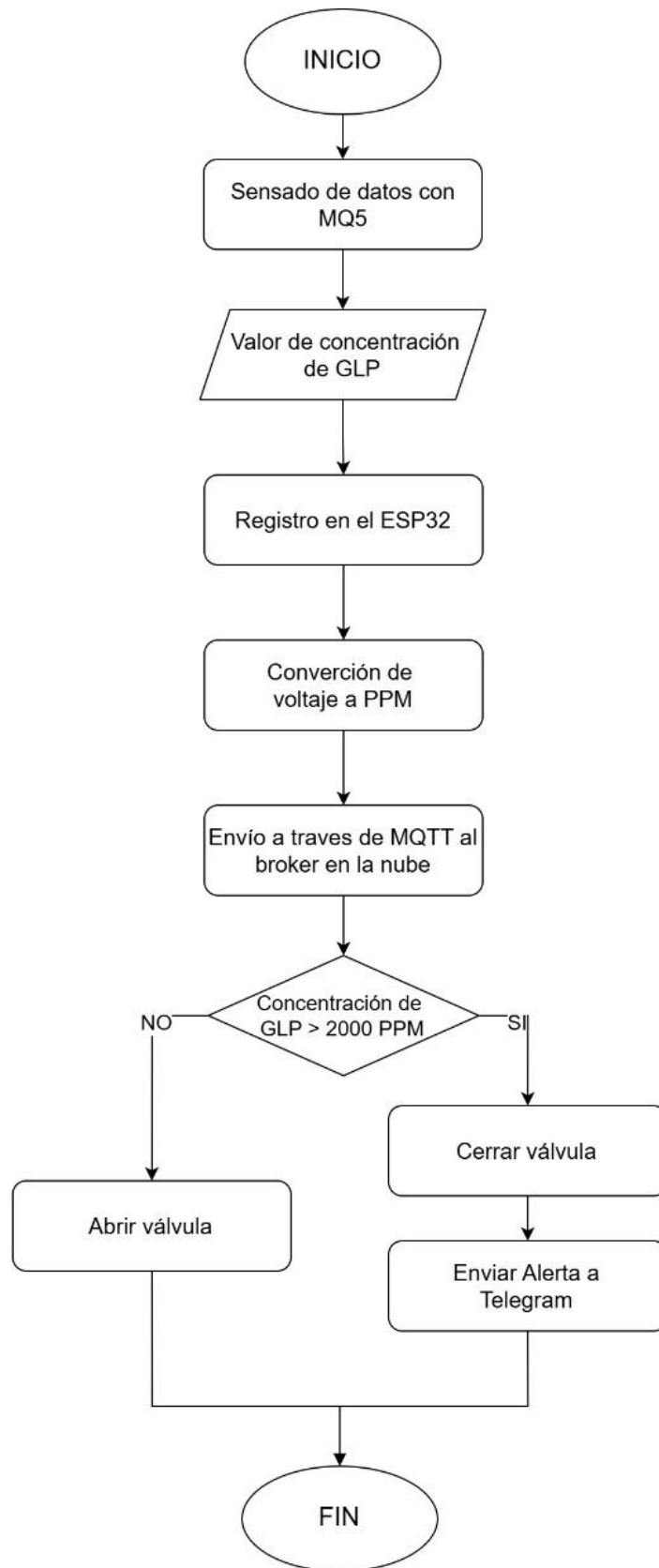


Figura 28. Diagrama de flujo del proceso de detección y respuesta ante concentraciones críticas de GLP.

3.2 Fase de análisis de requerimientos

Se planteó la necesidad de incorporar un sistema de detección confiable que permitiera identificar la presencia de hidrocarburos en el ambiente, particularmente aquellos presentes en el Gas Licuado de Petróleo (GLP), tales como propano y butano. Para ello, se consideró fundamental incluir un sensor de gas capaz de ofrecer lecturas estables y en tiempo real, con un rango de detección adecuado para entornos domésticos y con capacidad de integrarse a sistemas embebidos. Asimismo, se estableció que el sistema debía contar con un microcontrolador con conectividad inalámbrica, que permitiera el procesamiento local de los datos y su transmisión a una plataforma central sin necesidad de infraestructura de red compleja.

Como parte de los requisitos funcionales, se identificó la necesidad de emplear un protocolo de comunicación ligero y eficiente, que permitiera el envío de datos de forma periódica y confiable hacia un servidor, asegurando una baja latencia y un consumo energético reducido. En este sentido, se definió la utilización de MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), por tratarse de un protocolo ampliamente adoptado en aplicaciones IoT. De igual forma, se estableció la inclusión de un actuador electromecánico, específicamente un servomotor, que permitiera el accionamiento automático de una válvula de gas en caso de detección de concentraciones peligrosas, como medida inmediata de mitigación del riesgo.

Adicionalmente, se definió como requisito indispensable la incorporación de una plataforma de visualización remota, que permitiera al usuario monitorear en tiempo real el estado del sistema, consultar el historial de concentraciones detectadas y verificar el estado de la válvula. Para ello, se propuso el uso de una herramienta de código abierto que ofreciera compatibilidad con bases de datos y personalización de paneles, como Grafana. Finalmente, se consideró esencial implementar un sistema de notificaciones automáticas mediante canales accesibles al usuario final, tales como aplicaciones de mensajería instantánea, a fin de generar alertas inmediatas ante la detección de una fuga o la restauración del sistema tras la normalización de los niveles de gas.

3.3 Fase de diseño y pruebas preliminares

En esta fase se abordó el diseño funcional y la implementación inicial del prototipo del sistema de detección y control de fugas de Gas Licuado de Petróleo. El prototipo fue construido sobre una placa protoboard, lo que permitió realizar pruebas de funcionamiento y ajustes durante la etapa de desarrollo. Asimismo, se realizaron pruebas preliminares que incluyeron la comparación del desempeño de distintos sensores de la familia MQ (MQ-2, MQ-5, MQ-6 y MQ-135) y la observación del comportamiento de cada uno frente a concentraciones simuladas de GLP. También se ejecutaron pruebas de estabilización para determinar el tiempo óptimo de respuesta y minimizar errores de lectura durante el arranque del sistema.

3.3.1 Construcción del circuito en protoboard

Se llevó a cabo la construcción del prototipo inicial sobre una placa protoboard, integrando los componentes electrónicos esenciales para el funcionamiento del sistema. Esta etapa tuvo como objetivo validar las conexiones físicas entre los módulos, comprobar la compatibilidad eléctrica entre los dispositivos y observar el comportamiento general del sistema en condiciones de prueba. Los elementos utilizados incluyeron un sensor de gas MQ-5, un microcontrolador ESP32, un servomotor SG90, cables de conexión y una fuente de alimentación externa adecuada para garantizar estabilidad en el suministro de corriente.

El sensor MQ-5 se conectó al ESP32 utilizando las líneas de alimentación Vcc y GND, mientras que su salida analógica fue conectada al pin GPIO35, configurado como entrada analógica para lectura de voltaje. Por otro lado, el servomotor fue alimentado desde la misma fuente externa y su señal de control se conectó al GPIO32, configurado como salida PWM para generar el pulso de control necesario para el posicionamiento del actuador. El esquema de conexiones establecido en esta fase se muestra en la Figura 29, donde se representa visualmente la disposición de los elementos, así como los pines empleados.

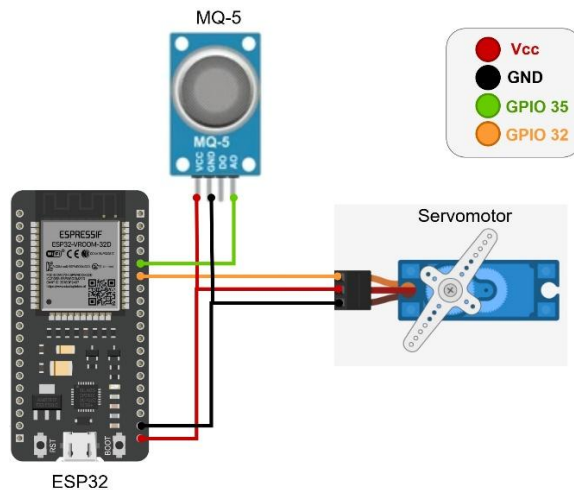


Figura 29. Diagrama de conexiones

La construcción del circuito en protoboard que se presenta en la Figura 30 permitió realizar ajustes rápidos durante las primeras pruebas de funcionamiento, facilitando la identificación de errores de conexión, conflictos de voltaje o ruido en las señales. Esta configuración temporal sirvió como base para validar el funcionamiento de la lectura del sensor, la activación del actuador ante la detección de niveles críticos de GLP, y la interacción directa entre el hardware y el código embebido cargado en el ESP32.

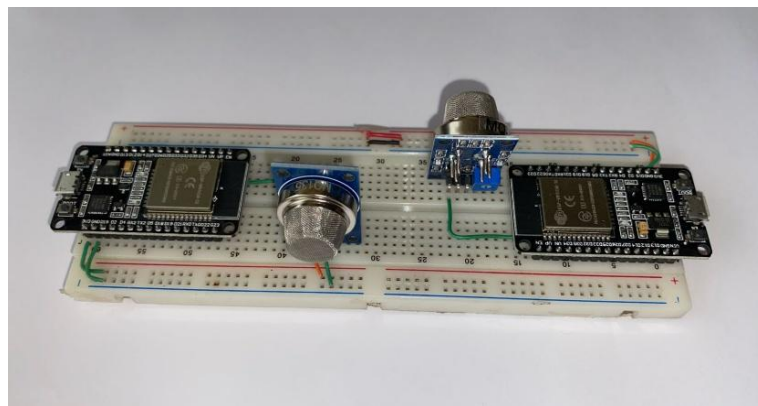


Figura 30. Circuito armado en protoboard

3.3.2 Estabilización de los sensores

Durante esta fase se evaluó el comportamiento del sensor MQ en el periodo posterior a su encendido, con el objetivo de identificar el tiempo requerido para alcanzar una lectura estable y confiable. Al iniciar su funcionamiento, el sensor presentaba valores

iniciales cercanos a cero, que aumentaban progresivamente en los primeros minutos, incluso sin exposición directa a una fuente de gas. Como se evidencia en la Figura 31.

```
03:36:01.245 -> MQ5: 0
03:36:02.245 -> MQ5: 3
03:36:03.215 -> MQ5: 13
03:36:04.231 -> MQ5: 15
03:36:05.214 -> MQ5: 46
03:36:06.233 -> MQ5: 59
03:36:07.233 -> MQ5: 119
03:36:08.214 -> MQ5: 135
03:36:09.215 -> MQ5: 176
03:36:10.214 -> MQ5: 198
03:36:11.244 -> MQ5: 242
03:36:12.244 -> MQ5: 295
03:36:13.249 -> MQ5: 334
03:36:14.234 -> MQ5: 402
03:36:15.233 -> MQ5: 432
03:36:16.234 -> MQ5: 461
03:36:17.233 -> MQ5: 491
03:36:18.214 -> MQ5: 530
03:36:19.233 -> MQ5: 547
03:36:20.214 -> MQ5: 603
03:36:21.232 -> MQ5: 625
```

Figura 31. Fase de estabilización del sensor

Este patrón de comportamiento se atribuyó al proceso interno de precalentamiento del sensor, propio de la tecnología utilizada en los modelos de la familia MQ. El elemento sensible del sensor, basado en óxido de estaño (SnO_2), requiere alcanzar una temperatura estable mediante un filamento interno para lograr lecturas consistentes. Durante este periodo, la resistencia interna del sensor se modifica de forma no lineal, lo cual genera lecturas erráticas o artificialmente elevadas. Este proceso es normal y puede durar entre 15 y 30 minutos, aunque algunos estudios sugieren un tiempo mayor para nuevos sensores.

