

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,  
MECÁNICA E INFORMÁTICA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**



**TESIS**

**DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN  
SISTEMA ELECTRÓNICO DE DETECCIÓN DE  
FUGAS DE AGUA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN  
DOMICILIARIA A NIVEL DE PROTOTIPO**

**PRESENTADO POR:**

Br. JUAN ALDER ELGUERA TELLO

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL  
DE INGENIERO ELECTRÓNICO**

**ASESOR:**

MSc. Ing. FERNANDO TAGLE CARBAJAL

**CUSCO - PERÚ**

**2026**



# Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

## INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor FERNANDO TAGLE CARBAJAL.....  
..... quien aplica el software de detección de similitud al  
trabajo de investigación/tesis titulada: DESARROLLO E IMPIEMENTACIÓN DE  
UN SISTEMA ELECTRÓNICO DE DETECCIÓN DE FUGAS DE  
AGUA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DOMICILIARIA A NIVEL DE  
PROTOTIPO.....

Presentado por: JUAN ALDER ELGUERA TELLO..... DNI N° 70772909.....;  
presentado por: ..... DNI N°: .....  
Para optar el título Profesional/Grado Académico de INGENIERO ELECTRÓNICO.....

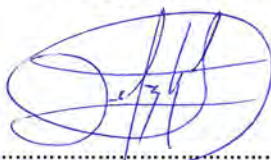
Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 3 veces, mediante el  
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de**  
**Similitud en la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 7 %.

### Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

| Porcentaje     | Evaluación y Acciones                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Marque con una (X)                  |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Del 1 al 10%   | No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.                                                                                                                                                                                                                                                               | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Del 11 al 30 % | Devolver al usuario para las subsanaciones.                                                                                                                                                                                                                                                                     | <input type="checkbox"/>            |
| Mayor a 31%    | El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley. | <input type="checkbox"/>            |

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 14 de AGOSTO..... de 20 26.....

  
Firma

Post firma FERNANDO TAGLE CARBAJAL

Nro. de DNI 29585972

ORCID del Asesor 0000-0003-0421-5277

### Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: oid: 27259:G14380516

# Tesis\_Elguera\_Alder\_Biblioteca.pdf

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

## Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:614380516

Fecha de entrega

14 ago 2026, 2:35 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

14 ago 2026, 2:46 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

Tesis\_Elguera\_Alder\_Biblioteca.pdf

Tamaño del archivo

39.3 MB

250 páginas

50.258 palabras

279.084 caracteres

# 7% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

## Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

## Fuentes principales

- 4%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 5%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

## Marcas de integridad

### N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**  
40 caracteres sospechosos en N.º de páginas  
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

# DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a mis padres,

por su amor, apoyo incondicional,  
confianza y sacrificio, que hicieron posible  
la culminación de esta etapa de mi vida.

# **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios por brindarme salud, fortaleza y sabiduría para culminar satisfactoriamente esta etapa de mi formación profesional.

Expreso mi más profundo agradecimiento a mis padres y a mi familia por su amor, apoyo incondicional, confianza y constante motivación, pilares fundamentales para alcanzar este importante objetivo.

Mi sincero agradecimiento al Ing. M. Sc. Fernando Tagle Carbajal, asesor de la presente tesis, por su orientación, dedicación, conocimientos y valiosas observaciones, las cuales fueron esenciales para el desarrollo y culminación de esta investigación.

Asimismo, agradezco a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, quienes contribuyeron a mi formación académica y profesional a lo largo de la carrera.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de una u otra manera, brindaron su apoyo y contribuyeron al desarrollo de este trabajo de investigación.

# Índice

|                                                     |           |
|-----------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. GENERALIDADES</b>                             | <b>1</b>  |
| 1.1. Problema de Investigación . . . . .            | 1         |
| 1.2. Formulación del problema . . . . .             | 3         |
| 1.2.1. Problema general . . . . .                   | 3         |
| 1.2.2. Problemas específicos . . . . .              | 3         |
| 1.3. Justificación . . . . .                        | 4         |
| 1.3.1. Justificación ambiental . . . . .            | 4         |
| 1.3.2. Justificación económica . . . . .            | 4         |
| 1.3.3. Justificación social . . . . .               | 4         |
| 1.3.4. Justificación tecnológica . . . . .          | 4         |
| 1.4. Objetivos . . . . .                            | 5         |
| 1.4.1. Objetivo general . . . . .                   | 5         |
| 1.4.2. Objetivos específicos . . . . .              | 5         |
| 1.5. Alcances y limitaciones . . . . .              | 5         |
| 1.5.1. Alcances . . . . .                           | 5         |
| 1.5.2. Limitaciones . . . . .                       | 6         |
| 1.6. Antecedentes . . . . .                         | 6         |
| 1.6.1. Antecedente internacionales . . . . .        | 6         |
| 1.6.2. Antecedente nacional . . . . .               | 7         |
| 1.6.3. Antecedente local . . . . .                  | 9         |
| 1.7. Metodología . . . . .                          | 10        |
| 1.7.1. Tipo y enfoque de la investigación . . . . . | 10        |
| 1.7.2. Diseño de la investigación . . . . .         | 10        |
| 1.7.3. Población y muestra . . . . .                | 11        |
| 1.7.4. Variables e indicadores . . . . .            | 12        |
| <b>2. MARCO TEÓRICO</b>                             | <b>14</b> |

|           |                                                                                                   |           |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.1.      | Redes domiciliarias de agua . . . . .                                                             | 14        |
| 2.2.      | Concepto y origen de las fugas de agua . . . . .                                                  | 15        |
| 2.2.1.    | Clasificación de fugas según su detección . . . . .                                               | 16        |
| 2.2.2.    | Importancia de la detección temprana . . . . .                                                    | 16        |
| 2.3.      | Técnicas y métodos para la detección de fugas . . . . .                                           | 17        |
| 2.3.1.    | Métodos convencionales . . . . .                                                                  | 17        |
| 2.3.2.    | Métodos electrónicos . . . . .                                                                    | 17        |
| 2.3.3.    | Microcontrolador ESP32 . . . . .                                                                  | 18        |
| 2.3.4.    | Diagrama de Bloques Funcional del ESP32 . . . . .                                                 | 19        |
| 2.3.5.    | Pinout del ESP32 . . . . .                                                                        | 20        |
| 2.3.6.    | Descripción de los Pines del ESP32 . . . . .                                                      | 20        |
| 2.3.7.    | Pines GPIO Entrada/Salida Digital . . . . .                                                       | 21        |
| 2.3.8.    | Entradas Analógicas (ADC) . . . . .                                                               | 21        |
| 2.3.9.    | Salidas Analógicas (DAC) . . . . .                                                                | 21        |
| 2.3.10.   | Pines de Comunicación . . . . .                                                                   | 21        |
| 2.3.11.   | Pines de Alimentación . . . . .                                                                   | 22        |
| 2.3.12.   | Pines Especiales . . . . .                                                                        | 22        |
| 2.4.      | Módulo ESP8266 . . . . .                                                                          | 23        |
| 2.5.      | Entorno de Desarrollo Integrado Arduino (Arduino IDE) . . . . .                                   | 25        |
| 2.6.      | Buzzer LTE 1081 J-R-ST . . . . .                                                                  | 27        |
| 2.7.      | Sistema de Comunicación Inalámbrica Wi-Fi . . . . .                                               | 28        |
| 2.8.      | Protocolo de Comunicación . . . . .                                                               | 30        |
| 2.9.      | Python como Herramienta Integral para el Servidor y la Interfaz Gráfica de<br>Monitoreo . . . . . | 33        |
| 2.10.     | Python como Servidor de Procesamiento de Datos . . . . .                                          | 33        |
| 2.11.     | Interfaz Gráfica Desarrollada con Flet . . . . .                                                  | 35        |
| <b>3.</b> | <b>DISEÑO E IMPLEMENTACION DEL SISTEMA</b>                                                        | <b>36</b> |
| 3.1.      | Arquitectura general del sistema de detección de fugas de agua . . . . .                          | 36        |
| 3.2.      | Transmisión de paquetes de datos mediante TCP/IP . . . . .                                        | 37        |

|        |                                                                                                                  |    |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.1. | Estructura de los paquetes de datos . . . . .                                                                    | 38 |
| 3.2.2. | Trama de presión . . . . .                                                                                       | 39 |
| 3.2.3. | Trama de flujo principal . . . . .                                                                               | 39 |
| 3.2.4. | Trama de flujo del ramal del tanque . . . . .                                                                    | 40 |
| 3.2.5. | Trama de flujo del ramal de lavandería . . . . .                                                                 | 40 |
| 3.2.6. | Recepción y clasificación de las tramas . . . . .                                                                | 41 |
| 3.2.7. | Sincronización de las mediciones . . . . .                                                                       | 41 |
| 3.2.8. | Filtrado y validación de los datos recibidos . . . . .                                                           | 42 |
| 3.2.9. | Tramas de control . . . . .                                                                                      | 42 |
| 3.3.   | Diagrama de bloques del sistema electrónico de detección de fugas de agua . .                                    | 43 |
| 3.4.   | Diseño del sistema electrónico . . . . .                                                                         | 46 |
| 3.4.1. | Arquitectura e integración de los componentes del sistema electrónico<br>de detección de fugas de agua . . . . . | 46 |
| 3.4.2. | Diseño electrónico y eléctrico del sistema de detección de fugas de agua.                                        | 47 |
| 3.4.3. | Unidad de Procesamiento: ESP32 . . . . .                                                                         | 48 |
| 3.4.4. | Módulo de Adquisición de Datos . . . . .                                                                         | 51 |
| 3.4.5. | Adaptación de niveles lógicos entre el sensor de flujo y el<br>microcontrolador . . . . .                        | 52 |
| 3.5.   | Sensores del sistema . . . . .                                                                                   | 53 |
| 3.5.1. | Sensor de Flujo YF-S201 . . . . .                                                                                | 53 |
| 3.5.2. | Sensor de Presión HK3025 5.0MPa . . . . .                                                                        | 54 |
| 3.6.   | Modelo matemático para la detección de fugas . . . . .                                                           | 56 |
| 3.6.1. | Análisis del Coeficiente de Distribución ( $\alpha$ ) . . . . .                                                  | 56 |
| 3.6.2. | Fundamento teórico del coeficiente de distribución ( $\alpha$ ) . . . . .                                        | 58 |
| 3.6.3. | Interpretación física del coeficiente de distribución . . . . .                                                  | 60 |
| 3.6.4. | Presión como variable de referencia. . . . .                                                                     | 61 |
| 3.6.5. | Análisis del balance de caudales para la detección de fugas . . . . .                                            | 61 |
| 3.6.6. | Condiciones de fuga: formulación matemática . . . . .                                                            | 62 |
| 3.7.   | Algoritmo de Detección de Fugas . . . . .                                                                        | 63 |

|         |                                                                                                                    |     |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.8.    | Procesamiento digital de señales . . . . .                                                                         | 65  |
| 3.8.1.  | Filtrado digital y tratamiento de señales . . . . .                                                                | 65  |
| 3.8.2.  | Sincronización y acumulación de muestras . . . . .                                                                 | 66  |
| 3.8.3.  | Mecanismo de detección y tratamiento de eventos transitorios . . . . .                                             | 67  |
| 3.8.4.  | Implementación del temporizador mediante la librería Ticker en el ESP32 . . . . .                                  | 69  |
| 3.8.5.  | Lectura del sensor de presión mediante ADC . . . . .                                                               | 70  |
| 3.9.    | Determinación de umbrales de detección . . . . .                                                                   | 71  |
| 3.9.1.  | Recomendación para el Umbral . . . . .                                                                             | 71  |
| 3.9.2.  | Determinación del Umbral de Detección en Reposo . . . . .                                                          | 72  |
| 3.9.3.  | Determinación del umbral de activación durante consumo normal . . . . .                                            | 73  |
| 3.9.4.  | Caracterización del sensor en condición de reposo . . . . .                                                        | 75  |
| 3.9.5.  | Modelo de detección de fugas . . . . .                                                                             | 75  |
| 3.10.   | Implementación del Sensor YF-S201 . . . . .                                                                        | 76  |
| 3.10.1. | Conexión física y eléctrica . . . . .                                                                              | 76  |
| 3.10.2. | Lectura de datos . . . . .                                                                                         | 77  |
| 3.10.3. | Análisis de la señal de salida del sensor de flujo YF-S201 . . . . .                                               | 78  |
| 3.10.4. | Conversión de pulsos a caudal volumétrico . . . . .                                                                | 80  |
| 3.10.5. | Determinación experimental del factor de corrección de los sensores de<br>flujo YF-S201 . . . . .                  | 82  |
| 3.10.6. | Factor de corrección del sensor de flujo del ramal del tanque . . . . .                                            | 84  |
| 3.10.7. | Factor de corrección del sensor de flujo del ramal de lavandería . . . . .                                         | 89  |
| 3.10.8. | Verificación experimental del sensor de presión HK3025 . . . . .                                                   | 94  |
| 3.10.9. | Instalación hidráulica y ubicación del sensor de presión . . . . .                                                 | 96  |
| 3.11.   | Implementación del prototipo: montaje del sistema en una placa protoboard y<br>posteriormente en una PCB . . . . . | 97  |
| 3.11.1. | Montaje inicial en protoboard . . . . .                                                                            | 97  |
| 3.11.2. | Diseño y fabricación del PCB . . . . .                                                                             | 99  |
| 3.11.3. | Montaje en PCB . . . . .                                                                                           | 100 |
| 3.11.4. | Módulo electrónico ensamblado . . . . .                                                                            | 102 |

|                                                                                                                          |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.12. Componentes complementarios del sistema . . . . .                                                                  | 104        |
| 3.12.1. Módulo bidireccional de nivel lógico . . . . .                                                                   | 104        |
| 3.12.2. Módulo relé SRD-05VDC-SL-C . . . . .                                                                             | 105        |
| 3.12.3. Mecanismo de activación y control de la válvula principal . . . . .                                              | 106        |
| 3.12.4. Módulo de alarma sonora . . . . .                                                                                | 107        |
| 3.12.5. Diagrama de bloques del sistema de alarma . . . . .                                                              | 108        |
| 3.12.6. Ensamblaje y pruebas . . . . .                                                                                   | 110        |
| 3.13. Módulo de Comunicación WiFi . . . . .                                                                              | 113        |
| 3.13.1. Protocolo de comunicación entre el ESP32 y el servidor . . . . .                                                 | 114        |
| 3.13.2. Secuencia de procesamiento del sistema . . . . .                                                                 | 115        |
| 3.14. Diagramas de flujo de los algoritmos implementados . . . . .                                                       | 115        |
| 3.14.1. Diagrama de flujo del algoritmo del ESP32 principal . . . . .                                                    | 116        |
| 3.14.2. Diagrama de flujo del algoritmo implementado en el ramal del tanque .                                            | 117        |
| 3.14.3. Diagrama de flujo del algoritmo implementado en el ramal de lavandería                                           | 117        |
| 3.14.4. Diagrama de flujo del servidor WiFi cliente . . . . .                                                            | 119        |
| 3.15. Interfaz de Visualización Local con Flet (Python) . . . . .                                                        | 120        |
| <b>4. PRUEBAS Y RESULTADOS</b>                                                                                           | <b>122</b> |
| 4.1. Fundamento de detección en condición de reposo . . . . .                                                            | 122        |
| 4.1.1. Fundamento de la detección en condición de reposo . . . . .                                                       | 122        |
| 4.1.2. Interpretación matemática del caso con todos los puntos cerrados y<br>presencia de fuga . . . . .                 | 122        |
| 4.1.3. Resumen de los casos experimentales . . . . .                                                                     | 124        |
| 4.2. Caso 1:Evaluación del sistema en condición de reposo de la red hidráulica . . .                                     | 125        |
| 4.2.1. Condición sin fuga con la tubería principal abierta y los ramales de<br>lavandería y tanque sin consumo . . . . . | 125        |
| 4.2.2. Validación experimental del sistema en ausencia de fuga . . . . .                                                 | 126        |
| 4.2.3. Evidencia experimental del Caso 1A . . . . .                                                                      | 127        |
| 4.2.4. Análisis e interpretación en ausencia de fuga . . . . .                                                           | 127        |
| 4.2.5. Análisis de la presión durante la condición sin fuga . . . . .                                                    | 129        |