Una vez transcurrido este periodo de estabilización, las lecturas del sensor mostraron un comportamiento más uniforme y coherente con las condiciones reales del ambiente. En la Figura 32, correspondiente al panel de monitoreo en Grafana, se observa cómo los prototipos estabilizados reflejaron una distribución de valores más constante, lo cual permitió establecer umbrales operativos más precisos.



Figura 32. Comparativa visual del proceso de estabilización MQ-5, MQ-6 y MQ-135

3.3.3 Pruebas de sensores MQ

Se evaluaron diferentes sensores de la familia MQ (específicamente los modelos MQ-5, MQ-6 y MQ-135) con el fin de determinar cuál ofrecía una mejor respuesta frente a concentraciones típicas de GLP en entornos domésticos. Las pruebas se realizaron bajo condiciones controladas, utilizando una fuente de gas estandarizada y midiendo parámetros como el tiempo de respuesta, sensibilidad y estabilidad de las lecturas. El sensor MQ-5 presentó un mejor equilibrio entre sensibilidad al GLP, tiempo de reacción y estabilidad frente a interferencias de otros gases, lo cual justificó su elección para el desarrollo del sistema. En contraste, el MQ-6 presentó respuestas inestables en ciertos rangos, mientras que el MQ-135, aunque entre sus características es la sensibilidad a múltiples gases, mostró baja precisión para el GLP.



Figura 33. Sensores de gas MQ-5, MQ-6 y MQ-135

3.4 Fase de desarrollo físico y estructural

Esta fase comprendió la materialización física del prototipo, tanto a nivel electrónico como estructural, con el objetivo de consolidar un sistema funcional, compacto y adecuado para su instalación sobre un cilindro de Gas Licuado de Petróleo (GLP).

3.4.1 Diseño de placa PCB

Se elaboró el diseño esquemático y el ruteo del circuito impreso utilizando el software Proteus, con el objetivo de sustituir el protoboard empleada durante las fases de prueba por una solución más estable, compacta y adecuada para la instalación final del sistema. Esta etapa permitió consolidar la distribución establecida de los pines del microcontrolador ESP32, definiendo las conexiones necesarias hacia el sensor de gas, el servomotor y la fuente de alimentación externa.

En la Figura 34 se presenta el diagrama esquemático elaborado en Proteus, donde se ilustran las conexiones eléctricas entre el microcontrolador ESP32 y los módulos externos, específicamente el sensor de gas tipo MQ, el servomotor y la fuente de alimentación.

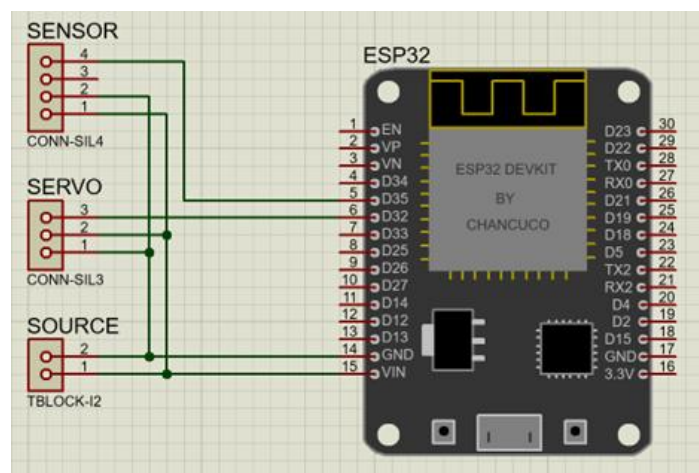


Figura 34. Circuito Esquemático de Proteus

Una vez completado el diseño lógico, se procedió al ruteo de la PCB, como se aprecia en la Figura 35, donde se definió la ubicación precisa de los componentes sobre el plano físico. Se utilizaron pistas anchas para las líneas de alimentación y trayectorias

optimizadas para minimizar cruces y facilitar el proceso de soldadura. Posteriormente, se generó la vista en 3D del modelo ensamblado Figura 36, con el fin de visualizar la disposición real del módulo y verificar que los conectores fueran accesibles

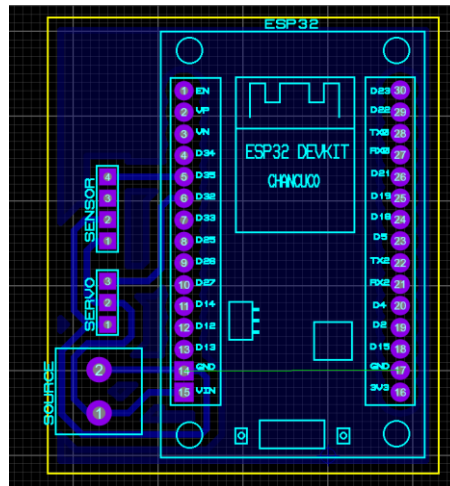


Figura 35. Diseño de ruteo de la PCB

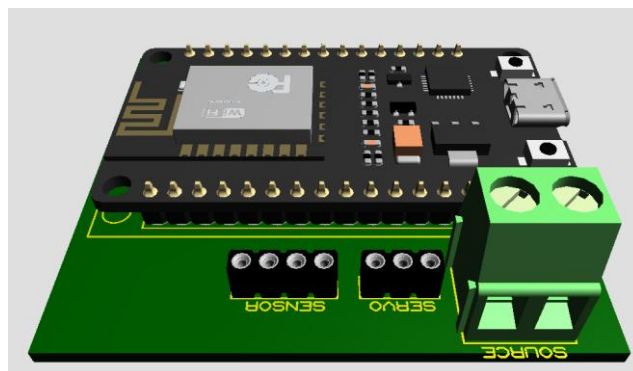


Figura 36. Vista en 3D del modelo ensamblado

Finalmente, se fabricó la placa utilizando el método tradicional de planchado y ácido férrico, y se soldaron los componentes necesarios. En la Figura 37 se muestra el resultado final de la PCB, sobre la cual se montó el ESP32 y se integraron los conectores correspondientes a la fuente, sensor y servomotor. Esta placa permitió mejorar significativamente la organización de los elementos, asegurar una mejor conducción eléctrica y reducir posibles fallos por contacto inestable, facilitando así su incorporación en el sistema final.

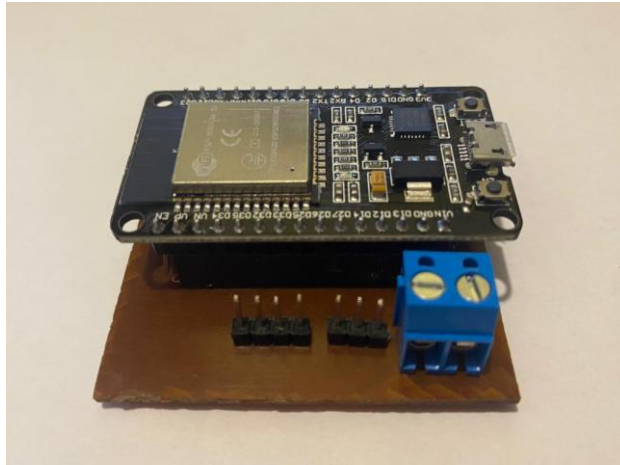


Figura 37. Placa PCB final fabricada y ensamblada

3.4.2 Diseño y fabricación del prototipo 3D

Se desarrolló el diseño estructural del prototipo mediante herramientas de modelado tridimensional, con el objetivo de alojar y proteger los componentes electrónicos del sistema, y garantizar una fijación segura sobre un cilindro de Gas Licuado de Petróleo (GLP). Para ello, se modeló en software CAD un mecanismo compuesto por una carcasa, un sistema de soporte adaptable y una estructura de engranajes acoplada a un servomotor. El diseño incluyó un alojamiento interno para el ESP32, los conectores del sensor y del servomotor, así como el paso de cables de alimentación. La carcasa también contempló un espacio para alojar el sistema de engranajes, encargado de transferir el movimiento del servomotor hacia la palanca de la válvula.

En la Figura 38, se presenta el modelo 3D del sistema de accionamiento, donde se observa la transmisión mecánica por engranajes alineada directamente con el eje de la válvula de GLP. Este conjunto fue diseñado para acoplarse sobre la válvula doméstica estándar mediante un soporte frontal con brazos de sujeción.

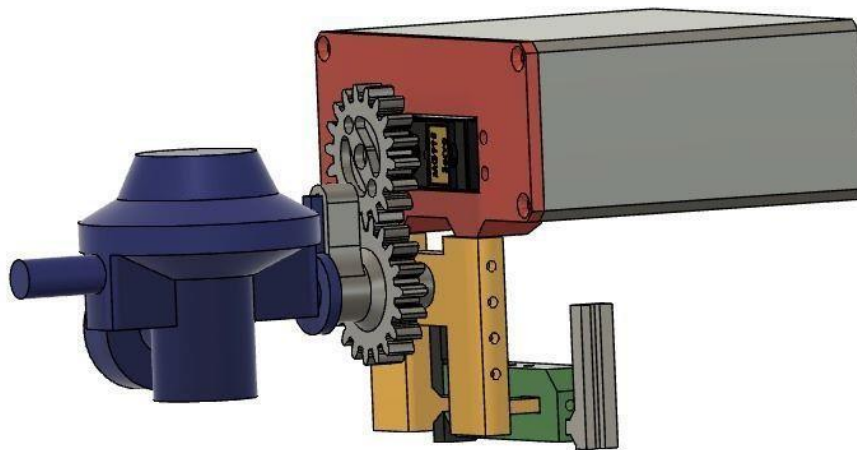


Figura 38. Modelo 3D del sistema de accionamiento mecánico acoplado a la válvula

Posteriormente, en la Figura 39, se presenta la simulación del montaje del prototipo sobre un cilindro de GLP, lo que permitió verificar la correcta alineación del sistema de engranajes con la válvula, así como la accesibilidad y compatibilidad dimensional del mecanismo en condiciones estructurales similares a las reales.

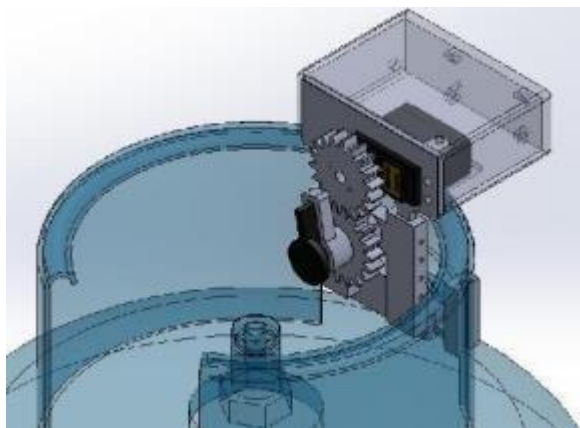


Figura 39. Simulación del sistema de accionamiento sobre un cilindro de GLP

Finalmente, se fabricaron tres versiones físicas del prototipo, cada una con su respectiva carcasa impresa en 3D y el sistema de engranajes acoplado al eje de accionamiento. Estas unidades permitieron verificar la repetibilidad del diseño, realizar pruebas comparativas y validar tanto la precisión del mecanismo como su compatibilidad estructural con válvulas de GLP de uso doméstico. En la Figura 40 se muestran los tres modelos fabricados, los cuales conservaron la misma geometría funcional, variando únicamente en el color del material empleado para su impresión

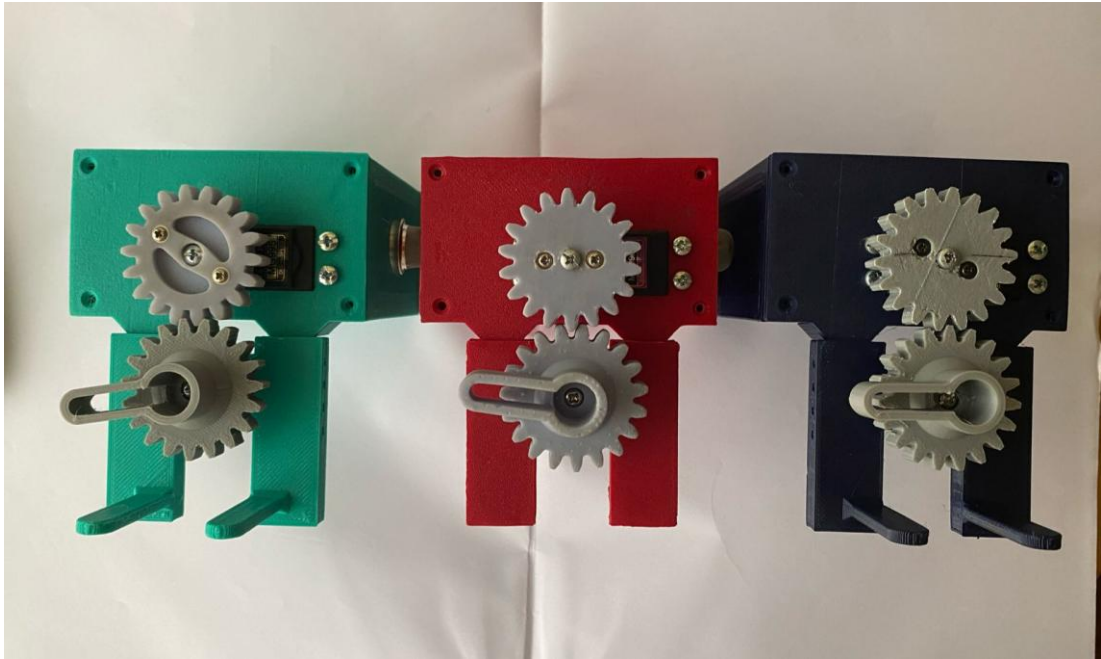


Figura 40. Prototipos físicos impresos en 3D

3.5 Fase de configuración del sistema IoT

Esta fase involucró la programación, integración y configuración de los componentes tecnológicos que permitieron el funcionamiento del sistema bajo un enfoque de Internet de las Cosas (IoT). Se abordó la implementación del código embebido en el microcontrolador ESP32, encargado de procesar los datos del sensor de gas y transmitirlos a través del protocolo MQTT hacia un servidor local o en la nube. Posteriormente, los datos fueron gestionados mediante un script en Python, que los almacenó en una base de datos MySQL para su posterior consulta y análisis. La visualización en tiempo real se realizó utilizando Grafana, y se integró una función de alerta automática mediante Telegram, activada cuando los niveles de concentración de GLP superaron el umbral definido.

El proceso completo de transmisión, almacenamiento, visualización y notificación se representó de manera esquemática en la Figura 41, donde se ilustra la arquitectura lógica del sistema distribuida en cinco etapas: sensorización, recolección de datos, almacenamiento, monitoreo y generación de alertas. Esta estructura permitió garantizar una comunicación eficiente entre dispositivos, así como una respuesta rápida y automatizada ante situaciones de riesgo.



Figura 41. Arquitectura lógica del sistema

3.5.1 Configuración del microcontrolador ESP32

Una vez implementadas y verificadas las funciones de sensado de gas y control del servomotor, se procedió a configurar el módulo de conectividad del ESP32 para establecer una conexión estable con una red Wi-Fi con acceso a Internet. Esta configuración permitió que el microcontrolador enviara en tiempo real los datos obtenidos del sensor MQ-5 mediante el protocolo MQTT, apuntando directamente al servidor. Para ello, se definieron los parámetros de red, el tópico MQTT correspondiente a cada prototipo, y las credenciales necesarias para autenticar la conexión con el broker. Esta etapa marcó la transición del sistema desde un entorno de pruebas local hacia una arquitectura distribuida operativa en la nube, con capacidad de monitoreo remoto y actualización continua de datos. A continuación, se presenta el código fuente cargado en el ESP32 que permitió cumplir estas funciones.

```
#include <WiFi.h>
#include <PubSubClient.h>
#include <ESP32Servo.h>

#define AO_PIN 35
#define ServoPin 32
#define LED_BUILTIN 2

Servo myServo;
int servoState = 0;

// Configuración WiFi
const char* ssid = "Domotica";
const char* password = "Domotica";

// Configuración MQTT
const char* mqtt_server = "34.16.13.41";
const int mqtt_port = 1883;
const char* mqtt_topic = "tesis/Prototipo1";
```

```

WiFiClient espClient;
PubSubClient client(espClient);

void setup_wifi() {
  WiFi.begin(ssid, password);
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(250);
    Serial.print(".");
  }
}

void reconnect() {
  while (!client.connected()) {
    Serial.print("Intentando conectar al broker MQTT...");
    if (client.connect("ESP32Client")) {
      Serial.println("Conectado");
    } else {
      Serial.print("falló con código ");
      Serial.println(client.state());
      delay(250);
    }
  }
}

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  analogSetAttenuation(ADC_11db);
  myServo.attach(ServoPin);
  setup_wifi();
  myServo.write(0);
  client.setServer(mqtt_server, mqtt_port);
  delay(250);
}

void loop() {
  if (!client.connected()) {reconnect(); }

  int gasValue = analogRead(AO_PIN);
  Serial.print("MQ5: ");
  Serial.println(gasValue);

  // Publicar el valor en el topic MQTT
  char msg[50];
  snprintf(msg, 50, "MQ5 Value: %d", gasValue);
  client.publish(mqtt_topic, msg);

  //Control del servo
  if (gasValue > 2000 && servoState != 0) {
    myServo.write(0);
    servoState = 0;
  } else if (gasValue <= 2000 && servoState != 90) {
    myServo.write(90);
    servoState = 90;
  }
  delay(10000);
}

```

3.5.2 Servidor local en Raspberry Pi

Inicialmente, se levantó el servidor utilizando una Raspberry Pi 4, donde se instalaron los servicios de base de datos (MariaDB), broker MQTT (Mosquitto) y herramientas de visualización (Grafana y PHPMyAdmin). Esta arquitectura presentada en la Figura 42 permitió realizar pruebas locales exitosas con una red interna, simulando la funcionalidad completa del sistema.

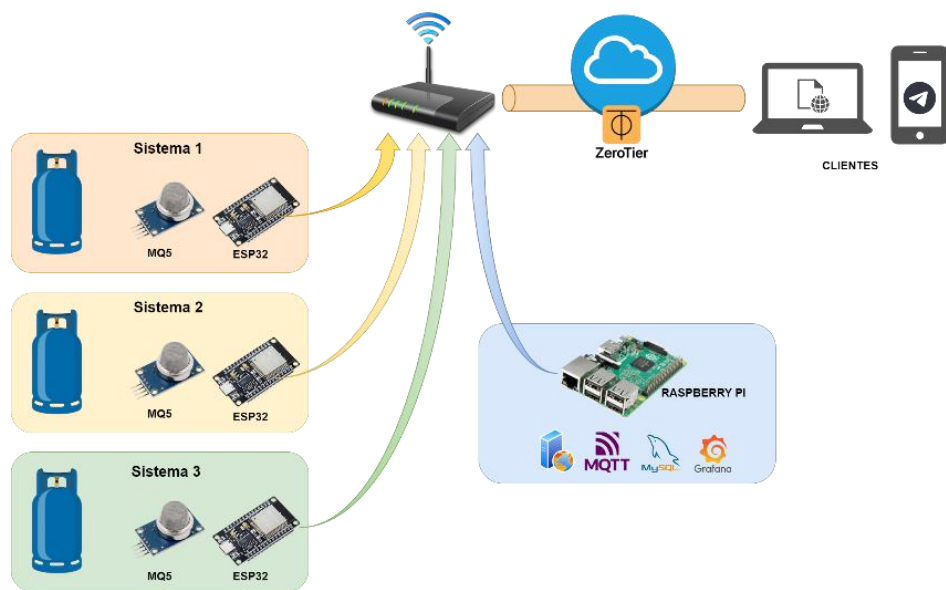


Figura 42. Arquitectura del sistema para pruebas en red interna.

Posteriormente, se identificó una limitación crítica en la arquitectura, al estar alojada en una red local con una dirección IP privada, la comunicación remota desde diferentes ubicaciones geográficas no era posible de manera directa. Esta condición implicaba que los prototipos, al encontrarse distribuidos en distintas viviendas, no podían establecer conexión con el servidor central, ya que la IP local de la Raspberry Pi no es accesible fuera de la red privada. Esta restricción comprometía gravemente la funcionalidad esperada del sistema, particularmente en lo que respecta a la transmisión continua de datos, el monitoreo en tiempo real y el control remoto de válvulas.

Por lo tanto, fue necesario replantear la infraestructura de red para garantizar conectividad global y disponibilidad permanente del sistema

Se planteó como solución a este problema la migración del servidor a una máquina virtual desplegada en Google Cloud Platform (GCP). Esta solución permitió habilitar un canal de comunicación estable y accesible desde cualquier red con conexión a Internet, eliminando la necesidad de infraestructura física adicional en los nodos remotos. Además, el uso de servicios en la nube proporcionó altos niveles de disponibilidad y confiabilidad, gracias a la infraestructura redundante de los centros de datos de GCP, que incluyen respaldo energético, redundancia de red, monitoreo permanente y escalabilidad bajo demanda. Esta decisión favoreció el enfoque de monitoreo distribuido del sistema, facilitando su implementación en entornos reales con mínima intervención técnica en campo.