|         |                                                                                                                |     |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2.6.  | Condición con fuga con la tubería principal abierta y los ramales de lavandería y tanque sin consumo . . . . . | 130 |
| 4.2.7.  | Validación experimental del sistema con fuga . . . . .                                                         | 131 |
| 4.2.8.  | Evidencia experimental del Caso 1B . . . . .                                                                   | 132 |
| 4.2.9.  | Análisis e interpretación en ausencia de consumo con presencia de fuga . . . . .                               | 132 |
| 4.2.10. | Análisis de la presión durante la condición sin fuga . . . . .                                                 | 134 |
| 4.3.    | Fundamento de detección en condición de consumo . . . . .                                                      | 135 |
| 4.3.1.  | Teoría de detección de fugas en condición de consumo . . . . .                                                 | 135 |
| 4.3.2.  | Interpretación matemática del caso con consumo . . . . .                                                       | 135 |
| 4.4.    | Caso 2: Tubería principal y ramal de lavandería . . . . .                                                      | 136 |
| 4.4.1.  | Tubería principal y ramal hacia la lavandería con griferías abiertas sin fuga . . . . .                        | 136 |
| 4.4.2.  | Validación experimental del sistema en ausencia de fuga . . . . .                                              | 137 |
| 4.4.3.  | Evidencia experimental del Caso 2A . . . . .                                                                   | 138 |
| 4.4.4.  | Análisis e interpretación en ausencia de fuga . . . . .                                                        | 139 |
| 4.4.5.  | Análisis de la presión durante la condición sin fuga . . . . .                                                 | 140 |
| 4.4.6.  | Tubería principal y ramal hacia la lavandería con griferías abiertas con fuga . . . . .                        | 141 |
| 4.4.7.  | Validación experimental del sistema con fuga . . . . .                                                         | 142 |
| 4.4.8.  | Caso 2B: Tubería principal y lavandería en consumo con fuga . . . . .                                          | 143 |
| 4.4.9.  | Análisis e interpretación con presencia de fuga . . . . .                                                      | 144 |
| 4.4.10. | Análisis de la presión durante la condición con fuga . . . . .                                                 | 145 |
| 4.4.11. | Análisis e interpretación en presencia de fuga . . . . .                                                       | 146 |
| 4.5.    | Caso 3: Tubería principal y ramal de tanque . . . . .                                                          | 147 |
| 4.5.1.  | Tubería principal y ramal hacia el tanque con griferías abiertas sin fuga . . . . .                            | 147 |
| 4.5.2.  | Validación experimental del sistema sin fuga . . . . .                                                         | 148 |
| 4.5.3.  | Evidencia experimental del Caso 3A . . . . .                                                                   | 149 |
| 4.5.4.  | Análisis e interpretación en ausencia de fuga . . . . .                                                        | 150 |
| 4.5.5.  | Análisis de la presión durante la condición con fuga . . . . .                                                 | 151 |

|         |                                                                                                        |     |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.5.6.  | Análisis e interpretación en ausencia de fuga . . . . .                                                | 152 |
| 4.5.7.  | Tubería principal y ramal hacia el tanque con griferías abiertas con fuga                              | 153 |
| 4.5.8.  | Validación experimental del sistema con fuga . . . . .                                                 | 154 |
| 4.5.9.  | Evidencia experimental del Caso 3B . . . . .                                                           | 155 |
| 4.5.10. | Análisis e interpretación con presencia de fuga . . . . .                                              | 155 |
| 4.5.11. | Análisis de la presión durante la condición con fuga . . . . .                                         | 157 |
| 4.5.12. | Análisis e interpretación en presencia de fuga . . . . .                                               | 158 |
| 4.6.    | Caso 4: Tubería principal , ramal de tanque y ramal de lavandería . . . . .                            | 159 |
| 4.6.1.  | Tubería principal , ramal de tanque y ramal de lavandería con griferías<br>abiertas sin fuga . . . . . | 159 |
| 4.6.2.  | Validación experimental del sistema sin fuga . . . . .                                                 | 160 |
| 4.6.3.  | Evidencia experimental del Caso 4A . . . . .                                                           | 161 |
| 4.6.4.  | Análisis e interpretación en ausencia de fuga . . . . .                                                | 162 |
| 4.6.5.  | Análisis de la presión durante la condición con fuga . . . . .                                         | 163 |
| 4.6.6.  | Análisis e interpretación en ausencia de fuga . . . . .                                                | 164 |
| 4.6.7.  | Tubería principal , ramal de tanque y ramal de lavandería con griferías<br>abiertas con fuga . . . . . | 165 |
| 4.6.8.  | Validación experimental del sistema con fuga . . . . .                                                 | 166 |
| 4.6.9.  | Evidencia experimental del Caso 4B . . . . .                                                           | 167 |
| 4.6.10. | Análisis e interpretación con presencia de fuga . . . . .                                              | 168 |
| 4.6.11. | Análisis de la presión durante la condición con fuga . . . . .                                         | 170 |
| 4.6.12. | Análisis e interpretación en presencia de fuga . . . . .                                               | 171 |
| 4.7.    | Resumen comparativo de los casos evaluados . . . . .                                                   | 172 |
| 4.8.    | Análisis del tiempo de detección de fugas . . . . .                                                    | 172 |
| 4.8.1.  | Resultados del tiempo de detección de fugas con todos los ramales<br>cerrados . . . . .                | 172 |
| 4.8.2.  | Análisis y discusión del tiempo de detección . . . . .                                                 | 174 |
| 4.8.3.  | Interpretación de resultados . . . . .                                                                 | 175 |
| 4.8.4.  | Resultados del Tiempo de Detección de Fugas con Consumo Activo . .                                     | 176 |

|                                                                                                   |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.8.5. Análisis y discusión del tiempo de detección . . . . .                                     | 178        |
| 4.8.6. Interpretación de resultados . . . . .                                                     | 179        |
| 4.9. Interpretación global de resultados . . . . .                                                | 180        |
| 4.9.1. Validación funcional del sistema . . . . .                                                 | 180        |
| <b>CONCLUSIONES</b>                                                                               | <b>182</b> |
| <b>RECOMENDACIONES</b>                                                                            | <b>184</b> |
| <b>REFERENCIAS</b>                                                                                | <b>185</b> |
| <b>ANEXOS</b>                                                                                     | <b>187</b> |
| Anexo 1: Código del nodo principal de adquisición de datos basado en ESP32 . . . . .              | 187        |
| Anexo 2. Código del nodo de adquisición de datos en el ramal de lavandería . . . . .              | 192        |
| Anexo 3. Código del nodo de adquisición de datos en el ramal del tanque . . . . .                 | 196        |
| Anexo 4. Código del módulo de comunicación basado en ESP8266 . . . . .                            | 200        |
| Anexo 5. Código del servidor y procesamiento de datos del sistema de detección de fugas . . . . . | 202        |
| Anexo 6. Código de generación de gráficas del sistema . . . . .                                   | 217        |
| Anexo 7. Código de la interfaz gráfica del sistema . . . . .                                      | 221        |
| Anexo 8. Código principal de ejecución del sistema . . . . .                                      | 229        |
| Anexo 9. Ficha Técnica del Sensor YF-S201 . . . . .                                               | 230        |
| Anexo 10. Diagrama P&ID del Sistema Electrónico de Detección de Fugas de Agua .                   | 231        |

## Índice de figuras

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Diagrama funcional del microcontrolador ESP32. . . . .                                                         | 20 |
| Figura 2: Diagrama de pines del microcontrolador ESP32. . . . .                                                          | 23 |
| Figura 3: Placa de desarrollo ESP8266 D1 Mini basada en el chip ESP8266EX. . . .                                         | 25 |
| Figura 4: Sirena luminosa con buzzer empleada en el sistema de alarma. . . . .                                           | 28 |
| Figura 5: Arquitectura general del sistema electrónico de detección de fugas de agua<br>en una red domiciliaria. . . . . | 36 |
| Figura 6: Diagrama de bloques del sistema electrónico de detección de fugas de agua.                                     | 45 |
| Figura 7: Diagrama de interconexión de los módulos electrónicos del sistema de<br>detección de fugas de agua. . . . .    | 46 |
| Figura 8: Circuito electrónico implementado para el sistema de detección de fugas<br>de agua. . . . .                    | 47 |
| Figura 9: Imagen del microcontrolador ESP32, tomada de Espressif Systems (2023). .                                       | 51 |
| Figura 10: Curva de transferencia del sensor de presión HK3025 . . . . .                                                 | 55 |
| Figura 11: Comportamiento del coeficiente de distribución $\alpha$ (valores filtrados) . . .                             | 57 |
| Figura 12: Señal de caudal antes y después del filtro de mediana . . . . .                                               | 66 |
| Figura 13: Comportamiento de los caudales en condición de reposo . . . . .                                               | 72 |
| Figura 14: Registro de pulsos digitales del sensor YF-S201 . . . . .                                                     | 80 |
| Figura 15: Comparación entre el sensor principal y el sensor de tanque antes de la<br>calibración . . . . .              | 87 |
| Figura 16: Curva de calibración del sensor de tanque . . . . .                                                           | 88 |
| Figura 17: Comparación del sensor de tanque antes y después de aplicar el factor de<br>corrección . . . . .              | 89 |
| Figura 18: Comparación entre el sensor principal y el sensor de lavandería antes de<br>la calibración . . . . .          | 92 |
| Figura 19: Comparación después de la calibración del sensor de lavandería . . . . .                                      | 93 |
| Figura 20: Comparación del sensor de lavandería antes y después de aplicar el factor<br>de corrección . . . . .          | 93 |

|                                                                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 21: Verificación experimental de la señal de salida del sensor de presión HK3025                                         | 95  |
| Figura 22: Instalación del sensor de presión HK3025 en un ramal derivado . . . . .                                              | 97  |
| Figura 23: Prototipo inicial con sensor de flujo YF-S201 . . . . .                                                              | 98  |
| Figura 24: Vista 3D de la PCB del sistema de detección de fugas . . . . .                                                       | 100 |
| Figura 25: Placa PCB ensamblada del sistema de detección de fugas . . . . .                                                     | 101 |
| Figura 26: Módulo electrónico ensamblado del sistema de detección de fugas de agua.                                             | 102 |
| Figura 27: Módulo principal de procesamiento basado en el ESP32. . . . .                                                        | 103 |
| Figura 28: Módulos de adquisición de datos instalados en los ramales de lavandería<br>y tanque. . . . .                         | 103 |
| Figura 29: Implementación experimental del sistema de detección de fugas de agua<br>en la red hidráulica domiciliaria. . . . .  | 104 |
| Figura 30: Diagrama esquemático del módulo de alarma sonora . . . . .                                                           | 108 |
| Figura 31: Diagrama de bloques del sistema de alarma implementado para la<br>notificación de fugas de agua . . . . .            | 110 |
| Figura 32: Verificación experimental del voltaje de entrada de la fuente de alimentación                                        | 111 |
| Figura 33: Verificación experimental de la tensión suministrada por la fuente de<br>alimentación . . . . .                      | 112 |
| Figura 34: Verificación experimental de la tensión de alimentación del<br>microcontrolador ESP32 . . . . .                      | 112 |
| Figura 35: Verificación experimental del voltaje aplicado a la electroválvula . . . . .                                         | 113 |
| Figura 36: Diagrama de flujo del algoritmo implementado en la tarjeta principal<br>basada en el microcontrolador ESP32. . . . . | 116 |
| Figura 37: Diagrama de flujo del algoritmo implementado en el ramal del tanque . .                                              | 117 |
| Figura 38: Diagrama de flujo del algoritmo implementado en el ramal de lavandería .                                             | 118 |
| Figura 39: Diagrama de flujo del servidor WiFi cliente. . . . .                                                                 | 119 |
| Figura 40: Interfaz gráfica del sistema de detección de fugas de agua . . . . .                                                 | 120 |
| Figura 41: Interfaz gráfica del sistema de detección de fugas de agua durante la<br>condición sin fuga. . . . .                 | 125 |

|                                                                                                                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 42: Condición experimental correspondiente al Caso 1A sin presencia de fuga en la red hidráulica. . . . .                                                                               | 127 |
| Figura 43: Comportamiento de la presión registrada durante la condición sin presencia de fuga. . . . .                                                                                         | 129 |
| Figura 44: Interfaz gráfica del sistema durante la condición de operación con la tubería principal activa, los ramales de lavandería y tanque en reposo, con presencia de fuga. . . . .        | 130 |
| Figura 45: Condición experimental del Caso 1B con presencia de fuga en la red hidráulica. . . . .                                                                                              | 132 |
| Figura 46: Comportamiento de la presión del sistema durante la condición de fuga con los ramales de lavandería y tanque en reposo. . . . .                                                     | 134 |
| Figura 47: Interfaz gráfica del sistema de detección de fugas de agua durante la validación experimental sin presencia de fuga. . . . .                                                        | 136 |
| Figura 48: Condición experimental correspondiente al Caso 2A, con consumo en el ramal de lavandería y ausencia de fuga en la red hidráulica. . . . .                                           | 138 |
| Figura 49: Comportamiento de la presión registrada durante la condición sin presencia de fuga. . . . .                                                                                         | 140 |
| Figura 50: Interfaz gráfica del sistema durante la condición de operación con presencia de fuga. . . . .                                                                                       | 141 |
| Figura 51: Condición experimental del Caso 2B con consumo en lavandería y presencia de fuga. . . . .                                                                                           | 143 |
| Figura 52: Comportamiento de la presión registrada durante la condición con presencia de fuga. . . . .                                                                                         | 145 |
| Figura 53: Interfaz gráfica del sistema durante la condición de operación con la tubería principal y el ramal del tanque en funcionamiento, con griferías abiertas y ausencia de fuga. . . . . | 147 |
| Figura 54: Condición experimental correspondiente al Caso 3A, con consumo en el ramal del tanque y ausencia de fuga en la red hidráulica. . . . .                                              | 149 |
| Figura 55: Comportamiento de la presión del sistema en ausencia de fuga . . . . .                                                                                                              | 151 |

|                                                                                                                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 56: Flujo en línea principal y tanque con fuga . . . . .                                                                                                                                                         | 153 |
| Figura 57: Condición experimental del Caso 3B: consumo en el ramal del tanque con presencia de fuga. . . . .                                                                                                            | 155 |
| Figura 58: Comportamiento de la presión del sistema con flujo en la tubería principal y consumo en el ramal del tanque, manteniendo el ramal de lavandería en reposo y con presencia de fuga. . . . .                   | 157 |
| Figura 59: Interfaz gráfica del sistema durante la condición de operación con la tubería principal, el ramal del tanque y el ramal de lavandería en funcionamiento, con griferías abiertas y ausencia de fuga. . . . .  | 159 |
| Figura 60: Condición experimental del Caso 4A: consumo simultáneo en los ramales de lavandería y tanque sin presencia de fuga. . . . .                                                                                  | 161 |
| Figura 61: Comportamiento de la presión del sistema con la tubería principal, ramal de lavandería y ramal del tanque en operación, sin presencia de fuga . . . . .                                                      | 163 |
| Figura 62: Interfaz gráfica del sistema durante la condición de operación con la tubería principal, el ramal de lavandería y el ramal del tanque en funcionamiento, con griferías abiertas y presencia de fuga. . . . . | 165 |
| Figura 63: Condición experimental del Caso 4B: consumo simultáneo en los ramales de lavandería y tanque con presencia de fuga. . . . .                                                                                  | 167 |
| Figura 64: Comportamiento de la presión del sistema con la tubería principal, el ramal de lavandería y el ramal del tanque en operación, con presencia de fuga .                                                        | 170 |
| Figura 65: Tiempo de detección de fugas con ramales cerrados . . . . .                                                                                                                                                  | 176 |
| Figura 66: Tiempo de detección de fugas en pruebas experimentales . . . . .                                                                                                                                             | 180 |