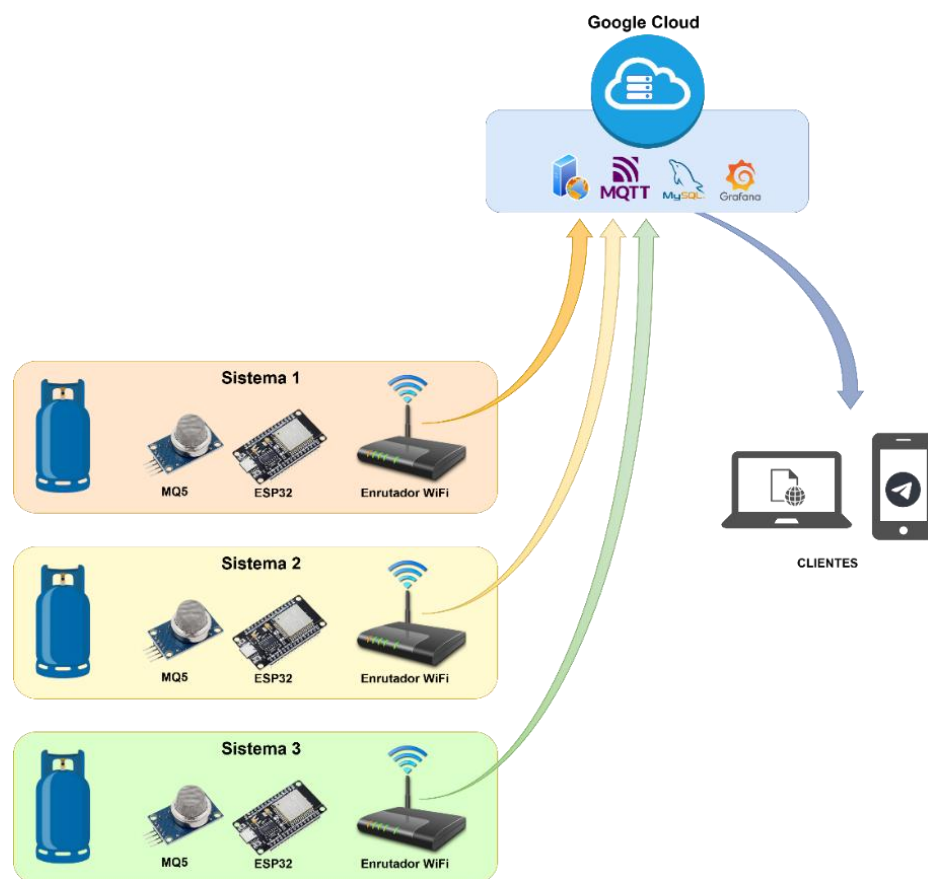


Figura 43. Arquitectura de monitoreo distribuido con servidor en la nube

3.5.3 Creación del servidor en la nube

3.5.4 Instalación de servicios

Tras analizar la relación costo/beneficio, se optó por migrar el sistema a la nube. Se creó una instancia en Google Cloud donde se instalaron los siguientes servicios:

- **Broker MQTT (Mosquitto)**

Con el objetivo de establecer un canal de comunicación eficiente entre los dispositivos ESP32 y el servidor, se implementó el broker Mosquitto, una solución liviana y confiable para la gestión de mensajes bajo el protocolo MQTT. Esta herramienta permite recibir, distribuir y gestionar publicaciones en tópicos específicos.

```
sudo apt update
sudo apt install -y mosquitto mosquitto-clients
sudo systemctl enable mosquitto
```

Se configuraron las reglas de firewall en la consola de Google Cloud Platform para permitir el tráfico entrante a través del puerto 1883, correspondiente al servicio MQTT. Para asegurar la accesibilidad desde cualquier dispositivo remoto, se definió el rango de direcciones IP de origen como 0.0.0.0/0, lo cual habilita el acceso desde todas las ubicaciones

- **Apache**

Para permitir el acceso y funcionamiento de phpMyAdmin, fue necesario instalar el servidor web Apache2, el cual actúa como intermediario entre el navegador del usuario y la aplicación web de administración de bases de datos

```
sudo apt install apache2 -y
```

- **MySQL y PHPMyAdmin**

Para el almacenamiento estructurado de los datos generados por el sistema de detección de fugas, se implementó el gestor de base de datos MySQL. Este sistema relacional permitió organizar y conservar los registros provenientes de los sensores, facilitando su posterior análisis y trazabilidad.

Con el objetivo de simplificar las tareas de administración y supervisión de la base de datos, se instaló la herramienta web phpMyAdmin, la cual proporciona una interfaz gráfica accesible desde cualquier navegador. Esta plataforma facilitó la creación de tablas, la ejecución de consultas SQL, y la validación de datos durante las fases de desarrollo y prueba.

La instalación se llevó a cabo mediante el gestor de paquetes APT, utilizando los siguientes comandos:

```
sudo apt update
sudo apt install -y mysql-server
sudo systemctl enable mysql
sudo apt install -y phpmyadmin
```

Durante el proceso, se configuró el acceso de PHPMyAdmin a través del servidor web Apache2, lo que permitió la gestión remota de la base de datos desde entornos gráficos, sin requerir interacción directa mediante línea de comandos.

- **Python**

Para ejecutar los scripts encargados del procesamiento y almacenamiento de datos provenientes del sistema de monitoreo, se utilizó el lenguaje de programación Python, por su versatilidad, compatibilidad con bibliotecas de comunicación (como MQTT) y su facilidad de integración con bases de datos.

```
sudo apt install -y python3 python3-pip
pip3 install paho-mqtt mysql-connector-python requests
```

3.5.5 Configuración de servicios

- **Configuración de la Base de Datos**

Para el almacenamiento estructurado de los datos provenientes del sistema de detección y monitoreo, se creó la base de datos denominada DB_Tesis, la cual contiene tablas diseñadas específicamente para registrar los eventos relevantes capturados por los dispositivos. La estructura fue definida para facilitar tanto el almacenamiento histórico como el análisis y trazabilidad de los datos.

La creación de la base de datos y sus respectivas tablas se realizó mediante las siguientes instrucciones SQL:

```
CREATE DATABASE DB_Tesis;  
USE DB_Tesis;  
CREATE TABLE AuditoriaEventos (  
    ID INT AUTO_INCREMENT PRIMARY KEY,  
    dispositivo VARCHAR(50),  
    fecha_hora DATETIME,  
    valor_medido INT,  
    estado_valvula ENUM('Abierta', 'Cerrada'),  
    estado_sistema ENUM('ESTABLE', 'CRÍTICO')  
);  
CREATE TABLE Prototipo1 (  
    ID INT AUTO_INCREMENT PRIMARY KEY,  
    fecha_hora DATETIME,  
    valor_medido INT,  
    estado_valvula ENUM('Abierta', 'Cerrada')  
);  
CREATE TABLE Prototipo2 LIKE Prototipo1;  
CREATE TABLE Prototipo3 LIKE Prototipo1;
```

La tabla AuditoriaEventos fue diseñada para centralizar el registro de alertas críticas y cambios de estado significativos del sistema, permitiendo una visión consolidada de la operación general. Por otro lado, las tablas Prototipo1, Prototipo2 y Prototipo3 almacenan las lecturas de cada dispositivo por separado, conservando su respectiva marca temporal y el estado de la válvula al momento de la medición.

A continuación, en la Figura 44, se presenta una vista de estas tablas desde la interfaz de phpMyAdmin, lo cual permite validar su correcta creación y facilita la administración visual de los datos durante las etapas de prueba y despliegue del sistema.

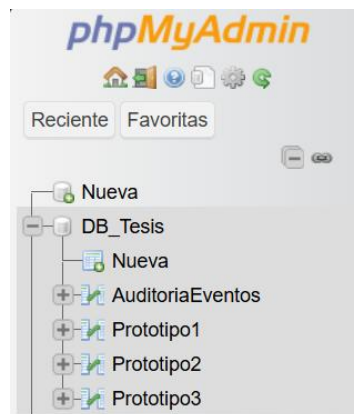


Figura 44. Visualización de las tablas del sistema en phpMyAdmin

- **Configuración de un servicio para guardar los datos en MySQL con Python**

Se desarrolló un script en Python con el objetivo de automatizar la persistencia de datos provenientes del sistema de sensado. Para ello, se empleó la librería paho-mqtt, que permitió establecer una suscripción activa al broker MQTT y recibir los mensajes publicados por los dispositivos ESP32. Una vez recibidos, estos datos fueron procesados y almacenados en la base de datos mediante la librería mysql-connector-python, que facilitó la conexión y ejecución de sentencias SQL sobre el servidor MySQL.

Este servicio fue diseñado para ejecutarse de manera continua como proceso en segundo plano, garantizando así la inserción oportuna y ordenada de los registros generados por el sistema de detección y control de GLP. A continuación, se presenta el código fuente del script desarrollado

```
import mysql.connector
import paho.mqtt.client as mqtt
from datetime import datetime

# Configuración
DB_CONFIG = {
    'host': 'localhost',
    'user': 'monitoreo',
    'password': 'm0nlt0r30',
    'database': 'DB_Tesis'
}

MQTT_CONFIG = {
    'broker': '192.168.1.90',
    'port': 1883,
    'topic': 'tesis/Prototipo1'
}

TELEGRAM_CONFIG = {
    'token': '7804637458:AAHWi-BNDwj7SQfHoyn7uXZ3XQTuyo3w-p0',
    'chat_id': '-1004691916146'
}

critical_exceeded = False

def insert_data(valor):
    try:
        conn = mysql.connector.connect(**DB_CONFIG)
        cursor = conn.cursor()
        cursor.execute("INSERT INTO dispositivo1 (VALOR, TIEMPO)
VALUES (%s, %s)", (valor, datetime.now()))
        conn.commit()
        print(f"[DB] Valor insertado: {valor}")
    except Exception as e:
        print(f"[Error DB] {e}")
```

```

        finally:
            if conn.is_connected():
                cursor.close()
                conn.close()

def send_telegram(msg):
    url =
f"https://api.telegram.org/bot{TELEGRAM_CONFIG['token']}/sendMessage"
    data = {'chat_id': TELEGRAM_CONFIG['chat_id'], 'text': msg,
'parse_mode': 'Markdown'}
    try:
        requests.post(url, data=data)
        print("[Telegram] Mensaje enviado")
    except Exception as e:
        print(f"[Error Telegram] {e}")

def on_message(client, userdata, msg):
    global critical_exceeded
    payload = msg.payload.decode()
    print(f"[MQTT] Mensaje: {payload}")

    match = re.search(r'(\d+)', payload)
    if match:
        valor = int(match.group(1))
        insert_data(valor)

        if valor > 2000 and not critical_exceeded:
            critical_exceeded = True
            send_telegram(f" *Crítico*\nValor: *{valor}* > 2000")
        elif valor <= 2000 and critical_exceeded:
            critical_exceeded = False
            send_telegram(f" *Estable*\nValor: *{valor}* ≤ 2000")

# Configuración MQTT
client = mqtt.Client()
client.on_message = on_message
client.connect(MQTT_CONFIG['broker'], MQTT_CONFIG['port'])
client.subscribe(MQTT_CONFIG['topic'])
client.loop_forever()

```

- Configuración de Grafana

Con el fin de representar gráficamente los datos provenientes de los sensores de GLP, se configuró la herramienta Grafana para que acceda directamente a la base de datos del sistema y permita la creación de dashboards personalizados. A continuación, se detallan los pasos realizados para integrar la fuente de datos MySQL y generar las visualizaciones correspondientes:

Desde la interfaz principal de Grafana, en el menú “Connections” dar click en “Add new connection”, se seleccionó la opción MySQL. Esta acción permite iniciar la configuración de una fuente de datos basada en una base de datos relacional externa.

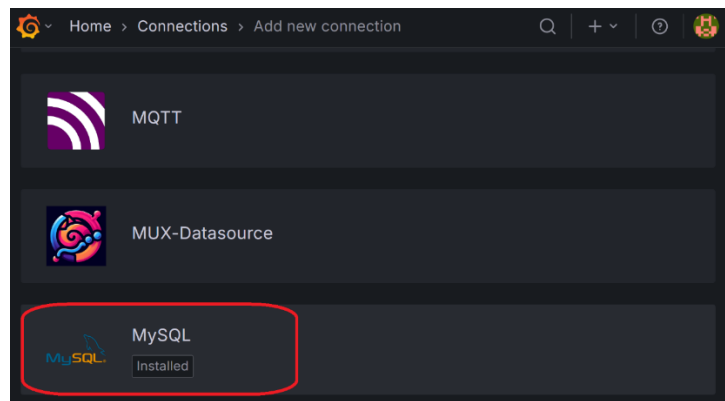


Figura 45. Instalación de complemento de MySQL en Grafana

En esta etapa, Grafana presenta un formulario de configuración de la fuente de datos, el cual permite establecer los parámetros de conexión con el servidor MySQL. Este formulario incluye secciones para definir el host y puerto donde se encuentra alojada la base de datos, así como el nombre de la base, y las credenciales de acceso necesarias para autenticar la conexión.