## Índice de tablas

|                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 1: Cuadro de variables e indicadores de la investigación. . . . .                                         | 13  |
| Tabla 2: Comparación de protocolos de comunicación utilizados en sistemas IoT y<br>monitoreo . . . . .          | 32  |
| Tabla 3: Comparación entre microcontroladores con conectividad Wi-Fi . . . . .                                  | 50  |
| Tabla 4: Comparación de sensores de flujo . . . . .                                                             | 52  |
| Tabla 5: Valores del coeficiente de distribución $\alpha$ en condición normal . . . . .                         | 57  |
| Tabla 6: Variación del coeficiente $\alpha$ y del caudal de fuga . . . . .                                      | 59  |
| Tabla 7: Valores de caudal en los que se activó la detección en pruebas en condición<br>de reposo . . . . .     | 72  |
| Tabla 8: Factores de corrección obtenidos para los sensores de flujo YF-S201 . . . . .                          | 83  |
| Tabla 9: Datos experimentales utilizados para la calibración del sensor de flujo del<br>tanque . . . . .        | 85  |
| Tabla 10: Resultados de calibración del sensor de flujo de lavandería respecto al<br>sensor principal . . . . . | 90  |
| Tabla 11: Resultados de la verificación experimental del sensor de presión HK3025 . . . . .                     | 95  |
| Tabla 12: Verificación de niveles de voltaje en el sistema . . . . .                                            | 111 |
| Tabla 13: Resumen de los casos experimentales considerados para la validación del<br>sistema. . . . .           | 124 |
| Tabla 14: Análisis por tramos del sistema en condición de reposo hidráulico y<br>ausencia de fuga . . . . .     | 126 |
| Tabla 15: Análisis por tramos del caso con todos los puntos cerrados y presencia de<br>fuga . . . . .           | 131 |
| Tabla 16: Análisis por ensayos del comportamiento del sistema en ausencia de fuga . . . . .                     | 137 |
| Tabla 17: Análisis por ensayos del comportamiento del sistema ante condiciones de<br>fuga . . . . .             | 142 |
| Tabla 18: Análisis por ensayos sin fuga en la tubería principal y el ramal del tanque . . . . .                 | 148 |
| Tabla 19: Análisis por ensayos con fuga en la tubería principal y el ramal del tanque . . . . .                 | 154 |

|                                                                                                                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 20: Análisis por ensayos sin fuga en la tubería principal, ramal de lavandería y<br>ramal del tanque . . . . .                                                      | 160 |
| Tabla 21: Análisis por ensayos del comportamiento del sistema con flujo en la tubería<br>principal, ramal de lavandería y ramal del tanque con presencia de fuga. . . . . | 166 |
| Tabla 22: Resumen comparativo de los casos experimentales . . . . .                                                                                                       | 172 |
| Tabla 23: Tiempo de detección con ramales cerrados . . . . .                                                                                                              | 173 |
| Tabla 24: Resultados de tiempo de detección de fugas . . . . .                                                                                                            | 177 |
| Tabla 25: Resumen de detección de fugas y consumos . . . . .                                                                                                              | 181 |

# RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo implementar un prototipo de sistema electrónico para la detección de fugas de agua en redes de distribución domiciliaria, mediante el monitoreo continuo de variables hidráulicas, con la finalidad de reducir pérdidas de agua y contribuir a una gestión eficiente del recurso hídrico. El estudio fue de tipo aplicado, con enfoque cuantitativo y diseño preexperimental.

El sistema integra un microcontrolador ESP32, tres sensores de flujo YF-S201, un sensor de presión HK3025, un módulo ESP8266 y un servidor de monitoreo desarrollado en Python con una interfaz gráfica en Flet. La detección de fugas se basa en el análisis del balance de caudales entre la tubería principal y los ramales de lavandería y tanque, complementado con el monitoreo de presión y el procesamiento digital mediante filtrado, sincronización y validación de datos. Ante una condición anómala, el sistema genera una alerta sonora y permite accionar el corte del flujo de agua.

La validación experimental se realizó en una instalación domiciliaria bajo diferentes escenarios de operación, considerando condiciones con y sin fuga, durante el reposo y consumo de agua. Los resultados evidenciaron que el prototipo permitió detectar fugas mediante el análisis del coeficiente de distribución y el balance de caudales, demostrando su viabilidad para el monitoreo continuo de redes domiciliarias. Se concluye que el sistema constituye una alternativa tecnológica para la detección temprana de fugas y reducción del desperdicio de agua.

**Palabras clave:** Detección de fugas, Redes domiciliarias, ESP32, Sensores de flujo, Monitoreo.

# ABSTRACT

This research aimed to implement a prototype electronic system for detecting water leaks in household distribution networks through continuous monitoring of hydraulic variables, with the purpose of reducing water losses and contributing to efficient water resource management. The study was applied, with a quantitative approach and a pre-experimental design.

The system integrates an ESP32 microcontroller, three YF-S201 flow sensors, an HK3025 pressure sensor, an ESP8266 module, and a monitoring server developed in Python with a graphical interface in Flet. Leak detection is based on flow balance analysis between the main pipe and the laundry and tank branches, complemented by pressure monitoring and digital processing through filtering, synchronization, and data validation. When an abnormal condition is detected, the system generates an audible alert and allows the water flow to be shut off.

Experimental validation was conducted in a household installation under different operating scenarios, with and without leaks, during periods of no consumption and water use. The results showed that the prototype detected leaks through distribution coefficient and flow balance analysis, demonstrating its feasibility for continuous monitoring. It is concluded that the system provides a technological alternative for early leak detection and water waste reduction.

**Keywords:** Leak detection, Domestic networks, ESP32, Flow sensors, Monitoring.

# Capítulo 1

## 1 GENERALIDADES

### 1.1 Problema de Investigación

La distribución de agua potable a nivel domiciliario enfrenta una serie de desafíos que comprometen tanto la eficiencia del servicio como la sostenibilidad del recurso hídrico. Las estimaciones del porcentaje de pérdidas en los sistemas de abastecimiento de agua públicos pueden llegar hasta el 50% a nivel mundial Naciones Unidas (2021). Uno de los problemas más críticos dentro de esta cadena es la aparición de fugas de agua en la red de distribución, especialmente en aquellos puntos que no son fácilmente accesibles o visibles. Este tipo de fugas, comúnmente subterráneas o situadas en lugares difíciles de inspeccionar, representan una pérdida significativa de agua y recursos, afectando tanto a las empresas encargadas del servicio como a los consumidores.

En las redes de distribución de agua domiciliaria, las tuberías suelen estar enterradas bajo el suelo, en paredes o en espacios confinados, lo que dificulta su inspección visual regular. Las fugas en estos puntos no accesibles a menudo pasan desapercibidas durante largos periodos de tiempo, ya que no generan señales inmediatas visibles, como charcos, humedad en la superficie o baja presión en el suministro. Estas fugas silenciosas pueden estar presentes durante semanas o incluso meses antes de ser detectadas, lo que incrementa las pérdidas de agua tratada y eleva los costos de operación para las entidades responsables.

En CNA (2007) se señala que entre los principales factores que contribuyen a la aparición de fugas en puntos no visibles se encuentran:

- Exposición a la luz solar: La radiación UV degrada el material del PVC, haciéndolo más frágil y propenso a fisuras, especialmente si las tuberías están instaladas al aire libre sin protección adecuada.
- Temperaturas extremas: A temperaturas altas, el PVC puede deformarse y perder su rigidez, lo que facilita la aparición de grietas o fugas.
- Sobrecarga de presión: Se produce cuando la presión interna del agua supera la

resistencia de la tubería debido a sobrepresiones, golpes de ariete o variaciones bruscas de presión, lo que puede generar fisuras, deformaciones o roturas.

- Daños mecánicos: Golpes, perforaciones accidentales durante trabajos de construcción o mantenimiento, o movimientos del terreno pueden provocar fisuras o roturas en las tuberías de PVC.

El impacto de estas fugas ocultas es considerable. La pérdida de agua potable tratada no solo incrementa el desperdicio de un recurso cada vez más escaso, sino que también afecta directamente la facturación del servicio a los consumidores finales, lo que conlleva pérdidas económicas para las empresas distribuidoras. Además, la fuga prolongada puede causar problemas adicionales, como daños estructurales en el terreno o en las edificaciones, debido a la acumulación de agua en zonas no visibles.

El enfoque convencional para identificar fugas en redes domiciliarias se basa en inspecciones visuales o en los reportes de los usuarios al notar señales claras de fuga. No obstante, este método reactivo resulta ineficaz cuando las fugas ocurren en lugares de difícil acceso, donde no hay señales inmediatas. Las autoridades encargadas del mantenimiento de la red suelen identificar el problema solo cuando las fugas han causado daños significativos o cuando un incremento inusual en la facturación indica una pérdida de agua.

En la siguiente información estadística adaptada de SUNASS (2024), se reportó que la distribución del porcentaje de Agua No Facturada (ANF), en la cual la EPS Sedacusco reporta un 35.6 % de ANF. Este porcentaje revela que más de un tercio del agua suministrada no se está facturando, lo que podría ser consecuencia de fugas.

Ante esta problemática, surge la necesidad de desarrollar sistemas de detección proactivos y automatizados capaces de identificar fugas en puntos no visibles o de difícil acceso antes de que ocasionen pérdidas significativas de agua o daños en la infraestructura. La implementación de un prototipo basado en sensores de flujo y presión permite realizar un monitoreo continuo de la red de distribución domiciliaria, generando alertas en tiempo real cuando se detectan variaciones anómalas en las variables hidráulicas monitoreadas. Este enfoque no solo mejora la eficiencia en la identificación temprana y localización de posibles fugas, sino que también contribuye a la conservación del recurso hídrico, reduciendo el desperdicio de agua y

favoreciendo una gestión más eficiente y confiable del sistema de distribución domiciliaria.

En conclusión, las fugas en áreas no visibles de la red de distribución de agua domiciliaria constituyen un reto considerable para una gestión adecuada del recurso hídrico. La adopción de tecnologías avanzadas se vuelve crucial para reducir los efectos económicos y medioambientales de este problema.

## **1.2 Formulación del problema**

### **1.2.1 Problema general**

¿Cómo desarrollar e implementar un sistema electrónico capaz de detectar fugas de agua en redes de distribución domiciliaria?

### **1.2.2 Problemas específicos**

1. ¿Cómo se puede desarrollar un prototipo de sistema electrónico capaz de detectar fugas de agua en redes de distribución domiciliaria en tiempo real, utilizando una lógica de control automático que permita la activación de mecanismos de respuesta como el corte de flujo o alertas para minimizar el desperdicio de agua y daños a la infraestructura?
2. ¿Cómo se puede diseñar y desarrollar la circuitería electrónica que permita integrar sensores de alta precisión para detectar fugas de agua en redes domiciliarias, optimizando su rendimiento en condiciones reales de operación?
3. ¿Qué elementos son necesarios para diseñar e implementar una interfaz gráfica eficiente que permita la visualización en tiempo real de fugas de agua en un sistema de detección para redes domiciliarias?
4. ¿Cuáles son los criterios clave para evaluar y validar la efectividad de un prototipo de sistema electrónico de detección de fugas de agua en redes domiciliarias, considerando su precisión y desempeño en condiciones operativas reales?

### **1.3 Justificación**

El agua es un recurso vital, y su gestión eficiente es crucial para garantizar el acceso a este bien esencial. Las fugas en las redes de distribución domiciliaria representan un problema significativo, causando no solo el desperdicio de grandes cantidades de agua, sino también elevando los costos operativos para las empresas de servicios públicos y afectando la calidad de vida de los usuarios. Por estas razones, el desarrollo de un sistema electrónico de detección de fugas de agua se vuelve indispensable.

#### **1.3.1 Justificación ambiental**

Eficiencia en la gestión del agua: La detección temprana de fugas permite una respuesta rápida, minimizando el desperdicio de agua y optimizando su uso. Esto contribuye a una gestión más sostenible de los recursos hídricos.

#### **1.3.2 Justificación económica**

La implementación de un sistema de detección de fugas puede reducir significativamente los costos asociados a la reparación de daños causados por fugas prolongadas y a la pérdida de ingresos por agua no facturada.

#### **1.3.3 Justificación social**

Al disminuir la frecuencia y la gravedad de las fugas, se mejora la infraestructura de distribución de agua urbana y se reduce el riesgo de problemas de salud asociados a la contaminación del agua.

#### **1.3.4 Justificación tecnológica**

El desarrollo de un sistema electrónico de detección de fugas permite una solución proactiva y automatizada para la conservación de agua, ayudando a reducir las pérdidas y, por ende, contribuyendo a una gestión más sostenible del recurso. La tecnología puede proporcionar una detección temprana que evite la acumulación de fugas y reduzca el desperdicio de agua.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo general**

Implementar un prototipo de sistema electrónico para detectar las fugas de agua y emitir una alerta en tuberías de distribución de agua potable domiciliaria.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

1. Desarrollar un prototipo del sistema electrónico capaz de detectar fugas de agua en redes de distribución domiciliaria en tiempo real, utilizando una lógica de control automático que permita la activación de mecanismos de respuesta de corte de flujo o alerta.
2. Diseñar y desarrollar la circuitería para la integración de sensores asegurando la precisión en la detección de fugas en redes domiciliarias.
3. Diseñar e implementar una interfaz gráfica para el sistema electrónico de detección de fugas de agua en redes domiciliaria.
4. Evaluar y validar el prototipo del sistema electrónico para la detección de fugas de agua en redes de distribución domiciliaria.

## **1.5 Alcances y limitaciones**

### **1.5.1 Alcances**

La tesis abarca el diseño, desarrollo e implementación de un sistema electrónico para la detección de fugas en redes de distribución domiciliaria de agua. Incluye la selección de sensores, diseño de hardware, programación de algoritmos para la identificación de fugas, y un sistema de alerta para notificar al usuario. El sistema será probado en entornos controlados y evaluado en términos de precisión, eficiencia energética y viabilidad para su escalabilidad. No se abordará la implementación en redes a gran escala ni el desarrollo de infraestructura hidráulica adicional.

### **1.5.2 Limitaciones**

El sistema se implementará y evaluará únicamente en redes domiciliarias específicas, sin considerar su aplicación a gran escala en redes industriales. Las pruebas se realizarán en condiciones controladas, lo que puede no representar todas las situaciones reales. No se incluye el análisis exhaustivo del impacto social ni el desarrollo de infraestructura hidráulica adicional.

## **1.6 Antecedentes**

### **1.6.1 Antecedente internacionales**

Según Gárate Morales (2021) en su tesis denominada Detección y localización de fugas en parte de la red de distribución de aguas de Santiago utilizando una máquina de vector de apoyo (SVM), el objetivo general es la utilización de un algoritmo de aprendizaje supervisado, como la SVM (máquina de vector de apoyo), en la detección y localización de fugas para una red de distribución de gran tamaño. Para esto, se modela la red en el software OpenFlows WaterGEMS, de donde se obtienen los datos (presión y localización de la fuga) para el entrenamiento y la prueba de la SVM. Dentro de los resultados del trabajo se tienen un total de cinco SVM presentan un comportamiento deficiente al momento de detectar y localizar las fugas, ya que como resultado arrojan un comportamiento sin fuga para la mayoría de los escenarios de prueba y entrenamiento. Además, se tienen dos SVM que detectan y localizan de buena forma fugas dentro del modelo hidráulico, en las que es posible ajustar uno de sus parámetros para tratar de evitar el sobreajuste y obtener un correcto funcionamiento en la detección y localización de fugas. Como conclusión se definió que la detección y localización de fugas en redes de agua potable es necesaria para una buena gestión del recurso hídrico, ya que el deterioro de la red y las roturas inesperadas son inexorables, por lo que las investigaciones que impliquen un avance en este tema permiten tener una idea de las metodologías existentes y los elementos necesarios para poder aplicar estas metodologías. Todo esto con el fin de poder reducir desastres generados por la rotura de las tuberías.

Castillo (2009) en su investigación denominada: Detección de fugas en tuberías usando redes neuronales artificiales, el objetivo es utilizar técnicas de inteligencia artificial para hacer

recomendaciones sobre métodos de detección de fugas en tuberías. La ventaja de este método es que, a diferencia de los métodos analíticos, no requiere el conocimiento del modelo matemático que describe la dinámica del transporte de fluidos en la tubería. Lo que lo hace adecuado para cualquier tipo de fluido o tubería es que requiere solo dos mediciones de flujo. El método propuesto utiliza redes neuronales para detectar la presencia y ubicación de una o más fugas en una tubería. La implicación de este documento es que se necesita un algoritmo que pueda trabajar con la incertidumbre del modelo y un pequeño número de variables a monitorear para detectar y aislar fugas. Al final del trabajo abierto, obtenido al final de los experimentos con los resultados presentados en el capítulo anterior, se puede concluir que el algoritmo es adecuado para detectar la ocurrencia de fugas, además de su ubicación y el uso de redes dinámicas, se mejora mucho la predicción de la ubicación de la tubería.