Figura 46. Configuración de la conexión a la base de datos

Luego de ingresar los parámetros, se hizo clic en “Save & Test”, y el sistema respondió con el mensaje “Database Connection OK”, confirmando que la conexión fue establecida exitosamente. Esta validación es fundamental antes de proceder con la construcción de visualizaciones.

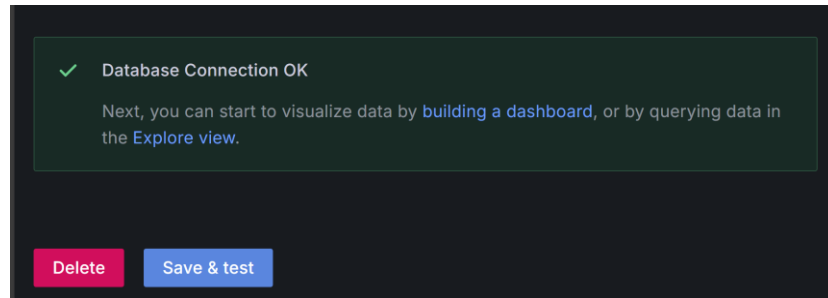


Figura 47. Confirmación exitosa de la conexión

Con la fuente de datos correctamente enlazada, se procedió a hacer clic en “Build a dashboard”, lo cual llevó a la pantalla inicial de diseño. Desde esta vista, Grafana permite crear múltiples widgets como gráficos de líneas, indicadores de valor, barras, tablas y alertas.

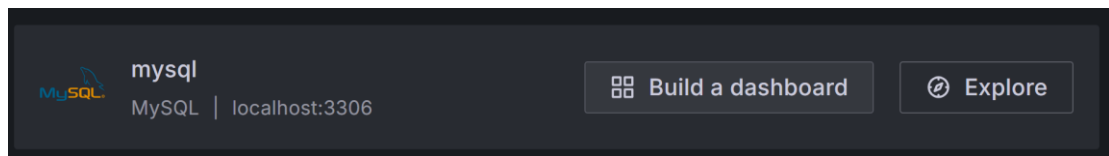


Figura 48. Interfaz de acceso a la fuente de datos MySQL desde Grafana

En esta etapa, se hizo clic en “Add visualization”, lo que habilitó la inserción de paneles de datos dinámicos. Cada widget fue configurado para consultar registros específicos de los prototipos o de la tabla de auditoría, lo cual permitió mostrar en tiempo real los niveles de concentración de GLP, frecuencia de eventos críticos y estado del sistema.

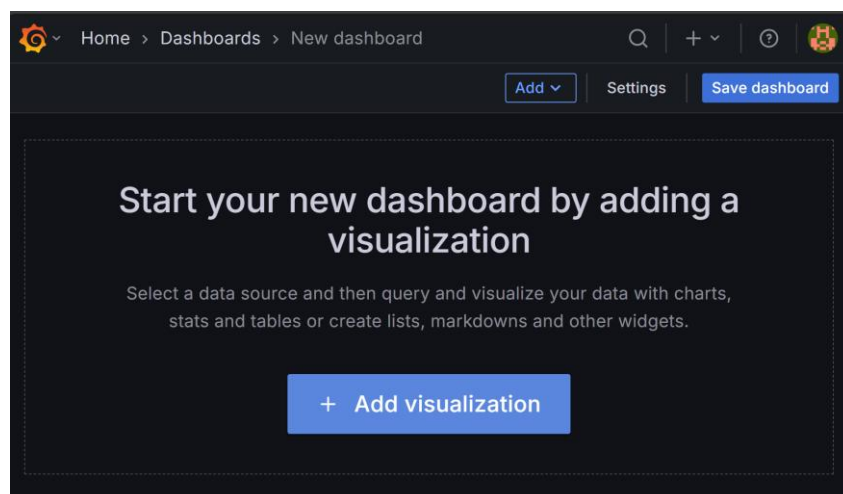


Figura 49. Interfaz para la creación de paneles visuales en Grafana

Con el objetivo de mostrar en tiempo real el valor más reciente de concentración de gas captado por cada prototipo, se configuró un panel tipo gauge dentro del dashboard de Grafana. Esta visualización es adecuada para representar variables instantáneas que deben ser interpretadas de manera rápida, como es el caso del nivel de GLP detectado. El gauge proporciona una interfaz visual intuitiva, donde el color y la posición del indicador permiten identificar de forma inmediata si el sistema se encuentra en un estado estable o crítico, según los umbrales definidos.

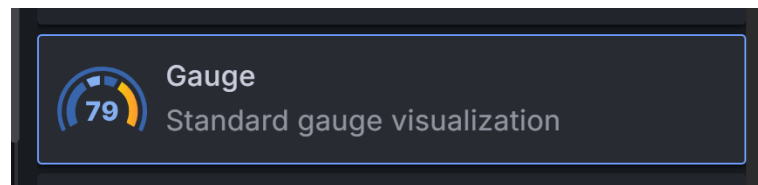


Figura 50. Selección del panel tipo Gauge en Grafana

```
SELECT valor_medido FROM DB_Tesis.Prototipo1  
ORDER BY id DESC LIMIT 1;
```

Para representar gráficamente la evolución del nivel de concentración de GLP registrado por los sensores, se utilizó el componente Stat de Grafana. Esta visualización permite observar cómo varía el valor medido a lo largo del tiempo, facilitando la detección de patrones, picos anómalos o eventos críticos. Esta herramienta es especialmente útil en sistemas de monitoreo continuo, donde el análisis de la tendencia temporal resulta fundamental para evaluar el comportamiento del entorno y la efectividad del sistema de detección.

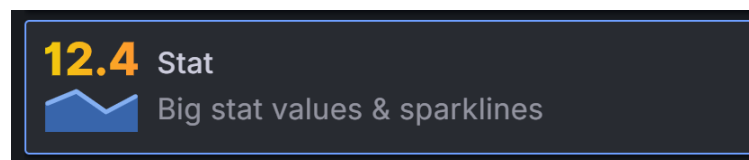


Figura 51. Selección del panel tipo Stat en Grafana

```
SELECT valor_medido FROM DB_Tesis.Prototipo1  
ORDER BY id DESC LIMIT 8500;
```

Para analizar la frecuencia de aparición de valores de concentración de GLP registrados por los sensores, se configuró un panel de tipo Histogram en Grafana. Esta visualización permite representar gráficamente cómo se distribuyen los datos a lo largo de diferentes intervalos o rangos, facilitando la detección de concentraciones comunes, valores atípicos o comportamientos inusuales en las mediciones. Es particularmente útil para evaluar la estabilidad del sistema en condiciones normales y observar la dispersión de los datos durante simulaciones o eventos de fuga.

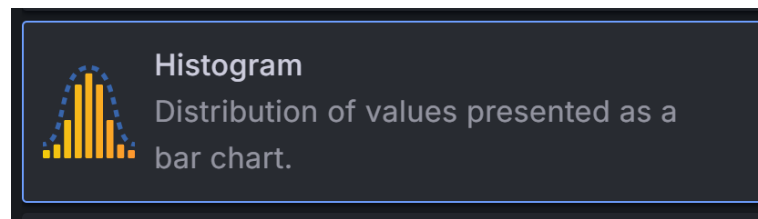


Figura 52. Selección del panel tipo Histogram en Grafana

```
SELECT valor_medido FROM DB_Tesis.Prototipo1
ORDER BY id DESC LIMIT 8500;
```

En la Figura 53, se muestra el dashboard principal diseñado en Grafana para el monitoreo simultáneo de los tres dispositivos prototipo. La interfaz agrupa tres tipos de visualizaciones por cada unidad: un indicador tipo Gauge, un panel Stat y un Histograma. Esta combinación permite al usuario obtener una visión rápida, detallada y analítica del comportamiento del sistema.

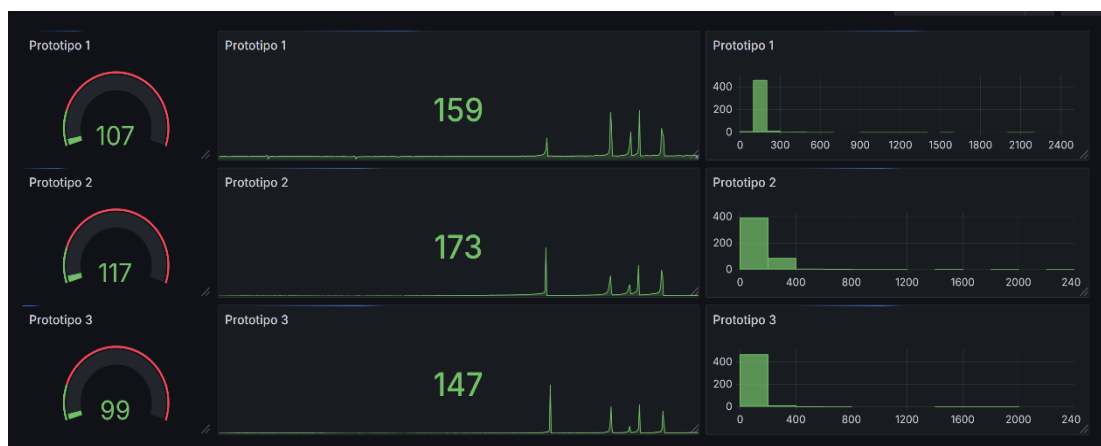
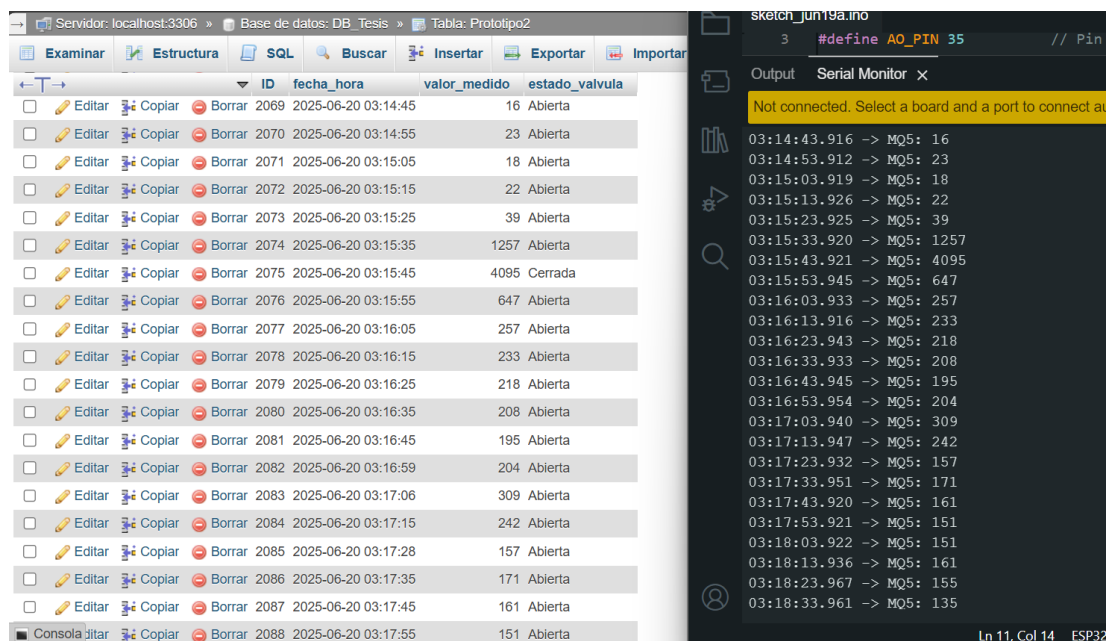


Figura 53. Panel de monitoreo en Grafana de los tres prototipos.

3.6 Fase de pruebas y validación final

3.6.1 Prueba de latencia de comunicación y registro de datos

Esta prueba tuvo como objetivo evaluar el retardo entre la lectura de un valor de concentración de gas por parte del sensor MQ-5 y su almacenamiento en la base de datos. El análisis se centró en determinar la eficiencia de la comunicación entre el microcontrolador ESP32, el protocolo MQTT y el script en Python encargado de insertar los datos en MySQL. Para ello, se conectó el ESP32 al computador mediante el puerto serial y se utilizó el monitor serial de Arduino para registrar la hora de lectura. Paralelamente, el servicio Python almacenó los datos con su marca temporal. La comparación entre ambas permitió calcular el tiempo de retardo y validar la capacidad de respuesta del sistema.



ID	fecha_hora	valor_medido	estado_valvula
2069	2025-06-20 03:14:45	16	Abierta
2070	2025-06-20 03:14:55	23	Abierta
2071	2025-06-20 03:15:05	18	Abierta
2072	2025-06-20 03:15:15	22	Abierta
2073	2025-06-20 03:15:25	39	Abierta
2074	2025-06-20 03:15:35	1257	Abierta
2075	2025-06-20 03:15:45	4095	Cerrada
2076	2025-06-20 03:15:55	647	Abierta
2077	2025-06-20 03:16:05	257	Abierta
2078	2025-06-20 03:16:15	233	Abierta
2079	2025-06-20 03:16:25	218	Abierta
2080	2025-06-20 03:16:35	208	Abierta
2081	2025-06-20 03:16:45	195	Abierta
2082	2025-06-20 03:16:59	204	Abierta
2083	2025-06-20 03:17:06	309	Abierta
2084	2025-06-20 03:17:15	242	Abierta
2085	2025-06-20 03:17:28	157	Abierta
2086	2025-06-20 03:17:35	171	Abierta
2087	2025-06-20 03:17:45	161	Abierta
2088	2025-06-20 03:17:55	151	Abierta

Timestamp	MQ5 Value
03:14:43.916	16
03:14:53.912	23
03:15:03.919	18
03:15:13.926	22
03:15:23.925	39
03:15:33.920	1257
03:15:43.921	4095
03:15:53.945	647
03:16:03.933	257
03:16:13.916	233
03:16:23.943	218
03:16:33.933	208
03:16:43.945	195
03:16:53.954	204
03:17:03.940	309
03:17:13.947	242
03:17:23.932	157
03:17:33.951	171
03:17:43.920	161
03:17:53.921	151
03:18:03.922	151
03:18:13.936	161
03:18:23.967	155
03:18:33.961	135

Figura 54. Verificación de integridad en la transmisión y almacenamiento de datos

Posteriormente, se extrajeron y compararon ambas marcas temporales con el fin de calcular el intervalo de tiempo que representa el retardo del sistema de comunicación. Esta información fue organizada y sistematizada en la Tabla 7, que permite observar los valores de retardo en distintas iteraciones del sistema.

Tabla 7. Medición de tiempos de respuesta y estado de válvula en condiciones controladas

Nro Prueba	Hora Sensado	Hora Registro	Retardo (seg)	Valor leído por el sensor	Registro en la DB	Estado de válvula
1	03:14:43	03:14:45	2	16	SI	Abierta
2	03:14:53	03:14:55	2	23	SI	Abierta
3	03:15:03	03:15:05	2	18	SI	Abierta
4	03:15:13	03:15:15	2	22	SI	Abierta
5	03:15:23	03:15:25	2	39	SI	Abierta
6	03:15:33	03:15:35	2	1257	SI	Abierta
7	03:15:43	03:15:45	2	4095	SI	Cerrada
8	03:15:53	03:15:55	2	647	SI	Abierta
9	03:16:03	03:16:05	2	257	SI	Abierta
10	03:16:13	03:16:15	2	233	SI	Abierta
11	03:16:23	03:16:25	2	218	SI	Abierta
12	03:16:33	03:16:35	2	208	SI	Abierta
13	03:16:43	03:16:45	2	195	SI	Abierta
14	03:16:53	03:16:59	6	204	SI	Abierta
15	03:17:03	03:17:06	3	309	SI	Abierta
16	03:17:13	03:17:15	2	242	SI	Abierta
17	03:17:23	03:17:28	2	157	SI	Abierta
18	03:17:33	03:17:35	2	171	SI	Abierta
19	03:16:53	03:17:45	2	161	SI	Abierta
20	03:17:03	03:17:55	2	151	SI	Abierta

En la Figura 55. Mensajes de alerta enviados a Telegram, se muestra la alerta enviada al usuario mediante Telegram tras detectarse una concentración crítica de gas, seguida de una notificación de estado estable al normalizarse los valores

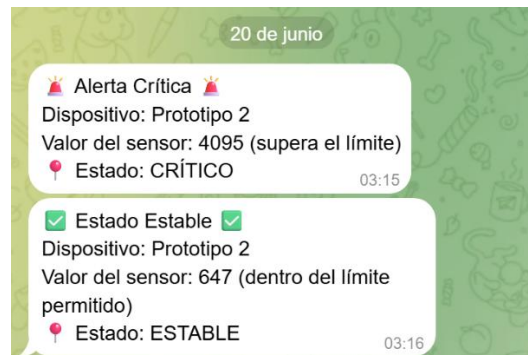


Figura 55. Mensajes de alerta enviados a Telegram

Disponibilidad del sistema

Para evaluar la disponibilidad del sistema IoT en condiciones operativas continuas, se llevó a cabo una prueba basada en el análisis de una ventana de tiempo de 24 horas. Durante este periodo, se esperaban 8,640 registros por prototipo, considerando una frecuencia de muestreo de un dato cada 10 segundos. A través de consultas a la base de datos MySQL, se verificó el número real de registros almacenados por cada dispositivo. Estos resultados, presentados en la Figura 56. Consulta de registros en la base de datos, permitieron calcular la disponibilidad individual de cada sistema. Estos datos reflejan la eficiencia del sistema en el envío y almacenamiento continuo de datos, considerando factores como conectividad, estabilidad del broker MQTT y rendimiento del servicio.

```
Database changed
MariaDB [DB_Tesis]> SELECT COUNT(*) FROM Prototipo1 WHERE fecha_hora
BETWEEN '2025-05-11 00:00:00' AND '2025-05-12 00:00:00';
+-----+
| COUNT(*) |
+-----+
|      7979 |
+-----+
1 row in set (0.038 sec)

MariaDB [DB_Tesis]> SELECT COUNT(*) FROM Prototipo2 WHERE fecha_hora
BETWEEN
'2025-05-11 00:00:00' AND '2025-05-12 00:00:00';
+-----+
| COUNT(*) |
+-----+
|      7248 |
+-----+
1 row in set (0.031 sec)

MariaDB [DB_Tesis]> SELECT COUNT(*) FROM Prototipo3 WHERE fecha_hora
BETWEEN
'2025-05-11 00:00:00' AND '2025-05-12 00:00:00';
+-----+
| COUNT(*) |
+-----+
|      7965 |
+-----+
1 row in set (0.020 sec)
```

Figura 56. Consulta de registros en la base de datos

$$Datos\ esperados = \frac{Ventana\ de\ tiempo}{Intervalo\ de\ muestreo}$$

$$Datos\ esperados = \frac{24\ horas * 60\ min * 60\ seg}{10\ seg} = \frac{86400}{10} = 8640$$

$$Disponibilidad\ (\%) = \left(\frac{Datos\ recibidos}{Datos\ esperados} \right) * 100$$

Tabla 8. Análisis de disponibilidad del sistema

Prototipo	Registros Esperados	Registros Recibidos	Disponibilidad
Prototipo 1	8640	7979	92.34 %
Prototipo 2	8640	7248	84.89 %
Prototipo 3	8640	7965	92.21 %

$$Disponibilidad\ Prom = \frac{92.34 + 83.89 + 92.21}{3} = 89.48 \%$$

El Prototipo 2 presentó una disponibilidad relativamente inferior en comparación con los otros dos dispositivos evaluados, lo cual resulta notable considerando que todos los prototipos fueron sometidos a las mismas condiciones ambientales, instalados en el mismo entorno físico y conectados a una red inalámbrica común. Esta diferencia sugiere que la causa principal de la disminución en la disponibilidad no está relacionada con factores externos, sino con posibles particularidades técnicas del propio hardware.

En específico, se considera probable que el microcontrolador ESP32 utilizado en el Prototipo 2 presente defectos de fabricación o degradación en su módulo de comunicación Wi-Fi, estas condiciones podrían provocar reinicios espontáneos de conexión, latencia en el envío de datos o pérdidas de enlace momentáneas con el broker MQTT alojado en la nube, generando interrupciones en la transmisión periódica de datos.

3.7 Análisis económico

El análisis económico del proyecto tiene como propósito identificar y cuantificar los costos asociados al diseño, implementación y validación del sistema IoT para el control y monitoreo de fugas de GLP en entornos domésticos. Para ello, se han considerado los principales rubros necesarios durante las distintas etapas del desarrollo, incluyendo la adquisición de componentes electrónicos (microcontroladores, sensores y actuadores), el uso de infraestructura tecnológica (servidor), así como los gastos operativos relacionados con conectividad, impresión de materiales, transporte y alimentación durante el periodo de pruebas. El detalle de los costos refleja en la Tabla 9.