### **1.6.2 Antecedente nacional**

Quinto (2024), en la tesis titulada *Diseño e implementación de prototipo de un sistema automatizado para la detección de fugas y control de aniegos en sistemas domiciliarios*, desarrolló un sistema automatizado para la detección de fugas de agua en instalaciones domiciliarias mediante el uso de dispositivos electrónicos de monitoreo y control. Los resultados demostraron que la implementación de tecnologías de automatización permite identificar oportunamente eventos de fuga y reducir las pérdidas de agua en sistemas domésticos. Este antecedente guarda relación con la presente investigación debido a que ambos trabajos buscan mejorar la gestión del recurso hídrico mediante sistemas electrónicos de detección.

Sulca Quinto (2024), en la tesis titulada *Diseño e implementación de prototipo de un sistema automatizado para la detección de fugas y control de aniegos en sistemas domiciliarios*, desarrolló un prototipo orientado a la detección automática de fugas de agua y control de aniegos en instalaciones domiciliarias. La investigación tuvo como objetivo mejorar la gestión y el uso eficiente de los recursos hídricos mediante la implementación de un sistema electrónico de monitoreo y control.

Para el desarrollo del sistema se empleó una plataforma Arduino, un sensor de presión y un

sensor de caudal, los cuales permitieron registrar las variaciones hidráulicas producidas durante el funcionamiento normal del sistema y durante eventos simulados de fuga. La metodología consistió en realizar pruebas experimentales controladas modificando el caudal de agua y generando diferentes condiciones de operación para analizar el comportamiento de las variables hidráulicas.

A partir de los datos obtenidos se desarrolló un algoritmo capaz de identificar condiciones anormales asociadas a fugas y aniegos. Asimismo, el sistema incorporó un módulo de comunicación Bluetooth para el envío de alertas y mecanismos de alarma visual y sonora para informar al usuario sobre la ocurrencia de eventos de riesgo.

Los resultados demostraron una respuesta efectiva del prototipo ante las condiciones simuladas, validando la viabilidad técnica de utilizar sensores de presión y caudal para la detección temprana de fugas en sistemas domiciliarios. El autor concluye que la automatización y el monitoreo continuo constituyen herramientas eficientes para reducir pérdidas de agua y mejorar la gestión de redes hidráulicas domiciliarias.

En Alvarez, Irazábal, y Calienes (2024) se aborda el problema de la detección de fugas de agua en tuberías de suministro. Actualmente, este proceso se realiza escuchando los sonidos del flujo de agua a través de auriculares, lo que requiere entrenamiento especializado. El problema es identificar fugas no visibles mediante una técnica más eficiente y menos dependiente de la habilidad auditiva.

El autor implementa la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para procesar señales de audio capturadas de los ruidos generados por las fugas en diferentes secciones de las tuberías. Las señales captadas son grabadas con dispositivos como smartphones y luego procesadas en una computadora usando MATLAB. La FFT se utiliza para analizar el espectro de frecuencia de la señal de ruido, permitiendo detectar fugas de agua. Además, se simula el sistema utilizando Simulink de MATLAB.

Los resultados muestran que es posible identificar fugas de agua mediante la representación del espectro de frecuencias. Se estableció un umbral de 0.02 W/Hz en la banda de 1000 Hz a 5000 Hz para detectar fugas. Se demostró que los sonidos de las fugas varían con el caudal de agua en las tuberías, y se verificó la eficacia de la metodología propuesta mediante la

implementación de una interfaz gráfica que permite visualizar los resultados sin necesidad de entrenamiento auditivo especializado.

En Apesteguía Infantes y Huarcaya Gonzales (2018) la tesis titulada *Redes neuronales artificiales aplicadas a la detección de fugas no visibles en las redes de agua potable de la Ciudad de Lima* analiza el uso de redes neuronales para identificar y clasificar fugas en redes de agua potable que no son detectables mediante métodos convencionales. Esta investigación aborda el problema de pérdidas de agua en Lima, donde una proporción considerable del agua potable se pierde debido a fugas invisibles en la red de distribución.

La metodología emplea redes neuronales artificiales (RNA) integradas con software como MATLAB para procesar datos de flujo y presión en tiempo real. Este enfoque permite reconocer patrones en el comportamiento de la red y detectar anomalías que pueden indicar fugas. A través de simulaciones y pruebas en distintos escenarios, la tesis busca validar la precisión y confiabilidad del sistema propuesto para disminuir el desperdicio de agua en sistemas urbanos.

El objetivo principal es optimizar el proceso de detección de fugas, reducir el tiempo de respuesta y, en última instancia, minimizar las pérdidas de agua no facturada. Esta propuesta representa una innovación en la administración de redes de agua, ya que aplica inteligencia artificial para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los recursos hídricos.

### **1.6.3 Antecedente local**

Gutiérrez Baca (2016), en la tesis titulada *Análisis y determinación de agua no facturada (ANF) en el sistema de abastecimiento de agua potable en la sub zona Larapa en la E.P.S. Sedacusco S.A.*, tuvo como objetivo determinar el porcentaje de agua no facturada existente en la sub zona Larapa del distrito de San Jerónimo, Cusco. Para ello realizó la evaluación de caudales, presiones, pérdidas físicas y pérdidas comerciales presentes en la red de distribución. Los resultados evidenciaron un elevado porcentaje de agua no facturada asociado principalmente a fugas en la infraestructura hidráulica, conexiones clandestinas y deficiencias en la medición del consumo. El autor concluyó que la identificación oportuna de pérdidas de agua permite mejorar la eficiencia operativa de los sistemas de abastecimiento.

Carrión (2019), en la tesis titulada *Análisis del comportamiento hidráulico de la línea de*

*aducción y red primaria del sistema de distribución de agua potable en la zona XII de la ciudad del Cusco*, desarrollada en la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, tuvo como objetivo evaluar el comportamiento hidráulico de la red de distribución de agua potable mediante el análisis de caudales y presiones en diferentes puntos del sistema. La investigación permitió identificar sectores con deficiencias hidráulicas y posibles pérdidas de agua que afectan el desempeño de la red. Los resultados demostraron la importancia del monitoreo permanente de las variables hidráulicas para optimizar la operación y mantenimiento de los sistemas de abastecimiento.

## **1.7 Metodología**

### **1.7.1 Tipo y enfoque de la investigación**

La presente investigación corresponde a una investigación aplicada, debido a que está orientada a la solución de un problema específico relacionado con la detección de fugas de agua en redes de distribución domiciliaria. El propósito principal es desarrollar e implementar un sistema electrónico capaz de identificar fugas de agua en tiempo real mediante el monitoreo continuo de variables hidráulicas, contribuyendo a la reducción de pérdidas de agua y al uso eficiente de los recursos hídricos.

Asimismo, la investigación presenta un enfoque cuantitativo, ya que se fundamenta en la adquisición, medición, procesamiento y análisis de variables físicas medibles, tales como el caudal y la presión del agua. Estas variables son obtenidas mediante sensores electrónicos instalados en diferentes puntos de la red hidráulica y procesadas a través de un sistema de monitoreo basado en el microcontrolador ESP32. Los datos recopilados permiten evaluar objetivamente el comportamiento del sistema y determinar la presencia o ausencia de fugas mediante criterios previamente establecidos.

### **1.7.2 Diseño de la investigación**

El diseño adoptado en la presente investigación corresponde a un diseño preexperimental, caracterizado por la evaluación de un único grupo experimental constituido por el prototipo del sistema electrónico de detección de fugas de agua. Este diseño permite analizar el

comportamiento y desempeño del sistema bajo diferentes condiciones de operación, verificando su capacidad para identificar eventos de fuga mediante el análisis de variables hidráulicas en tiempo real.

La implementación y validación experimental del sistema se realizó en una instalación real de distribución domiciliaria de agua, la cual fue acondicionada para reproducir diferentes escenarios de funcionamiento. Durante las pruebas se evaluaron condiciones de operación sin fuga y condiciones con fuga, considerando diversas configuraciones de consumo en los ramales de lavandería y tanque de almacenamiento.

### **1.7.3 Población y muestra**

La población objetivo de esta investigación está constituida por las instalaciones domiciliarias de redes de distribución de agua potable, específicamente aquellas que podrían presentar fugas internas no visibles o difíciles de detectar mediante métodos tradicionales. Estas redes, presentes en viviendas unifamiliares, representan un entorno representativo donde el desperdicio de agua puede pasar inadvertido por periodos prolongados.

Para la presente investigación, se ha seleccionado como muestra una instalación real de red domiciliaria correspondiente a una vivienda particular, la cual ha sido habilitada con los componentes necesarios para la implementación del sistema de detección de fugas. Esta vivienda proporciona un entorno funcional que permite observar el comportamiento del sistema en condiciones reales de uso, incluyendo el consumo normal, variaciones de presión y posibles escenarios de fuga simulada.

El criterio de selección de esta muestra responde a la necesidad de validar el prototipo en un contexto auténtico, donde las condiciones hidráulicas reflejan el funcionamiento cotidiano de una instalación doméstica. Esto permite asegurar que las lecturas de caudal y presión obtenidas por los sensores sean coherentes con los valores reales, facilitando una evaluación precisa de la efectividad del sistema propuesto.

#### 1.7.4 Variables e indicadores

##### Variable independiente

- **Presencia de fugas de agua potable**

**Indicador:** Presencia o ausencia de eventos de fuga de agua en una vivienda.

**Definición operacional:** Existencia o ausencia de eventos de fuga de agua potable generados de manera controlada durante las pruebas experimentales realizadas sobre la red de distribución domiciliaria implementada para la validación del sistema.

##### Variables dependientes

- **Tiempo de detección de fugas**

**Indicador:** Tiempo promedio de retardo en la detección de fugas.

**Definición operacional:** Intervalo de tiempo transcurrido desde el instante en que ocurre una fuga de agua potable hasta que el sistema electrónico genera una alerta indicando la detección del evento.

- **Cantidad de detecciones acertadas**

**Indicador:** Cantidad de verdaderos positivos y verdaderos negativos.

**Definición operacional:** Número de eventos correctamente clasificados por el sistema durante las pruebas experimentales, identificando adecuadamente tanto la presencia como la ausencia de fugas de agua potable.

**Tabla 1**

Cuadro de variables e indicadores de la investigación.

| <b>Tipo</b>   | <b>Variables</b>                   | <b>Indicadores</b>                                              |
|---------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Dependiente   | Tiempo de detección de fugas       | Tiempo promedio de retardo en la detección de fugas             |
|               | Cantidad de detecciones acertadas  | Cantidad de verdaderos positivos y verdaderos negativos         |
| Independiente | Presencia de fugas de agua potable | Presencia o ausencia de eventos de fuga de agua en una vivienda |

Fuente: Elaboración propia.

## Capítulo 2

### 2 MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Redes domiciliarias de agua

Las redes domiciliarias de agua son sistemas de tuberías, conexiones y dispositivos diseñados para transportar agua potable desde una fuente de distribución (como el medidor principal o la acometida del servicio municipal) hasta los distintos puntos de consumo dentro de una vivienda. Estas redes permiten el suministro continuo y controlado de agua para actividades domésticas como el consumo humano, higiene personal, limpieza y otras tareas cotidianas.

El diseño de una red de agua en el hogar debe asegurar tanto el caudal necesario como la presión adecuada para que los dispositivos funcionen de manera eficiente. Para lograr esto, se emplean distintos componentes, entre los que se incluyen tuberías, codos, válvulas de paso, derivaciones, llaves de control y dispositivos de cierre. Dependiendo del tipo de construcción, estas instalaciones pueden estar empotradas en muros o pisos, o bien ser superficiales.

Una red domiciliaria típica se divide en tres partes:

1. Acometida o entrada de agua: Es el punto donde el agua proveniente del sistema público entra al domicilio, comúnmente controlado por un medidor y una válvula principal.
2. Distribución principal: Consiste en la red de tuberías que lleva el agua desde la entrada hasta los diferentes sectores del inmueble, como cocina, baños, lavandería, etc.
3. Puntos de consumo: Son las terminales de uso, como grifos, duchas, lavamanos, inodoros, etc.

El funcionamiento adecuado de estas redes depende del equilibrio entre presión y caudal. Una presión excesiva puede dañar los accesorios o provocar fugas, mientras que una presión insuficiente puede dificultar el uso de los dispositivos. Por ello, es fundamental contar con mecanismos que permitan monitorear el comportamiento de la red para prevenir fallas, detectar fugas y garantizar la eficiencia del sistema.

Con el paso del tiempo, las redes domiciliarias pueden presentar desgaste por corrosión, acumulación de sedimentos, o deterioro en las juntas, lo que incrementa el riesgo de fugas.

Este tipo de problemas, especialmente cuando son pequeños y no visibles, pueden pasar desapercibidos durante largos periodos, generando pérdidas significativas de agua.

Las redes domiciliarias de agua constituyen la infraestructura encargada de transportar agua potable desde la acometida principal hasta los distintos puntos de consumo dentro de una vivienda. Estas redes están conformadas por tuberías, válvulas, accesorios y dispositivos de control que permiten distribuir el agua de manera eficiente y segura hacia los diferentes ambientes de la vivienda, tales como cocinas, baños, lavanderías y sistemas de almacenamiento. El diseño adecuado de estas instalaciones debe garantizar condiciones apropiadas de caudal y presión para satisfacer las necesidades de los usuarios, minimizando pérdidas hidráulicas y asegurando la continuidad del servicio (Mays, 2011).

## **2.2 Concepto y origen de las fugas de agua**

Dentro de los sistemas de distribución de agua potable a nivel domiciliario, una fuga se define como cualquier pérdida de agua que no está prevista dentro del diseño o uso habitual de la red. Estas fugas pueden producirse en conexiones, uniones, válvulas o tramos de tubería, y suelen pasar desapercibidas cuando están ocultas dentro de muros, bajo pisos o en jardines Yto Montenegro (2017).

Su origen puede deberse a múltiples causas: deterioro de materiales con el paso del tiempo, presiones hidráulicas fuera del rango recomendado, corrosión interna o externa de las tuberías, vibraciones estructurales, o errores en el proceso de instalación. En general, una fuga, por pequeña que sea, puede generar importantes pérdidas económicas y comprometer la eficiencia del suministro, tanto para el usuario como para el proveedor del servicio.

Las fugas de agua constituyen una de las principales fuentes de pérdidas reales en las redes de distribución, afectando el rendimiento hidráulico del sistema y ocasionando un uso ineficiente del recurso hídrico. Por ello, la identificación temprana y el monitoreo continuo de estas anomalías resultan fundamentales para reducir el volumen de agua no contabilizada y mejorar la gestión operativa de los sistemas de abastecimiento Liemberger y Wyatt (2019).

### **2.2.1 Clasificación de fugas según su detección**

Según Puust, Kapelan, Savic, y Koppel (2010), las fugas en redes de distribución de agua pueden clasificarse según la facilidad con la que son identificadas y las características que presentan durante su ocurrencia. Esta clasificación permite establecer estrategias adecuadas para su localización y monitoreo.

- Fugas visibles: Son aquellas que se manifiestan de manera evidente, por ejemplo, a través de humedades, charcos o goteos. Son fáciles de identificar, pero a veces el daño ya está avanzado cuando se detectan.
- Fugas ocultas: Se encuentran escondidas en lugares poco accesibles y no presentan signos externos inmediatos. Son las más problemáticas, ya que pueden mantenerse activas durante semanas o meses sin ser advertidas.
- Fugas intermitentes o microfugas: Son aquellas que se presentan de forma muy leve o discontinua. Por lo general, requieren instrumentación especializada para ser detectadas, debido a que no afectan de forma perceptible el caudal visible.

### **2.2.2 Importancia de la detección temprana**

Detectar fugas de forma oportuna en redes domiciliarias es esencial para conservar el recurso hídrico, reducir el consumo innecesario y evitar daños a la infraestructura edilicia. Además, desde una perspectiva ambiental, el control de estas pérdidas ayuda a disminuir la demanda sobre fuentes de captación, promoviendo un uso más racional del agua. Farley y Trow (2003) señalan que la reducción de pérdidas en los sistemas de distribución constituye una estrategia fundamental para mejorar la eficiencia operativa de las redes y optimizar el aprovechamiento de los recursos hídricos disponibles.

El uso de tecnología electrónica en estos procesos permite actuar con mayor precisión, facilitando la identificación temprana de anomalías y reduciendo el tiempo necesario para localizar posibles fugas. Asimismo, el avance de los sistemas de monitoreo y control ha permitido desarrollar soluciones cada vez más accesibles para aplicaciones a pequeña escala,

incluyendo proyectos experimentales y prototipos de bajo costo orientados a la gestión eficiente del agua.

## **2.3 Técnicas y métodos para la detección de fugas**

### **2.3.1 Métodos convencionales**

Según Farley y Trow (2003), los métodos convencionales para la detección de fugas en redes de distribución de agua se basan principalmente en inspecciones manuales y pruebas hidráulicas que permiten identificar pérdidas visibles o variaciones anómalas en las condiciones de operación del sistema.

- Inspección visual directa: Consiste en revisar físicamente los puntos de la instalación donde podrían existir pérdidas. Aunque es un método simple, solo es útil cuando la fuga ya es evidente.
- Pruebas de presión: Se cierran todas las salidas de agua y se verifica si la presión interna del sistema se mantiene constante. Una pérdida de presión puede indicar la existencia de una fuga, aunque no se sepa con exactitud su ubicación.

### **2.3.2 Métodos electrónicos**

Los avances tecnológicos han impulsado el desarrollo de sistemas electrónicos para la detección de fugas que integran sensores, microcontroladores y tecnologías de transmisión de datos en tiempo real. Estas soluciones permiten realizar un monitoreo continuo de las redes hidráulicas e identificar anomalías de manera más rápida y precisa en comparación con los métodos convencionales de detección Yelve, Pawar, y Mulaveesala (2017).

En particular, los sistemas electrónicos de detección incluyen:

- Sensores de flujo: Detectan variaciones inesperadas en la cantidad de agua que circula. Si se mantiene un flujo constante sin que haya consumo activo, puede ser una señal de fuga.
- Sensores de presión: Registran caídas anormales en la presión del sistema, lo cual puede asociarse a una fuga interna.

- **Sistemas inteligentes:** Conformados por microcontroladores programables (ESP32), estos sistemas pueden procesar información de los sensores, activar alarmas y enviar notificaciones al usuario, permitiendo una gestión activa y remota.

### **2.3.3 Microcontrolador ESP32**

El ESP32 es un microcontrolador de 32 bits desarrollado por Espressif Systems que integra capacidades de procesamiento, conectividad Wi-Fi y Bluetooth, así como diversos periféricos de comunicación y adquisición de datos en un solo chip. Gracias a su versatilidad, bajo consumo energético y capacidad de procesamiento, es ampliamente utilizado en aplicaciones de sistemas embebidos e Internet de las Cosas (IoT)

El microcontrolador ESP32 pertenece a una nueva generación de dispositivos programables que destacan por integrar conectividad inalámbrica, capacidad de procesamiento robusta y múltiples periféricos en un solo chip. Desarrollado por Espressif Systems, este microcontrolador de arquitectura de 32 bits ha adquirido gran relevancia en el desarrollo de sistemas embebidos e Internet de las Cosas (IoT), debido a su equilibrio entre rendimiento y eficiencia energética Espressif Systems (2023).

Una de las características más importantes del ESP32 es la incorporación de dos núcleos de procesamiento, lo que permite ejecutar múltiples tareas de forma concurrente y mejorar el desempeño del sistema. Asimismo, integra convertidores analógico-digitales (ADC), temporizadores, pines de entrada/salida de propósito general y diversas interfaces de comunicación, como UART, I<sup>2</sup>C y SPI, que facilitan su integración con diferentes sensores y dispositivos electrónicos Valvano (2017).

Además, el ESP32 incorpora conectividad Wi-Fi y Bluetooth en el mismo circuito integrado, permitiendo la transmisión inalámbrica de datos sin necesidad de módulos externos. Esta característica lo convierte en una plataforma adecuada para aplicaciones de monitoreo remoto, automatización y adquisición de datos en tiempo real.

### **2.3.4 Diagrama de Bloques Funcional del ESP32**

El ESP32 es un microcontrolador de alto rendimiento que integra múltiples funciones en un solo chip. Su arquitectura interna puede entenderse a través de un diagrama de bloques funcional, el cual representa de forma esquemática los principales componentes que lo conforman y cómo interactúan entre sí. Este tipo de representación no entra en detalles eléctricos ni de circuitos, sino que organiza el sistema por módulos funcionales.

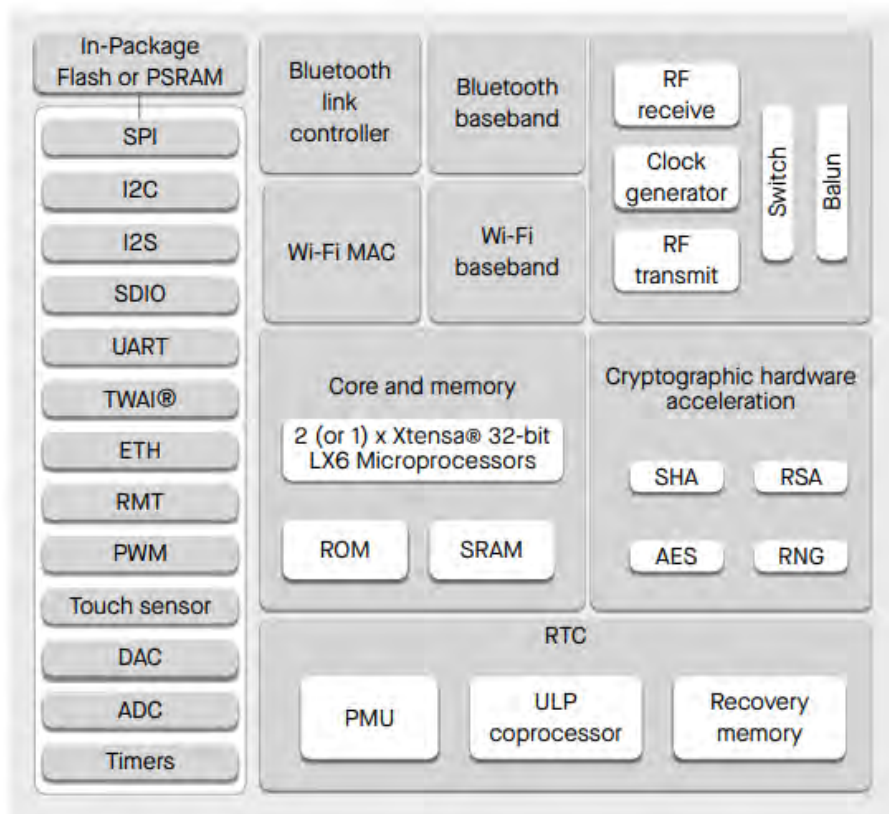
En el centro del diseño se encuentran los núcleos de procesamiento, generalmente dos procesadores Xtensa LX6, que operan de forma paralela para mejorar el rendimiento multitarea. Alrededor de estos núcleos se disponen módulos dedicados a la conectividad inalámbrica, incluyendo Wi-Fi 802.11 y Bluetooth (clásico y BLE), lo cual convierte al ESP32 en una plataforma ideal para aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT).

Además, el microcontrolador cuenta con bloques de memoria interna (RAM, ROM y Flash), así como con diversas interfaces de comunicación, como UART, SPI, I<sup>2</sup>C y CAN. También se incluyen periféricos analógicos y digitales, entre ellos convertidores analógico-digital (ADC), salidas PWM, convertidores digital-analógico (DAC) y múltiples pines de propósito general (GPIO).

El sistema de administración de energía del ESP32 está diseñado para optimizar el consumo eléctrico, ajustándose a diferentes modos de funcionamiento según las necesidades del proyecto. Esta característica resulta especialmente útil en aplicaciones que dependen de baterías o que buscan maximizar la eficiencia energética. Gracias a su arquitectura modular, el ESP32 permite simplificar tanto el desarrollo como la integración de sistemas complejos dentro de una única plataforma de hardware.

**Figura 1**

Diagrama funcional del microcontrolador ESP32.



Fuente: Espressif Systems (2023).

### 2.3.5 Pinout del ESP32

El ESP32 cuenta con un conjunto de pines GPIO (General Purpose Input/Output) que pueden configurarse tanto como entradas como salidas digitales. Dependiendo de la configuración del firmware y las necesidades del sistema, estos pines pueden adoptar múltiples funciones. A continuación, se detallan las principales categorías de pines disponibles:

### 2.3.6 Descripción de los Pines del ESP32

El microcontrolador ESP32 se caracteriza por su alta versatilidad y capacidad de interacción con diversos periféricos gracias a su amplia gama de pines de entrada/salida. A continuación, se describen las principales funcionalidades de sus pines:

### 2.3.7 Pines GPIO Entrada/Salida Digital

El ESP32 dispone de hasta 34 pines configurables como GPIO (*General Purpose Input/Output*). Estos pines permiten establecer comunicación directa con sensores digitales, actuadores, módulos externos y otros dispositivos electrónicos. Son fundamentales para la interacción física entre el microcontrolador y el entorno. Cada GPIO puede ser configurado como entrada o salida, e incluso puede usarse con funciones especiales como interrupciones o PWM (modulación por ancho de pulso).

### 2.3.8 Entradas Analógicas (ADC)

Este microcontrolador incorpora dos módulos ADC (ADC1 y ADC2), que en conjunto ofrecen hasta 18 canales de entrada analógica. Estos canales permiten leer señales variables de voltaje provenientes de sensores analógicos, como algunos modelos de sensores de presión o temperatura. La resolución de conversión puede alcanzar hasta 12 bits, lo que proporciona una buena precisión en la digitalización de señales analógicas. Es importante considerar que algunos pines del ADC2 no están disponibles cuando se utiliza la conectividad Wi-Fi.

### 2.3.9 Salidas Analógicas (DAC)

El ESP32 también cuenta con dos canales de conversión digital-analógica (DAC), que permiten generar señales analógicas a partir de datos digitales. Estos pines son útiles en aplicaciones que requieren una salida analógica suave, como control de motores, generación de señales o emulación de sensores.

### 2.3.10 Pines de Comunicación

El ESP32 admite múltiples protocolos de comunicación digital, facilitando la conexión con una amplia variedad de dispositivos. Los principales protocolos soportados son:

- **UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter):** permite la comunicación serial asíncrona con sensores, módulos GPS, módulos Bluetooth u otros microcontroladores.

- **I2C (Inter-Integrated Circuit):** ideal para conectar múltiples dispositivos con solo dos pines (SDA y SCL), como sensores de humedad, temperatura, memorias EEPROM, entre otros.
- **SPI (Serial Peripheral Interface):** utilizado en aplicaciones que requieren transmisión rápida de datos, como pantallas TFT, sensores de alta velocidad y módulos de almacenamiento.

### 2.3.11 Pines de Alimentación

El ESP32 cuenta con pines de alimentación que suministran 3.3V y pines de conexión a tierra (GND). Estos permiten alimentar sensores u otros periféricos externos. Es fundamental no superar el voltaje máximo de operación del ESP32, ya que podría dañarse de forma irreversible.

### 2.3.12 Pines Especiales

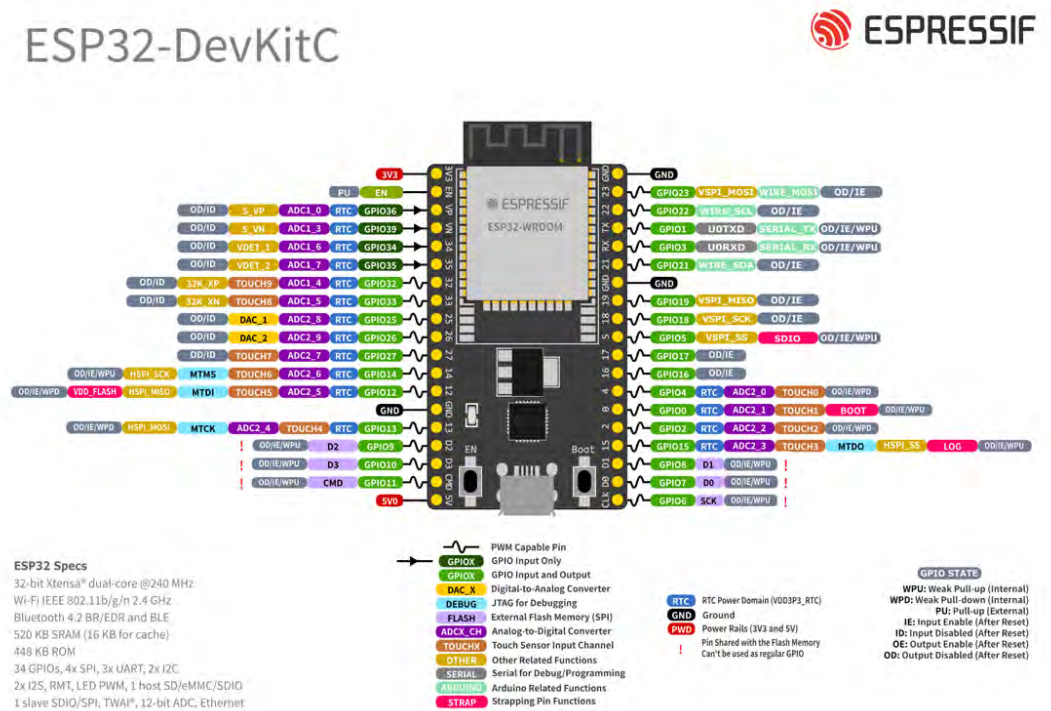
Existen ciertos pines que deben manejarse con precaución, ya que cumplen funciones específicas durante el arranque o la programación del dispositivo. Por ejemplo:

- **GPI00:** utilizado para colocar el ESP32 en modo de carga de firmware.
- **GPI02:** debe mantenerse en un estado específico durante el arranque.
- **EN (Enable):** reinicia el chip cuando se activa.
- **BOOT:** se utiliza para ingresar al modo de descarga del firmware.

El uso incorrecto de estos pines podría afectar el funcionamiento normal del sistema, por lo que es recomendable revisar su comportamiento en la hoja de datos del fabricante antes de utilizarlos.

**Figura 2**

Diagrama de pines del microcontrolador ESP32.



Fuente: Espressif Systems (2023).

## 2.4 Módulo ESP8266

El ESP8266 es un dispositivo electrónico ampliamente utilizado en aplicaciones de Internet de las Cosas debido a su capacidad de conectividad WiFi integrada y su bajo costo. Este dispositivo incorpora un microcontrolador en su arquitectura interna, lo que le permite ejecutar programas de forma autónoma sin necesidad de un sistema de procesamiento externo.

En la práctica, el ESP8266 se emplea en forma de módulo, facilitando su integración en sistemas electrónicos gracias a la disponibilidad de interfaces de comunicación, reguladores de voltaje y pines accesibles. Asimismo, puede ser programado mediante entornos de desarrollo como Arduino IDE, lo que simplifica su implementación en aplicaciones de monitoreo y control.

El ESP8266 es un dispositivo electrónico de bajo costo ampliamente utilizado en aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT), debido a que integra en un solo circuito capacidades de procesamiento y comunicación inalámbrica mediante tecnología Wi-Fi. Este dispositivo fue desarrollado por Espressif Systems y ha adquirido gran popularidad en

proyectos de automatización, monitoreo remoto y sistemas embebidos gracias a su facilidad de programación y reducidos requerimientos de hardware Jivani (2014).

A nivel interno, el ESP8266 incorpora un microcontrolador de 32 bits basado en arquitectura RISC, memoria integrada y un transceptor Wi-Fi compatible con los estándares IEEE 802.11 b/g/n. Esta integración permite que el dispositivo pueda ejecutar programas de manera autónoma, gestionar la adquisición de datos provenientes de sensores y establecer comunicación con servidores o plataformas de supervisión sin necesidad de módulos externos adicionales Espressif Systems (2024).

Una de las principales ventajas del ESP8266 es su capacidad para operar tanto como estación cliente (Station Mode) como punto de acceso inalámbrico (Access Point Mode), permitiendo una gran flexibilidad en el diseño de redes de comunicación para sistemas de monitoreo y control. Además, dispone de interfaces de comunicación digital como UART, SPI e I2C, facilitando su integración con diversos sensores, actuadores y microcontroladores Espressif Systems (2024).

En la práctica, el ESP8266 suele emplearse mediante módulos de desarrollo que incorporan reguladores de voltaje, convertidores USB a serial y conectores de fácil acceso para los pines de entrada y salida. Entre las versiones más utilizadas se encuentran los módulos NodeMCU y D1 Mini, los cuales simplifican considerablemente las tareas de programación y prototipado rápido. Gracias a la compatibilidad con el entorno Arduino IDE, el desarrollo de aplicaciones resulta accesible incluso para sistemas complejos de adquisición y transmisión de datos Kolban (2019).