Tabla 9. Tabla de recursos

N°.	Concepto	Cantidad	Valor Unitario USD	Valor Total USD
1	Microcontrolador	3	15	45
2	Sensor	3	4	12
3	Actuador	3	5	15
4	Servidor	1	150	150
5	Conexión a internet	3 meses	25	75
6	Impresiones	3 meses	5	15
7	Transporte y movilización	3 meses	25	75
8	Alimentación	3 meses	50	150
Sub-Total				537.00
Imprevistos (10%)				53.70
Total				590.70

3.8 Prototipo Final



Figura 57. Sistema de control y monitoreo de GLP instalado en el cilindro

CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- El sistema fue diseñado con éxito al integrar una arquitectura funcional basada en el sensor MQ-5 y el microcontrolador ESP32, componentes que permitieron detectar de manera precisa y oportuna concentraciones peligrosas de GLP en ambientes domésticos. La selección de estos elementos, junto con la definición de umbrales críticos, garantizó una identificación temprana del gas, cumpliendo el objetivo de diseño orientado a la seguridad preventiva.
- Se logró implementar de forma efectiva un mecanismo automático de cierre de válvulas utilizando tecnología IoT, lo que permitió responder de manera inmediata ante la detección de condiciones críticas. El servomotor controlado por el ESP32 ejecutó con precisión la acción correctiva sin intervención humana, evidenciando la capacidad del sistema para contener la propagación del gas y mitigar el riesgo de accidentes domésticos.
- Las pruebas funcionales y de rendimiento demostraron que el sistema opera de forma eficaz, eficiente y confiable. Se verificaron tiempos de respuesta inferiores a 2 segundos desde la detección hasta el almacenamiento y visualización de datos, además de una adecuada disponibilidad del servicio. Esta integración exitosa de sensado, comunicación, almacenamiento, monitoreo y alertas valida el sistema como una solución tecnológicamente viable y replicable para la prevención de riesgos asociados al GLP.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda incorporar un sistema de alimentación ininterrumpida (como baterías recargables o módulos UPS) que garantice el funcionamiento continuo del sistema de detección y control, especialmente durante cortes de energía. Esta mejora es crucial para asegurar la activación del mecanismo de cierre de válvula y el envío de alertas incluso en condiciones de emergencia.
- Se recomienda incorporar redundancia en los nodos de sensado y comunicación, mediante la utilización de múltiples sensores en paralelo o la duplicación de rutas de transmisión de datos. Esta estrategia permitiría verificar lecturas críticas por consenso, reducir la probabilidad de fallos por desconexión o error puntual de un componente, y aumentar la confiabilidad general del sistema
- Se propone mejorar el sistema de transmisión de datos MQTT mediante mecanismos de reintento automático y gestión local de paquetes no enviados. Esta optimización permitiría elevar la disponibilidad del sistema por encima del 95 %, reducir pérdidas de datos durante desconexiones temporales, y asegurar una mayor integridad en el registro de eventos críticos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] International Energy Agency, "LPG: A cleaner energy solution for cooking," Paris, 2020. Accessed: Apr. 01, 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/a-vision-for-clean-cooking-access-for-all>
- [2] Instituto Nacional de Estadística y Censos, "Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares Urbanos y Rurales," Quito, 2020. Accessed: Apr. 01, 2025. [Online]. Available: <https://www.ecuadorencifras.gob.ec>
- [3] Cuerpo de Bomberos del Distrito Metropolitano de Quito, "Informe de Rendición de Cuentas 2021," Quito, 2022. Accessed: Apr. 01, 2025. [Online]. Available: <https://www.bomberosquito.gob.ec/images/pdf/cuentas/informerc21.pdf>
- [4] K. Hernández and L. Quishpe, "SISTEMA DE SEGURIDAD AUTÓNOMO PARA LA DETECCIÓN DE FUGAS DE GAS GLP EN UN ÁREA RESIDENCIAL," Quito, 2023.
- [5] P. Chérrez and M. Campoverde, "Development of an IoT prototype for domestic gas leak detection," *Dominio de las Ciencias*, vol. 8, no. 3, pp. 963–979, Sep. 2022, doi: 10.23857/dc.v8i3.
- [6] K. D. Sharma, P. Gupta, and R. Singh, "SMS and Email Based Gas Leakage Detection System Journal: International Journal of Engineering Research and," *Int J Eng Res Appl*, vol. 10, no. 2, 2020.
- [7] Á. J. Barajas Cortes *et al.*, "Mobile robotic platform IoT-based for LP gas detection," in *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2023. doi: 10.18687/laccei2023.1.1.1470.
- [8] E. C. Camargo Burgos, A. Alarcón Paredes, and G. A. Alonso Silverio, "Un dispositivo IoT de fácil acoplamiento para la supervisión de la presión del gas LP," *XIKUA Boletín Científico de la Escuela Superior de Tlahuelilpan*, vol. 12, no. Especial, pp. 57–64, Jul. 2024, doi: 10.29057/xikua.v12iespecial.12739.
- [9] M. Sreerama Murty, S. Rao Dhanikonda, P. Sowjanya, P. Jagdish Kumar, N. S. Chandra, and C. Dastagiraiah, "Smart Gas Leakage Detector Using IoT Sensors," Mar. 2024. [Online]. Available: www.ijisae.org
- [10] Niveditha N, Harshini B, and Peria Mahalakshmi M, "Smart Gas Leakage Detection Using IOT," *International Research Journal on Advanced Engineering Hub (IRJAEH)*, vol. 3, no. 03, pp. 687–692, Mar. 2025, doi: 10.47392/IRJAEH.2025.0096.
- [11] C. Reyes and A. Arguello, "Diseño y análisis de factibilidad de red para distribución de GLP para un condominio," Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, 2023.

- [12] INEN, “INSTALACIONES DE GASES COMBUSTIBLES PARA USO RESIDENCIAL, COMERCIAL E INDUSTRIAL. REQUISITOS,” Quito, 2014.
- [13] Defensoría del Pueblo, “Gas licuado de petróleo y el ejercicio de derechos en Ecuador,” Quito, 2018.
- [14] J. Guamán, “Impacto Económico de la Implementación de Tecnologías Eficientes de Calentamiento de Agua,” *Energía*, pp. 275–282, 2016.
- [15] INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN, “CILINDROS PARA GLP DE USO DOMÉSTICO. VÁLVULAS. REQUISITOS E INSPECCIÓN,” Feb. 2009.
- [16] Ministerio de Energía y Minas, “El intercambio de cilindros de gas de uso doméstico se puede realizar de forma gratuita, en todo el país.” Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: <https://www.rekursyenergia.gob.ec/el-intercambio-de-cilindros-de-gas-de-uso-domestico-se-puede-realizar-de-forma-gratuita-en-todo-el-pais/>
- [17] M. Sanchez, “GLP en Ecuador.” Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: <https://obest.uta.edu.ec/wp-content/uploads/2021/12/GLP-en-Ecuador.pdf>
- [18] “Capacidades de cilindros de GLP en el mercado.” Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: <https://sc04.alicdn.com/kf/Hee857b45bf3c495db3beacae8b823115z/231504858/Hee857b45bf3c495db3beacae8b823115z.jpg>
- [19] V. Cooper, “¿Qué es IoT (Internet de las cosas)? Significado y ejemplos.” Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: <https://www.splashtop.com/es/blog/what-is-iot?srsId=AfmBOoo5xcDa8o9c2ss1uT6MHNSdHZSnoW4hmrl9591BVhgCXoCsguE9&>
- [20] A. Al-Fuqaha and M. Guizani, “Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Application,” IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS. Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7123563>
- [21] J. Hernández, “Internet de las Cosas (IoT), qué es y cómo funciona.” Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: <https://impactotic.co/tecnologia/internet-de-las-cosas-iot>
- [22] J. Escalante, “IoT: Tecnologías, aplicaciones, estado actual y futuro,” OpenWebinars. Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: <https://openwebinars.net/blog/iot-tecnologias-aplicaciones-estado-actual-y-futuro>
- [23] “Capas de la arquitectura IoT.” Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: <https://www.istecdigital.es/app/uploads/2022/01/image007-1024x552.png>

- [24] Á. López, "Cómo conseguir una arquitectura IoT segura." Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: <https://itcl.es/blog/tres-pasos-para-conseguir-una-arquitectura-iot-segura/>
- [25] J. Wang, "Wireless-Tech." Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: <https://www.allion.com.tw/wp-content/uploads/2021/03/Wireless-Tech.jpg>
- [26] TagoIO Team, "Type of IoT wireless connectivity." Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: <https://tago.io/blog/type-of-iot-wireless-connectivity>
- [27] EDGE CORE, "Edgecore Enterprise-grade Wi-Fi 6 AP." Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: <https://wifi.edge-core.com/wp-content/uploads/edgecore-wifi6-ap-5-1536x1379.png>
- [28] BLE Mobile apps, "BLE for Smart Applications." Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: <https://www.blemobileapps.com/wp-content/uploads/2017/04/ble-smart-application.png>
- [29] Y. Huang, "Popular applications of LoRa modules." Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: <https://www.mokosmart.com/wp-content/uploads/2024/02/LoRa-modules-applications-1100%C3%97700.webp>
- [30] M. Li, F. R. Yu, P. Si, and Y. Zhang, "Energy-Efficient Machine-to-Machine (M2M) Communications in Virtualized Cellular Networks with Mobile Edge Computing (MEC)," *IEEE Trans Mob Comput*, vol. 18, no. 7, pp. 1541–1555, Jul. 2019, doi: 10.1109/TMC.2018.2865312.
- [31] "Typical NB-IOT applications." Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: <https://blog.powerbox.com.au/hs-fs/hubfs/NB-IOT-Infographic-600x400p.jpg?width=2583&name=NB-IOT-Infographic-600x400p.jpg>
- [32] SMART HOME - SMART LIVING, "Zigbee and Z-wave explained." Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: <https://smart-living.es/zigbee-and-z-wave-explained/?srsltid=AfmBOoo1O3Z1VVnAfDRJRYOzn5bQdgCDbepO3elkzVzabOlvdjW2DJZH>
- [33] "Benefits of Zigbee." Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: https://csa-iot.org/wp-content/uploads/2021/12/Zigbee_SmartHome-768x790.png
- [34] Xaldigital, "Tecnologías y protocolos de comunicación de IoT." Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: <https://www.xaldigital.com/blog/tecnologias-y-protocolos-de-comunicacion-de-iot>
- [35] A. M and L. C A, "MQTT Protocol for Resource Constrained IoT Applications : A Review," *SSRN Electronic Journal*, Aug. 2022, doi: 10.2139/SSRN.4299372.
- [36] "MQTT-Protokoll im Embedded-Bereich." Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: https://ebyteiot.com/cdn/shop/articles/2023191511101642_1296x.png?v=1705295700

- [37] C. Bormann, A. P. Castellani, and Z. Shelby, "CoAP: An application protocol for billions of tiny internet nodes," *IEEE Internet Comput*, vol. 16, no. 2, pp. 62–67, Mar. 2012, doi: 10.1109/MIC.2012.29.
- [38] H. H. Azeez and M. Z. Abdullah, "Performance analysis of constrained application protocol (CoAP)," *AIP Conf Proc*, vol. 2591, no. 1, Mar. 2023, doi: 10.1063/5.0119584/2879892.
- [39] "CoAP ." Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: https://1.bp.blogspot.com/-Q_f9u6y353I/W71ylmaNRvI/AAAAAAB9YU/uDXQUypqNaYyPPbp-sIOrJmdAOtTEzN4QCLcBGAs/s1600/CoAP.png
- [40] Y. An, F. R. Yu, J. Li, J. Chen, and V. C. M. Leung, "Edge Intelligence (EI)-Enabled HTTP Anomaly Detection Framework for the Internet of Things (IoT)," *IEEE Internet Things J*, vol. 8, no. 5, pp. 3554–3566, Mar. 2021, doi: 10.1109/JIOT.2020.3024645.
- [41] R. Herrero, "Analysis of the constrained application protocol over quick UDP internet connection transport," *Internet of Things*, vol. 12, p. 100328, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.IOT.2020.100328.
- [42] "¿Qué es el certificado SSL?" Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: <https://algenio.com/wp-content/webp-express/webp-images/uploads/2021/11/http-vs-https-1.png.webp>
- [43] N. Naik, "Choice of effective messaging protocols for IoT systems: MQTT, CoAP, AMQP and HTTP," *2017 IEEE International Symposium on Systems Engineering, ISSE 2017 - Proceedings*, Oct. 2017, doi: 10.1109/SYSENG.2017.8088251.
- [44] P. Gupta and M. Indhira om prabha, "A Survey of Application Layer Protocols for Internet of Things," *Proceedings - International Conference on Communication, Information and Computing Technology, ICCICT 2021*, 2021, doi: 10.1109/ICCICT50803.2021.9510140.
- [45] "Diagrama de flujo de AMQP." Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: https://blogger.googleusercontent.com/img/b/R29vZ2xl/AVvXsEhID109gR51_1w8zwMsYMEI232Zy4gO7tM7wlgT8U0598oan1laH1czEXaHDCtYiyFcygFK-Tna1KmR3Xw0C9u7XUQ2rt8X8TwB_5nsUIwiLcN1nzAPr-CX0IQ69wy5YZTEbD9ysgf8U4/s1600/14.PNG
- [46] M. A. Talha *et al.*, "IoT-Based Real-Time Monitoring And Control System for Distribution Substation," *2023 10th IEEE International Conference on Power Systems, ICPS 2023*, 2023, doi: 10.1109/ICPS60393.2023.10428721.
- [47] E. B. Priyanka, C. Maheswari, S. Thangavel, and M. P. Bala, "Integrating IoT with LQR-PID controller for online surveillance and control of flow and pressure in fluid transportation system," *J Ind Inf Integr*, vol. 17, p. 100127, Mar. 2020, doi: 10.1016/J.JII.2020.100127.