El módulo ESP8266 fue utilizado como parte del sistema de alarma inalámbrica, permitiendo la recepción de comandos enviados desde el servidor principal mediante comunicación TCP/IP y la activación remota de una alarma sonora destinada a notificar la presencia de fugas de agua detectadas por el sistema.

Entre sus características principales destacan:

- **Conectividad:** Wi-Fi 802.11 b/g/n
- **Procesador:** 32 bits a 80 MHz

- **Memoria:** Flash programable
- **Modos de operación:** Capacidad de operar como cliente o servidor web
- **Eficiencia energética:** Consumo eficiente en modo de bajo consumo

El ESP8266 cumple un rol fundamental en la gestión del sistema de alerta ante la detección de fugas. Una vez identificada una condición anómala en el flujo de agua, este módulo permite emitir una notificación mediante redes inalámbricas, sin necesidad de cables o infraestructura compleja. De esta manera, el sistema mantiene una comunicación eficiente y en tiempo real con el usuario, mejorando la capacidad de respuesta ante posibles incidentes.

### Figura 3

Placa de desarrollo ESP8266 D1 Mini basada en el chip ESP8266EX.



Fuente: Espressif Systems (2023).

## 2.5 Entorno de Desarrollo Integrado Arduino (Arduino IDE)

El entorno de desarrollo integrado Arduino IDE constituye una plataforma de software ampliamente utilizada para la programación de sistemas embebidos basados en microcontroladores. Este entorno permite la escritura, compilación y carga de programas en tarjetas de desarrollo compatibles con Arduino y otros dispositivos basados en microcontroladores. Además, proporciona un conjunto de herramientas y bibliotecas que

facilitan el desarrollo de aplicaciones orientadas al monitoreo, adquisición de datos y control de procesos electrónicos (Margolis, 2020).

Desde el punto de vista funcional, el Arduino IDE proporciona un entorno de programación basado en el lenguaje C/C++, adaptado mediante librerías específicas que simplifican la interacción con el hardware. Estas librerías permiten gestionar entradas y salidas digitales, realizar lecturas analógicas, establecer comunicación serial y configurar periféricos internos del microcontrolador, lo que reduce la complejidad del desarrollo en sistemas embebidos.

El entorno de desarrollo incorpora un compilador, un editor de código y herramientas de carga de programas que permiten transferir el firmware directamente al microcontrolador mediante una conexión USB. Esta integración facilita el proceso de desarrollo, depuración y actualización del software, reduciendo significativamente los tiempos de implementación en proyectos electrónicos.

En el contexto del sistema de detección de fugas de agua, el Arduino IDE fue empleado para el desarrollo del firmware del ESP32, el cual se encarga de adquirir las señales provenientes de los sensores de flujo y presión instalados en la red domiciliaria. La programación del microcontrolador permite realizar el conteo de pulsos generados por los sensores de flujo, así como la conversión de señales analógicas en valores digitales mediante el uso del convertidor analógico-digital (ADC).

Asimismo, el entorno permite la implementación de rutinas de procesamiento digital, tales como el filtrado de señales, la sincronización de datos y la preparación de la información para su transmisión. Estas tareas son fundamentales para garantizar la estabilidad de las mediciones y reducir la influencia de perturbaciones o ruido en las señales adquiridas.

Otro aspecto relevante del Arduino IDE es su capacidad para integrar bibliotecas de comunicación, lo que permite configurar el módulo ESP32 para el envío de datos mediante redes inalámbricas. En el sistema propuesto, esta funcionalidad se utiliza para establecer una comunicación basada en protocolos TCP/IP, a través de la cual los datos procesados son enviados hacia un servidor local, donde son almacenados y visualizados en una interfaz gráfica desarrollada en Python.

Adicionalmente, el Arduino IDE incorpora herramientas como el monitor serial, el cual

facilita la visualización de datos en tiempo real durante la fase de pruebas y validación del sistema. Esta funcionalidad resulta esencial para verificar el correcto funcionamiento de los algoritmos implementados y ajustar parámetros asociados al procesamiento de señales.

Otra característica importante del Arduino IDE es su amplia compatibilidad con diferentes plataformas de hardware y la disponibilidad de una extensa comunidad de desarrolladores que contribuyen continuamente con bibliotecas, ejemplos y documentación técnica. Esto favorece la reutilización de código y acelera el desarrollo de aplicaciones orientadas a sistemas de adquisición de datos, automatización y monitoreo remoto.

En conjunto, el Arduino IDE proporciona un entorno robusto, flexible y de fácil utilización que permite el desarrollo eficiente del firmware del sistema, contribuyendo a la integración de sensores, procesamiento de datos y comunicación inalámbrica en una única plataforma de control basada en el ESP32 Banzi y Shiloh (2022).

## **2.6 Buzzer LTE 1081 J-R-ST**

El buzzer LTE 1081 J-R-ST es un dispositivo electroacústico empleado como elemento de alerta sonora en sistemas electrónicos. Su funcionamiento se basa en la conversión de energía eléctrica en ondas acústicas mediante un elemento piezoeléctrico que vibra al aplicarse una señal eléctrica, generando un sonido audible utilizado para indicar eventos específicos.

Este buzzer pertenece a la categoría de dispositivos activos, ya que incorpora un oscilador interno que permite generar el sonido sin necesidad de una señal de excitación externa, requiriendo únicamente una alimentación de corriente continua para su operación. Su rango de alimentación se encuentra entre 12 V y 24 V, con una frecuencia de operación cercana a 2.7 kHz y un bajo consumo de corriente, características que lo hacen adecuado para aplicaciones de monitoreo y alerta.

En el sistema propuesto, el buzzer LTE 1081 J-R-ST se utiliza como mecanismo de advertencia acústica ante la detección de fugas de agua. El microcontrolador ESP32 activa el dispositivo mediante una señal digital, empleando una etapa de control adecuada que garantiza la protección tanto del buzzer como del sistema electrónico.

La incorporación de este componente permite generar una alerta inmediata y perceptible

para el usuario, complementando el sistema de monitoreo y contribuyendo a una respuesta oportuna frente a condiciones anómalas en la red hidráulica.

#### **Figura 4**

Sirena luminosa con buzzer empleada en el sistema de alarma.



Fuente: Imagen referencial de dispositivo comercial.

### **2.7 Sistema de Comunicación Inalámbrica Wi-Fi**

El sistema de comunicación implementado se basa en la tecnología inalámbrica Wi-Fi, la cual permite la transmisión de datos digitales mediante ondas de radio en la banda de 2.4 GHz. Esta tecnología, definida por el estándar IEEE 802.11, ha sido ampliamente adoptada en aplicaciones de redes de datos debido a su capacidad para proporcionar conectividad inalámbrica confiable, facilidad de implementación y compatibilidad con una amplia variedad de dispositivos electrónicos Gast (2013).

El principio de funcionamiento de una red Wi-Fi se fundamenta en la comunicación entre dispositivos mediante señales electromagnéticas transmitidas a través del aire, eliminando la necesidad de enlaces físicos cableados. Los dispositivos conectados intercambian información mediante paquetes de datos que son gestionados por protocolos de comunicación de red, permitiendo el acceso a recursos compartidos y la transferencia de información en tiempo real.

En sistemas embebidos e Internet de las Cosas (IoT), la tecnología Wi-Fi constituye una de las alternativas más utilizadas para la transmisión de datos debido a la disponibilidad de infraestructura existente en entornos residenciales, comerciales e industriales. En particular,

el microcontrolador ESP32 incorpora conectividad Wi-Fi de forma nativa, lo que facilita la integración de aplicaciones de monitoreo remoto sin requerir módulos externos adicionales.

En el sistema de detección de fugas de agua desarrollado en esta investigación, la red Wi-Fi actúa como medio de transmisión para los datos obtenidos por los sensores de flujo y presión instalados en la red hidráulica domiciliaria. Las señales captadas son procesadas localmente por el microcontrolador ESP32, convirtiéndose en información digital que posteriormente es preparada para su transmisión hacia un servidor de procesamiento.

Una vez procesados, los datos son estructurados y enviados mediante el protocolo TCP/IP hacia un servidor local desarrollado en Python. El servidor recibe, clasifica y almacena la información proveniente de los distintos nodos de adquisición de datos, permitiendo posteriormente su representación gráfica y análisis en tiempo real. Esta arquitectura facilita la supervisión continua del comportamiento hidráulico de la instalación y contribuye a la detección temprana de posibles fugas mediante el análisis permanente de las variables monitoreadas.

Desde el punto de vista estructural, la comunicación implementada sigue una topología tipo estrella, donde el ESP32 establece conexión con un punto de acceso inalámbrico encargado de gestionar el intercambio de información dentro de la red local. Este esquema simplifica la administración de la comunicación y proporciona una mayor flexibilidad para la incorporación de nuevos dispositivos dentro del sistema.

Entre las principales ventajas de la tecnología Wi-Fi destacan la facilidad de instalación, la eliminación de cableado adicional, la reducción de costos de infraestructura y la disponibilidad de velocidades de transmisión adecuadas para aplicaciones de monitoreo y control. Asimismo, el alcance típico de operación en interiores, que puede variar entre aproximadamente 10 y 50 metros dependiendo de las condiciones del entorno, resulta suficiente para cubrir las necesidades de comunicación presentes en instalaciones domiciliarias.

Adicionalmente, la utilización de Wi-Fi permite implementar sistemas de supervisión distribuida capaces de transmitir información en tiempo real hacia aplicaciones de monitoreo, servidores locales o plataformas de análisis de datos. Esta característica resulta especialmente importante en sistemas de detección de fugas de agua, donde la disponibilidad inmediata de

la información contribuye a una respuesta más rápida ante eventos anómalos y favorece una gestión más eficiente del recurso hídrico.

En conjunto, la tecnología Wi-Fi proporciona una solución de comunicación inalámbrica robusta, flexible y de amplia disponibilidad, permitiendo integrar sensores, microcontroladores y sistemas de supervisión dentro de una misma arquitectura de monitoreo orientada a la detección temprana de fugas de agua en redes de distribución domiciliaria Gast (2013).

## **2.8 Protocolo de Comunicación**

En el presente proyecto, se implementa un sistema de comunicación inalámbrica basado en el protocolo TCP/IP, el cual permite la transmisión de datos entre el microcontrolador ESP32 y un servidor local a través de una red Wi-Fi. Esta forma de comunicación se encuadra dentro del modelo cliente-servidor, donde el ESP32 actúa como cliente encargado de establecer una conexión con el servidor para transmitir la información adquirida por los sensores instalados en la red hidráulica.

El protocolo TCP/IP (Transmission Control Protocol / Internet Protocol) constituye la base de las comunicaciones modernas en redes de computadoras. Se trata de un conjunto de protocolos diseñados para permitir el intercambio de información entre dispositivos conectados a una red, independientemente de su arquitectura de hardware o sistema operativo. Su amplia adopción se debe a su capacidad para proporcionar comunicaciones confiables, escalables y eficientes en entornos locales y distribuidos Forouzan (2013).

Dentro de esta arquitectura, el Protocolo de Internet (IP) es responsable del direccionamiento y encaminamiento de los paquetes de datos. Cada dispositivo conectado a la red dispone de una dirección IP que permite identificarlo de manera única dentro del sistema de comunicación. Gracias a este mecanismo, los paquetes generados por el emisor pueden ser dirigidos correctamente hacia el dispositivo receptor.

Por su parte, el Protocolo de Control de Transmisión (TCP) proporciona un servicio de transporte orientado a conexión, garantizando que los datos enviados lleguen completos, sin pérdidas y en el mismo orden en que fueron transmitidos. Para ello, TCP emplea mecanismos de control de errores, verificación de integridad, confirmación de recepción y retransmisión

automática de paquetes cuando se detectan fallos durante la comunicación.

En el sistema desarrollado, el microcontrolador ESP32 recopila continuamente las mediciones provenientes de los sensores de flujo y presión instalados en distintos puntos de la red domiciliaria. Posteriormente, estas mediciones son procesadas, organizadas en tramas de datos y enviadas al servidor mediante una conexión TCP establecida a través de la red Wi-Fi local.

El servidor implementado en Python recibe los paquetes transmitidos por los distintos nodos del sistema, clasifica la información según su origen y realiza tareas de almacenamiento, procesamiento y visualización. Este esquema permite centralizar la gestión de los datos y facilita la supervisión continua del comportamiento hidráulico de la instalación.

La utilización del modelo cliente-servidor ofrece diversas ventajas para aplicaciones de monitoreo en tiempo real. Entre ellas destacan la posibilidad de administrar múltiples dispositivos desde una única estación de control, la facilidad para implementar mecanismos de supervisión remota y la capacidad de ampliar el sistema mediante la incorporación de nuevos nodos de adquisición sin modificar la arquitectura principal de comunicación.

Asimismo, la elección del protocolo TCP resulta especialmente adecuada para aplicaciones de detección de fugas de agua debido a la importancia de preservar la integridad de los datos transmitidos. Una pérdida de información podría afectar la precisión de los algoritmos de detección, generando diagnósticos incorrectos sobre el estado de la red hidráulica. Gracias a los mecanismos de confiabilidad incorporados por TCP, el sistema garantiza que las mediciones lleguen correctamente al servidor para su posterior análisis.

En conjunto, la implementación de una comunicación basada en TCP/IP sobre una red Wi-Fi proporciona una solución robusta, confiable y flexible para la transmisión de datos en sistemas de monitoreo distribuido. Esta arquitectura permite integrar sensores, microcontroladores y plataformas de procesamiento dentro de una misma infraestructura de comunicación, contribuyendo al funcionamiento eficiente del sistema electrónico de detección de fugas de agua desarrollado en la presente investigación Forouzan (2013).

Con el fin de seleccionar el protocolo de comunicación más adecuado para la transmisión de datos entre el microcontrolador ESP32 y la aplicación de monitoreo desarrollada en Python,

se realizó una comparación entre algunos de los protocolos más utilizados en aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT) y sistemas de monitoreo. Los criterios considerados fueron la confiabilidad, la integridad de los datos, la facilidad de implementación y su adecuación para sistemas de detección de fugas de agua.

**Tabla 2**

Comparación de protocolos de comunicación utilizados en sistemas IoT y monitoreo.

| <b>Criterio</b>             | <b>TCP/IP</b> | <b>UDP</b> | <b>MQTT</b> | <b>HTTP</b> |
|-----------------------------|---------------|------------|-------------|-------------|
| Confiabilidad               | Excelente     | Baja       | Alta        | Alta        |
| Integridad de datos         | Excelente     | Baja       | Alta        | Alta        |
| Tiempo real                 | Buena         | Excelente  | Buena       | Regular     |
| Facilidad de implementación | Excelente     | Buena      | Regular     | Buena       |
| Detección de fugas          | Excelente     | Regular    | Buena       | Buena       |

**Fuente:** Elaboración propia.

De acuerdo con los criterios evaluados, el protocolo TCP/IP fue seleccionado para la implementación del sistema debido a que proporciona una comunicación confiable entre el ESP32 y la aplicación de monitoreo. A diferencia de UDP, incorpora mecanismos de verificación y retransmisión de datos que reducen la probabilidad de pérdida de información. Asimismo, su implementación resulta más sencilla que MQTT, ya que no requiere un broker intermediario para la gestión de mensajes.

Considerando que el sistema desarrollado tiene como objetivo detectar fugas de agua mediante el análisis de datos de caudal y presión en tiempo real, la integridad y confiabilidad de la información transmitida constituyen factores críticos. Por esta razón, TCP/IP representa la alternativa más adecuada para garantizar el correcto funcionamiento del sistema propuesto.

## **2.9 Python como Herramienta Integral para el Servidor y la Interfaz Gráfica de Monitoreo**

El lenguaje de programación Python ha ganado amplio reconocimiento en el ámbito de la ingeniería electrónica y los sistemas embebidos debido a su sintaxis clara, su capacidad de integración con hardware y su ecosistema de bibliotecas especializadas Halvorsen (2024). Su naturaleza multiplataforma y su amplia disponibilidad de herramientas para adquisición, procesamiento y visualización de datos lo convierten en una alternativa eficiente para el desarrollo de aplicaciones de monitoreo y control. Asimismo, Python permite implementar algoritmos de análisis en tiempo real, establecer comunicaciones mediante protocolos de red y desarrollar interfaces gráficas de usuario que facilitan la supervisión de variables físicas y el control de dispositivos electrónicos. Estas características han favorecido su adopción en sistemas de automatización, Internet de las Cosas (IoT) y aplicaciones orientadas a la instrumentación electrónica Halvorsen (2024).

## **2.10 Python como Servidor de Procesamiento de Datos**

En el contexto del sistema electrónico de detección de fugas de agua desarrollado, el servidor constituye un elemento fundamental dentro de la arquitectura de comunicación y procesamiento de información. Su función principal es actuar como intermediario entre el microcontrolador ESP32, encargado de la adquisición de datos provenientes de los sensores instalados en la red hidráulica, y la interfaz gráfica utilizada por el usuario para el monitoreo del sistema.

El servidor fue desarrollado utilizando el lenguaje de programación Python debido a su versatilidad, facilidad de integración con sistemas de adquisición de datos y disponibilidad de bibliotecas especializadas para procesamiento numérico, comunicación en red y desarrollo de interfaces gráficas. A través de este servidor es posible recibir, procesar, almacenar y visualizar en tiempo real las variables monitoreadas por el sistema, tales como los caudales medidos por los sensores de flujo y los valores de presión registrados en la red de distribución domiciliaria.

La comunicación entre el microcontrolador ESP32 y el servidor se realiza mediante el protocolo TCP/IP a través de una red Wi-Fi. Esta arquitectura permite la transmisión

confiable de datos en tiempo real sin necesidad de conexiones físicas cableadas, facilitando la implementación de sistemas de monitoreo remoto y contribuyendo a la escalabilidad de la solución propuesta.

Para el desarrollo del servidor se emplearon diversas bibliotecas de Python, cada una orientada a funciones específicas dentro del sistema:

- **Socket:** utilizada para implementar la comunicación cliente-servidor mediante el protocolo TCP/IP, permitiendo la recepción y transmisión de datos entre el ESP32 y la aplicación de monitoreo.
- **NumPy:** empleada para el procesamiento eficiente de datos numéricos y la ejecución de operaciones matemáticas requeridas por los algoritmos de detección.
- **Collections (deque):** utilizada para el almacenamiento temporal de datos mediante estructuras de cola de doble extremo, permitiendo implementar ventanas deslizantes para el análisis de señales.
- **Threading:** utilizada para la ejecución concurrente de múltiples tareas, permitiendo mantener la recepción de datos y la actualización de la interfaz gráfica de manera simultánea.
- **Multiprocessing:** empleada para optimizar el procesamiento de datos mediante la ejecución paralela de procesos independientes.
- **Pandas:** utilizada para la organización, análisis y almacenamiento estructurado de los datos experimentales obtenidos durante las pruebas del sistema.
- **OpenPyXL:** empleada para la generación y exportación automática de archivos en formato Excel, facilitando el registro de resultados experimentales.
- **Flet:** utilizada para el desarrollo de la interfaz gráfica de usuario, permitiendo la visualización en tiempo real de los parámetros monitoreados y del estado operativo del sistema.

La arquitectura implementada permite incorporar funciones avanzadas de procesamiento y análisis de datos, tales como la aplicación de filtros digitales para la reducción de ruido, el cálculo del coeficiente de distribución de caudales ( $\alpha$ ), la evaluación de diferencias entre caudales de entrada y salida y la generación automática de alertas ante posibles eventos de fuga. Asimismo, posibilita el almacenamiento histórico de información para posteriores análisis de desempeño y validación experimental.

En consecuencia, el uso de Python como servidor de procesamiento de datos proporciona una plataforma flexible, escalable y confiable para la supervisión en tiempo real de redes de distribución domiciliaria, contribuyendo significativamente a la detección temprana de fugas de agua y al mejoramiento de la gestión eficiente del recurso hídrico.

## **2.11 Interfaz Gráfica Desarrollada con Flet**

Para la capa de presentación, el proyecto hace uso del framework Flet, una biblioteca de Python que permite desarrollar interfaces gráficas reactivas mediante componentes basados en Flutter. Flutter es un kit de desarrollo de interfaces de usuario multiplataforma creado por Google, diseñado para construir aplicaciones para dispositivos móviles, web y escritorio a partir de una única base de código. Su arquitectura basada en widgets facilita la creación de interfaces dinámicas, visualmente consistentes y de alto rendimiento, permitiendo además una experiencia de usuario uniforme en diferentes plataformas Bailey y Biessek (2023).

**– Entre las ventajas de Flet se encuentran:**

- Desarrollo rápido de interfaces web modernas usando solo Python.
- Amplio catálogo de componentes gráficos: botones, tarjetas, tablas, gráficos y más.
- Capacidad de actualización en tiempo real de la interfaz mediante programación reactiva
- Integración sencilla con bibliotecas de análisis de datos y lectura de sensores

## Capítulo 3

### 3 DISEÑO E IMPLEMENTACION DEL SISTEMA

#### 3.1 Arquitectura general del sistema de detección de fugas de agua en una red domiciliaria.

Figura 5

Arquitectura general del sistema electrónico de detección de fugas de agua en una red domiciliaria.



Fuente: Elaboración propia.

La arquitectura del sistema de detección de fugas de agua se basa en una estructura distribuida compuesta por múltiples nodos de adquisición, un sistema de procesamiento central y un módulo de alerta, todos interconectados mediante una red WiFi local. Esta configuración permite el monitoreo en tiempo real de variables hidráulicas críticas, así como la identificación de condiciones anómalas asociadas a posibles fugas en la red domiciliaria.

El sistema está conformado por tres nodos principales implementados con módulos ESP32, ubicados estratégicamente en diferentes puntos de la red hidráulica. El nodo principal se encarga de medir el caudal total mediante un sensor de flujo instalado en la tubería principal, así como la presión del sistema a través de un sensor de presión ubicado a la salida del medidor

de agua. Además, este nodo está vinculado al control de una válvula solenoide instalada en la línea principal.

El segundo nodo, ubicado en la lavandería, mide el caudal correspondiente a dicha derivación mediante un sensor de flujo. De manera similar, el tercer nodo, ubicado en el tanque, registra el caudal asociado al llenado del reservorio. Estos nodos permiten desagregar el consumo por sectores, facilitando el análisis del comportamiento hidráulico del sistema.

La comunicación entre los nodos y el sistema central se realiza a través de una red WiFi local, utilizando el protocolo TCP/IP. Los datos adquiridos son enviados hacia un servidor local, donde se ejecuta una aplicación desarrollada en Python con interfaz gráfica de usuario, la cual permite visualizar en tiempo real las variables del sistema y realizar el análisis correspondiente para la detección de fugas.

El sistema maneja un conjunto de señales estructuradas: S1 correspondiente a la presión del sistema, S2 al caudal principal, S5 al caudal de la lavandería y S3 al caudal del tanque. Estas señales son procesadas para evaluar el balance hidráulico y determinar la posible existencia de fugas en la red.

En cuanto al sistema de alerta, se emplea un módulo basado en un microcontrolador ESP8266, el cual activa una alarma sonora cuando se detecta una condición anómala. Esta alerta permite advertir al usuario sobre la presencia de una posible fuga.

La activación del cierre del flujo de agua se lleva a cabo de forma manual a través de la interfaz gráfica del sistema. Esta característica permite que el usuario tenga control directo sobre la operación del sistema, evitando cierres innecesarios y permitiendo una verificación previa antes de interrumpir el suministro.

### **3.2 Transmisión de paquetes de datos mediante TCP/IP**

La comunicación entre los nodos de adquisición de datos y el servidor central se realiza mediante una red inalámbrica Wi-Fi utilizando el protocolo TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol). Esta arquitectura permite la transmisión confiable de las variables hidráulicas monitoreadas en diferentes puntos de la red domiciliaria, garantizando que la información llegue íntegramente al sistema de procesamiento para su posterior análisis.

El sistema desarrollado está conformado por tres nodos basados en el microcontrolador ESP32. El nodo principal realiza la adquisición de la presión y del caudal de entrada de la red hidráulica, mientras que los nodos secundarios monitorean los caudales correspondientes al ramal del tanque y al ramal de lavandería. Cada nodo establece una conexión TCP con el servidor central y transmite periódicamente las mediciones obtenidas durante la operación del sistema.

El servidor central, implementado en Python, permanece en estado de escucha sobre una dirección IP y un puerto previamente configurados. Cuando uno de los nodos establece conexión con el servidor, se crea un hilo de ejecución independiente encargado de gestionar la comunicación con dicho dispositivo, permitiendo la recepción simultánea de información proveniente de múltiples nodos sin afectar el desempeño general del sistema.

La utilización del protocolo TCP proporciona diversas ventajas para la aplicación desarrollada, entre las que destacan la entrega ordenada de los paquetes de datos, la verificación de errores durante la transmisión, la retransmisión automática de información perdida y el establecimiento de una comunicación orientada a conexión. Estas características permiten incrementar la confiabilidad del sistema de detección de fugas y asegurar la integridad de las mediciones utilizadas durante el procesamiento.

### **3.2.1 Estructura de los paquetes de datos**

Las variables hidráulicas medidas por los diferentes nodos son encapsuladas en paquetes de datos de tipo texto antes de ser transmitidas al servidor. Cada paquete contiene un identificador que permite reconocer el origen y el tipo de información enviada, además de una serie de campos organizados de acuerdo con una estructura previamente definida.

La estructura general utilizada por el sistema es la siguiente:

Identificador;Contador;Valor;Dato\_adicional

donde:

- Identificador: código utilizado para identificar la variable transmitida.

- Contador: variable incremental utilizada para mantener el orden de adquisición de las muestras transmitidas por cada nodo.
- Valor: magnitud física medida por el sensor correspondiente.
- Dato adicional: información complementaria asociada a la medición realizada.

Una vez recibida la trama TCP, el servidor identifica la estructura del paquete y extrae individualmente cada uno de los campos contenidos en el mensaje. Posteriormente, los datos son convertidos a variables numéricas y almacenados para las etapas posteriores de sincronización, filtrado y detección de fugas.

### **3.2.2 Trama de presión**

La presión medida por el sensor HK3025 es transmitida mediante el identificador S1.

La estructura utilizada es:

S1;Contador;Presion

donde el primer campo identifica la variable transmitida, el segundo campo corresponde al contador de adquisición y el tercer campo contiene el valor de presión expresado en MPa.

Al recibir una trama identificada como S1, el servidor extrae el valor de presión y lo almacena para su visualización en tiempo real dentro de la interfaz gráfica.

### **3.2.3 Trama de flujo principal**

El caudal correspondiente a la tubería principal es transmitido mediante el identificador S2.

La estructura utilizada es:

S2;Contador;Caudal;Pulsos

donde:

- S2: identifica el flujo principal.
- Contador: corresponde al orden de adquisición de la muestra.

- Caudal: representa el flujo calculado en litros por minuto (L/min).
- Pulsos: corresponde a la cantidad de pulsos registrados por el sensor de flujo durante el intervalo de medición.

Esta información es utilizada posteriormente para determinar el comportamiento hidráulico de la red y realizar el balance de caudales.

### **3.2.4 Trama de flujo del ramal del tanque**

El caudal que circula por el ramal del tanque es transmitido mediante el identificador S3.

La estructura utilizada es:

S3;Contador;Caudal;Pulsos

donde:

- S3: identifica el flujo correspondiente al ramal del tanque.
- Contador: corresponde al orden de adquisición de la muestra.
- Caudal: representa el valor del flujo filtrado expresado en litros por minuto (L/min).
- Pulsos: corresponde a la cantidad de pulsos registrados por el sensor de flujo.

Esta información permite monitorear el comportamiento hidráulico del ramal del tanque y participar en el cálculo del balance de caudales de la red.

### **3.2.5 Trama de flujo del ramal de lavandería**

El caudal que circula por el ramal de lavandería es transmitido mediante el identificador S5.

La estructura utilizada es:

S5;Contador;Caudal;Pulsos

donde:

- S5: identifica el flujo correspondiente al ramal de lavandería.

- Contador: corresponde al orden de adquisición de la muestra.
- Caudal: representa el valor del flujo calculado en litros por minuto (L/min).
- Pulsos: corresponde a la cantidad de pulsos detectados por el sensor durante el intervalo de medición.

Esta información es utilizada para determinar el consumo asociado al ramal de lavandería y su contribución al balance hidráulico general.

### **3.2.6 Recepción y clasificación de las tramas**

Cuando el servidor recibe un paquete de datos, realiza una verificación inicial para identificar el tipo de información transmitida mediante el código de identificación contenido en la trama. Posteriormente, el mensaje es segmentado de acuerdo con la estructura definida en el protocolo de comunicación, permitiendo extraer individualmente cada uno de los campos asociados a la medición.

Una vez obtenidos los datos, el servidor efectúa la conversión de los valores recibidos a variables numéricas y los clasifica en estructuras de almacenamiento específicas según la variable monitoreada. De esta manera, las mediciones de presión, flujo principal, flujo del ramal del tanque y flujo del ramal de lavandería son procesadas de forma independiente y organizada.

Este procedimiento permite gestionar simultáneamente múltiples fuentes de información provenientes de distintos nodos de adquisición, garantizando una adecuada separación de las variables hidráulicas monitoreadas y facilitando las etapas posteriores de procesamiento.

### **3.2.7 Sincronización de las mediciones**

Debido a que los nodos transmiten información de manera independiente, las muestras no llegan necesariamente al servidor en el mismo instante. Para garantizar la coherencia durante el análisis, las mediciones de flujo principal, flujo del tanque y flujo de lavandería son almacenadas temporalmente en buffers de sincronización independientes.

El procesamiento se ejecuta únicamente cuando cada buffer contiene un mínimo de cuatro muestras disponibles. Una vez alcanzada esta condición, el sistema calcula los valores

representativos de cada variable mediante un promedio ponderado y posteriormente vacía los buffers para iniciar un nuevo ciclo de adquisición.

Este procedimiento permite realizar los cálculos utilizando información proveniente de las tres ramas monitoreadas dentro de una misma ventana de análisis, reduciendo posibles errores asociados a diferencias temporales entre transmisiones.

### **3.2.8 Filtrado y validación de los datos recibidos**

Con el objetivo de mejorar la estabilidad de las mediciones y reducir la influencia de fluctuaciones instantáneas, el servidor aplica técnicas de procesamiento digital sobre los datos recibidos. Inicialmente, las muestras sincronizadas son sometidas a un cálculo de promedio ponderado, otorgando diferentes pesos a los valores almacenados dentro de cada buffer.

Posteriormente, el sistema implementa mecanismos de detección de transitorios para evitar falsas alarmas producidas por aperturas o cierres repentinos de los ramales monitoreados. Cuando se detectan variaciones significativas entre las mediciones instantáneas y los valores procesados, el análisis de fugas es suspendido temporalmente hasta que el comportamiento hidráulico vuelva a estabilizarse.

Adicionalmente, se utilizan buffers de suavizado para el coeficiente de distribución  $\alpha$  y para el caudal de fuga calculado. Esta estrategia permite que la decisión final de detección se base en tendencias estables y no únicamente en valores instantáneos, incrementando la robustez del sistema frente a perturbaciones temporales.

### **3.2.9 Tramas de control**

Además de recibir información proveniente de los sensores, el servidor también transmite comandos de control hacia los nodos remotos.

Para el control de la electroválvula se emplean las siguientes tramas:

- V0: orden utilizada para el cierre de la electroválvula.
- V4: orden utilizada para la apertura de la electroválvula.

Asimismo, durante el proceso de detección de fugas se utilizan las siguientes tramas:

- ON: activación de la alarma de fuga.
- OFF: desactivación de la alarma cuando las condiciones retornan a la normalidad.

### **3.3 Diagrama de bloques del sistema electrónico de detección de fugas de agua**

La Figura 6 presenta el diagrama de bloques del sistema electrónico de detección de fugas de agua desarrollado para la supervisión de redes domiciliarias a nivel de prototipo. El sistema está conformado por una fuente de alimentación, un sensor de flujo, un sensor de presión, un módulo bidireccional de adaptación de niveles lógicos, una tarjeta de procesamiento basada en ESP32, un módulo relé y una electroválvula de accionamiento eléctrico.