- [48] K. B. Kumar Sai, S. Mukherjee, and H. Parveen Sultana, "Low Cost IoT Based Air Quality Monitoring Setup Using Arduino and MQ Series Sensors With Dataset Analysis," *Procedia Comput Sci*, vol. 165, pp. 322–327, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.PROCS.2020.01.043.
- [49] E. J. B. Aceveda, E. S. Lopez, C. D. H. Mendoza, J. A. B. Delmo, J. S. Sarmiento, and M. J. F. T. Rayos, "Evaluating the Correlation between MQ Gas Sensors with Temperature and Humidity Sensor on an Outdoor Setting," *2024 14th International Conference on System Engineering and Technology, ICSET 2024 - Proceeding*, pp. 12–16, 2024, doi: 10.1109/ICSET63729.2024.10774817.
- [50] "Sensores MQ." Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: https://www.sensora.com/2652-large_default/kit-9-sensores-de-aire-y-gas-mq-2-mq-3-mq-4-mq-5-mq-6-mq-7-mq-8-mq-9-mq-135.jpg
- [51] M. A. Baballe, U. Y. Magashi, B. I. Garko, A. A. Umar, Y. R. Magaji, and M. Surajo, "Automatic Gas Leakage Monitoring System Using MQ-5 Sensor," *Review of Computer Engineering Research*, vol. 8, no. 2, pp. 64–75, Dec. 2021, doi: 10.18488/JOURNAL.76.2021.82.64.75.
- [52] R. Kiran, V. M. B, A. N. G, and S. M. T, "Integration of MQ-5 Gas Sensors with Arduino Board," *Journal of Electrical Systems*, vol. 20, no. 10s, pp. 2154–2165, Jul. 2024, doi: 10.52783/JES.5540.
- [53] M. Babiuch, P. Foltyniek, and P. Smutny, "Using the ESP32 microcontroller for data processing," *Proceedings of the 2019 20th International Carpathian Control Conference, ICC 2019*, May 2019, doi: 10.1109/CARPATHIANCC.2019.8765944.
- [54] S. Morimoto, Y. Tong, Y. Takeda, T. Hirasa, and K. Hatanaka, "Servo Drive System and Control Characteristics of Salient Pole Permanent Magnet Synchronous Motor," *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 29, no. 2, pp. 338–343, 1993, doi: 10.1109/28.216541.
- [55] "Servomotor MG995." Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: <https://moviltronics.com/wp-content/uploads/2016/02/D15005-600x519.jpeg>
- [56] "Seguridad en el Manejo del GLP: Protocolos y Medidas de Seguridad – Guval Gas." Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: <https://guvalgas.com/seguridad-en-el-manejo-del-glp-protocolos-y-medidas-de-seguridad/>
- [57] Colgas, "Emergencia de Gas GLP ¿Cómo actuar?" Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: <https://colgas.com/blog/emergencia-de-gas-como-actuar/>
- [58] "Fugas de gas propano: Principales causas y cómo prevenirlas." Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: <https://latam-blog.msasafety.com/blog-es-fugas-de-gas-propano-principales-causas-y-como-prevenirlas/>

- [59] “What is IoT Monitoring? A Deep Dive into Real-Time Data and Automation.” Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: https://www.c3automation.com/blog/what-is-iot-monitoring/?utm_source=chatgpt.com
- [60] Norma Ecuatoriana de la Contrucción, “INSTALACIONES DE GASES COMBUSTIBLES PARA USO RESIDENCIAL, COMERCIAL E INDUSTRIAL; NEC-SB-IG,” Apr. 2021.
- [61] “NTE INEN 111: Cilindros de GLP - Requisitos e Inspección.” Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: <https://studylib.es/doc/5799517/nte-inen-0111--cilindros-de-acero-soldados-para-gas?p=3>
- [62] INTERNATIONAL and STANDARD, “EN 60079-29-1-2019.” Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/19472/e9a053c0bd7547e5abece36afbe523c3/IEC-60079-29-1-2016.pdf>
- [63] “ESP32 - Especificaciones y diseños.” Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: <https://www.circuitos-electricos.com/esp32-especificaciones-y-disenos/>
- [64] “ESP32 DEVKIT V1 - Nodo Electrónico.” Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: <https://nodoelectronico.com/tarjetas-de-desarrollo/esp32-devkit-v1/>
- [65] “Sensores MQ.” Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: https://http2.mlstatic.com/D_NQ_NP_920217-MLM51200864228_082022-O-kit-sensores-gas-humo-alcohol-aire-mq-2-3-4-5-6-7-8-9-135.webp
- [66] V. Djordjevic *et al.*, “Data-driven control of hydraulic servo actuator based on adaptive dynamic programming,” *Discrete and Continuous Dynamical Systems - S*, vol. 15, no. 7, pp. 1633–1650, Jun. 2022, doi: 10.3934/DCDSS.2021145.
- [67] K. M. Hosny, A. Magdi, A. Salah, O. El-Komy, and N. A. Lashin, “Internet of things applications using Raspberry-Pi: a survey,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 13, no. 1, pp. 902–910, Feb. 2023, doi: 10.11591/ijece.v13i1.pp902-910.
- [68] “Imagen Raspberry Pi.” Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: <https://i.ebayimg.com/images/g/DEgAAOSwguVky~uT/s-l1600.webp>
- [69] “Protoboard, ¿Qué es y cómo se usa?” Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: <https://descubrearduino.com/protoboard/>
- [70] Z. Peterson, “¿Qué es una PCB o Placa de Circuito Impreso? | Altium.” Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: <https://resources.altium.com/es/p/what-is-a-pcb>

- [71] “Cómo funciona un cilindro de Gas LP | REGIO GAS.” Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: <https://regiogas.com.mx/blog/como-funciona-un-cilindro-de-gas-lp/>
- [72] “Imagen de cilindro glp.” Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: <https://pycca.vteximg.com.br/arquivos/ids/255233-600-600/A77335.png?v=638452472178600000>
- [73] A. Navarro, “Introducción a Proteus: Una guía completa para principiantes.” Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: <https://tecnobits.com/introduccion-proteus-principiantes/>
- [74] “¿Qué hace el programa cura? ¿Cómo puede mejorar la calidad de nuestras piezas impresas en 3D? - Impresión 3D.” Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: <https://control3d.net/que-hace-el-programa-cura-como-puede-mejorar-la-calidad-de-nuestras-piezas-impresas-en-3d/>

ANEXOS

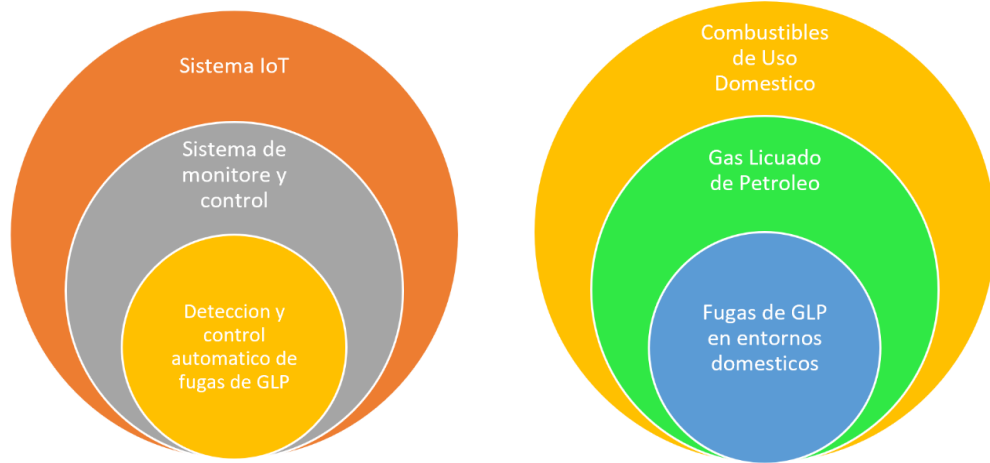


Figura A 1. Categorización de Variables

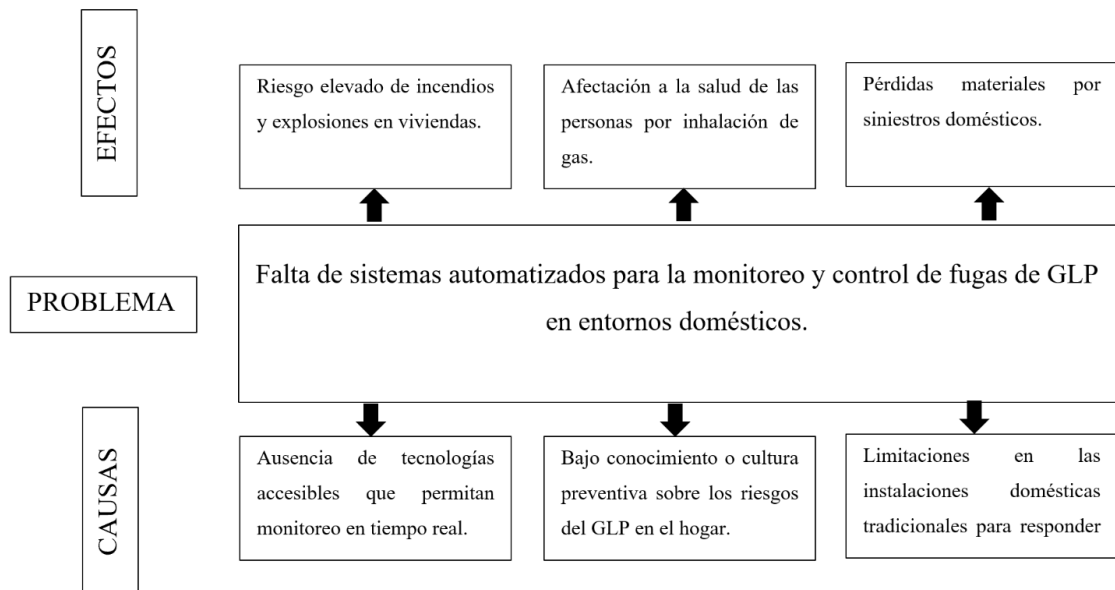


Figura A 2. Árbol del problema