El funcionamiento general del sistema inicia con la fuente de alimentación, encargada de suministrar energía eléctrica a todos los módulos electrónicos. La fuente proporciona una salida de 5 V para alimentar los dispositivos de control y adquisición de datos, así como una salida de 12 V destinada al accionamiento de la electroválvula mediante el módulo relé.

El sensor de flujo YF-S201 realiza la medición del caudal de agua que circula por la tubería. Su principio de funcionamiento se basa en la generación de pulsos digitales producidos por el giro de una turbina interna equipada con un sensor de efecto Hall. La frecuencia de estos pulsos es proporcional al caudal instantáneo, permitiendo determinar el volumen de agua que atraviesa la conducción. Debido a que la salida del sensor opera a 5 V, la señal es acondicionada mediante un módulo bidireccional de nivel lógico para adecuarla a los niveles de entrada del microcontrolador.

El módulo bidireccional de nivel lógico tiene la función de convertir la amplitud de los pulsos digitales desde 5 V hacia 3.3 V, garantizando la compatibilidad eléctrica con las entradas del ESP32. De esta manera se evita la aplicación de niveles de tensión superiores a los admitidos por el microcontrolador, preservando la integridad del sistema de adquisición.

Por otra parte, el sensor de presión HK3025 efectúa la medición de la presión hidráulica presente en la red de distribución. Este dispositivo genera una señal analógica proporcional a la presión detectada, la cual es adquirida por el convertidor analógico-digital (ADC) integrado en el ESP32. La información de presión complementa los datos de caudal y permite mejorar la confiabilidad del proceso de detección de fugas.

La unidad central de procesamiento está constituida por el microcontrolador ESP32, encargado de recibir las señales provenientes de los sensores, realizar el conteo de pulsos del sensor de flujo, calcular la frecuencia de operación, convertir dicha frecuencia en valores de caudal expresados en litros por minuto, adquirir los datos de presión y ejecutar los algoritmos de procesamiento digital implementados para la detección de fugas de agua.

Dentro del ESP32 se desarrollan las tareas de filtrado y análisis de las señales adquiridas con el propósito de reducir el efecto del ruido y las fluctuaciones transitorias propias del sistema hidráulico. A partir de la información procesada, el microcontrolador determina la condición de funcionamiento de la red y establece si existe o no una fuga de agua.

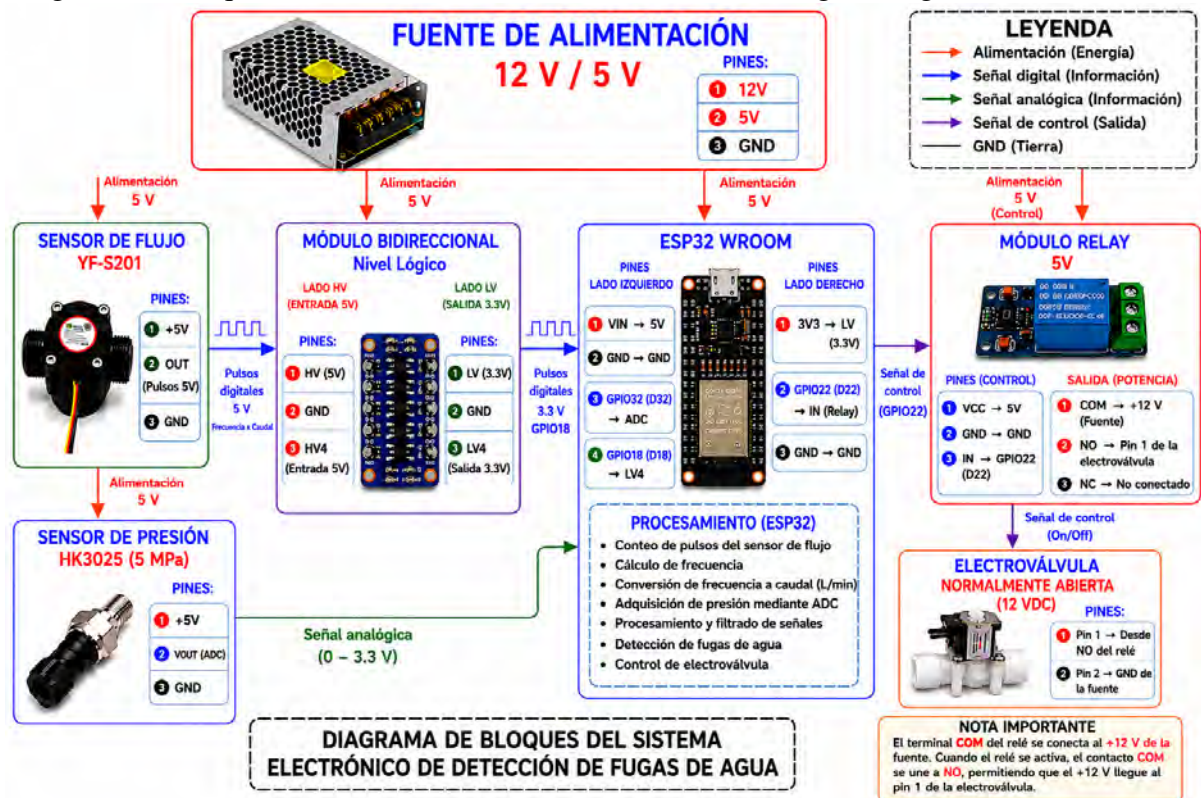
Cuando el algoritmo de detección identifica una condición de fuga, el ESP32 genera una señal digital de control a través del pin GPIO22. Esta señal activa el módulo relé de 5 V, el cual funciona como una interfaz de potencia entre la electrónica de control y la electroválvula de 12 V.

El módulo relé permite conmutar la alimentación de la electroválvula mediante contactos eléctricos aislados. En condiciones normales, la electroválvula permanece abierta permitiendo el paso del agua. Cuando se detecta una fuga y el relé es energizado, el contacto de salida conmuta la alimentación de 12 V hacia la electroválvula, provocando su accionamiento y ejecutando el cierre automático del suministro de agua.

Finalmente, la interacción coordinada entre los sensores, el sistema de procesamiento y el mecanismo de control permite supervisar continuamente la red hidráulica, identificar pérdidas de agua y actuar automáticamente para minimizar el desperdicio del recurso hídrico y prevenir daños en las instalaciones domiciliarias.

**Figura 6**

Diagrama de bloques del sistema electrónico de detección de fugas de agua.



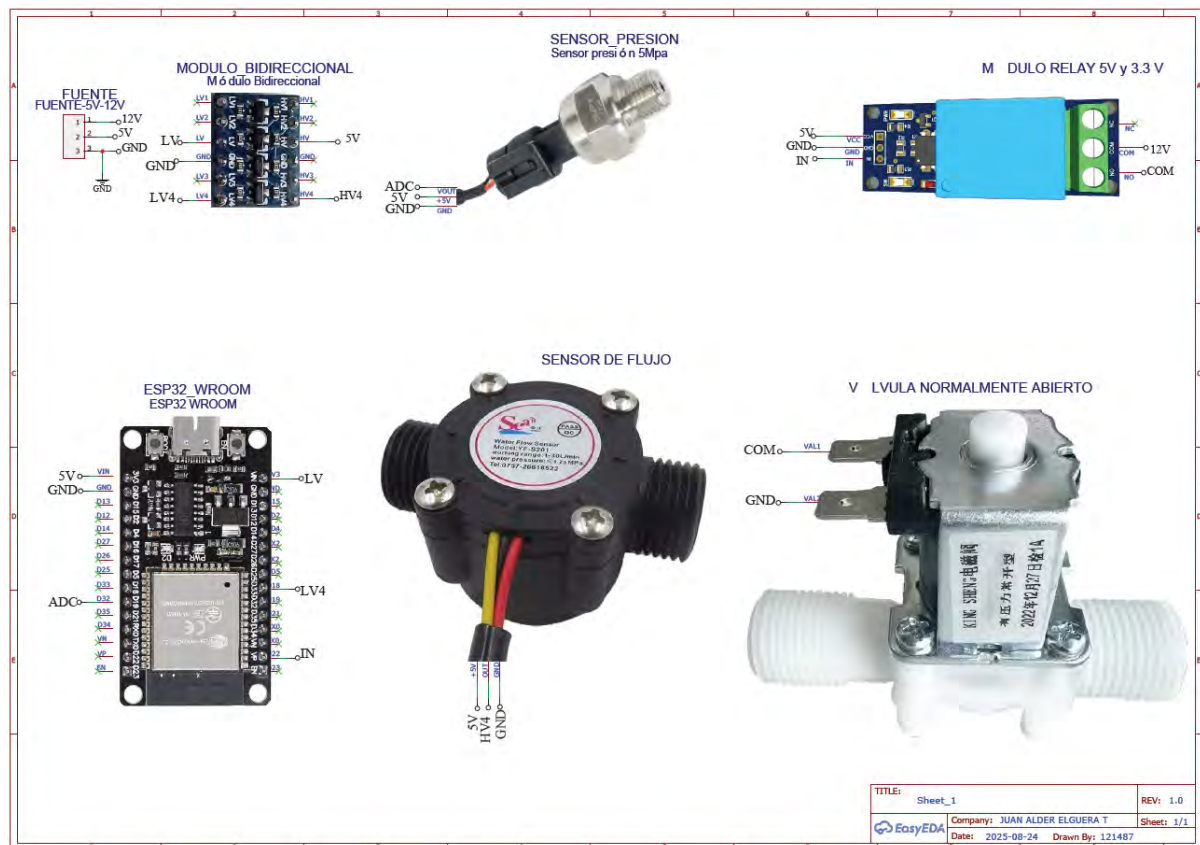
Fuente: Elaboración propia.

### 3.4 Diseño del sistema electrónico

#### 3.4.1 Arquitectura e integración de los componentes del sistema electrónico de detección de fugas de agua

Figura 7

Diagrama de interconexión de los módulos electrónicos del sistema de detección de fugas de agua.



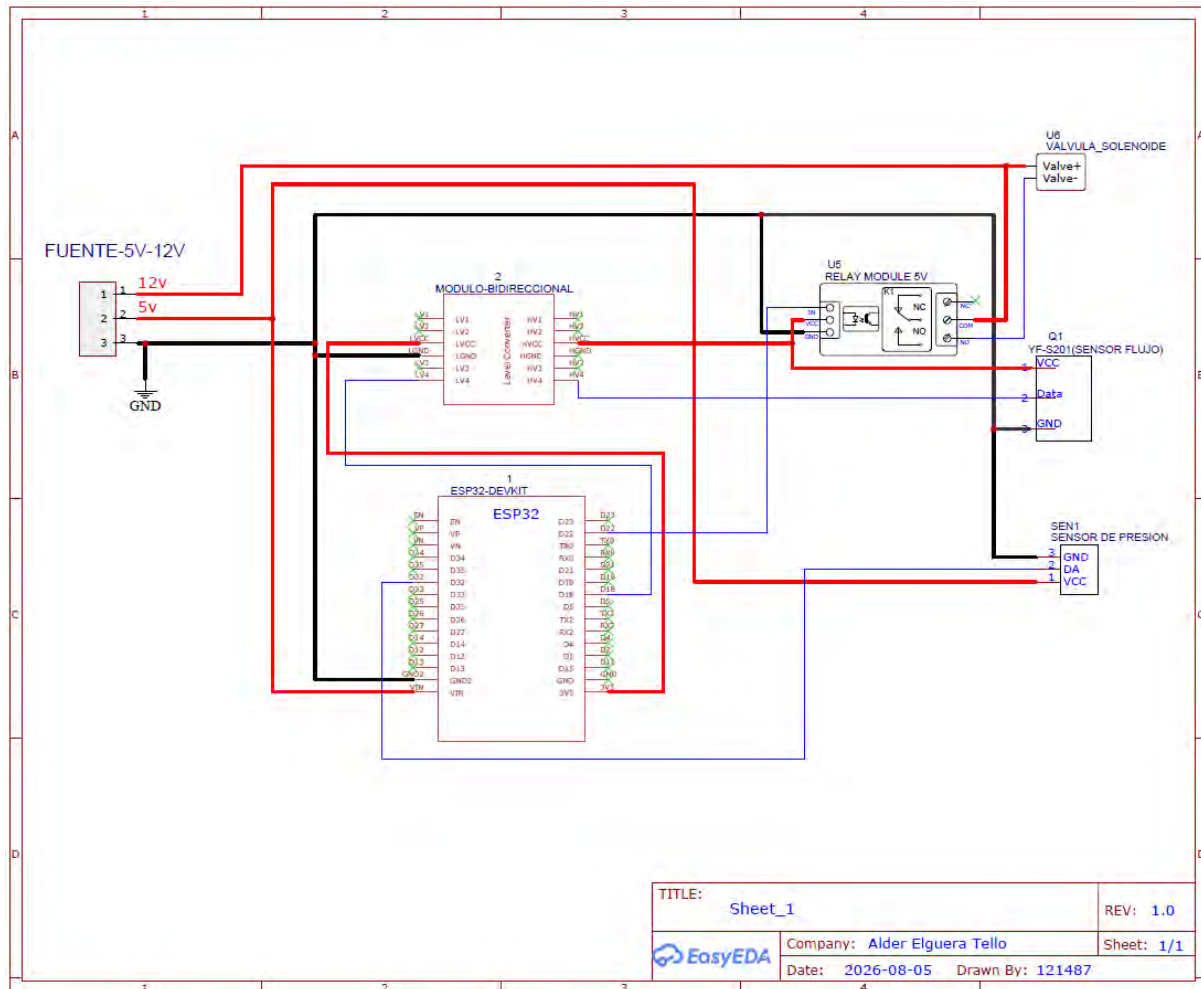
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 7 muestra la conexión de todos los módulos: el microcontrolador ESP32 recibe señales de los sensores de flujo YF-S201 y del sensor de presión HK3025, procesa los datos y activa la válvula normalmente abierta mediante un módulo relé. Además, se emplea un módulo bidireccional para adaptar los niveles lógicos de 5 V a 3.3 V.

### 3.4.2 Diseño electrónico y eléctrico del sistema de detección de fugas de agua.

**Figura 8**

Circuito electrónico y eléctrico implementado para el sistema de detección de fugas de agua.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 8 se muestra el circuito electrónico y eléctrico implementado integra los módulos encargados de la adquisición de señales, procesamiento de datos, alimentación y control del sistema de detección de fugas de agua. La unidad principal de procesamiento está conformada por el microcontrolador ESP32, encargado de recibir las señales provenientes de los sensores de flujo YF-S201 y del sensor de presión, realizar el procesamiento de la información y ejecutar el algoritmo de detección de fugas.

La etapa eléctrica está compuesta por el sistema de alimentación y los elementos de control

necesarios para la operación del prototipo, incluyendo el módulo bidireccional, módulos de adaptación de señal, relé de accionamiento y electroválvula. La integración de estos componentes permite el funcionamiento coordinado del sistema, garantizando la adquisición de datos hidráulicos y la respuesta automática ante la detección de una posible fuga.

### **3.4.3 Unidad de Procesamiento: ESP32**

En el sistema propuesto, el microcontrolador ESP32 constituye la unidad encargada de la adquisición y transmisión de datos dentro de la red de detección de fugas de agua, coordinando la lectura de sensores y el envío de información hacia el sistema de procesamiento.

Durante la implementación, el ESP32 fue configurado para recibir las señales de los sensores de flujo YF-S201, los cuales generan pulsos digitales proporcionales al caudal circulante en cada ramal de la red. Asimismo, se integró el sensor de presión HK3025, cuya señal analógica es acondicionada previamente y leída mediante el convertidor analógico-digital del microcontrolador.

A partir de estas señales, el ESP32 realiza el cálculo del caudal en cada punto de medición a partir de la frecuencia de pulsos generada por los sensores de flujo. Posteriormente, estos datos son transmitidos hacia el servidor mediante comunicación Wi-Fi para su procesamiento.

El cálculo del coeficiente de distribución  $\alpha$ , así como la estimación del caudal de fuga y la lógica de detección de anomalías, se realizan en el servidor, donde se ejecutan algoritmos de procesamiento y filtrado digital que permiten mejorar la precisión del sistema y reducir falsas detecciones. En este contexto, se considera condición de fuga cuando  $\alpha < 0,93$  y el caudal estimado de fuga supera los 0.14 L/min.

En cuanto al control del sistema, la activación de la válvula solenoide se realiza a partir de una orden generada desde el servidor o la interfaz de supervisión. Dicha orden es transmitida al ESP32 mediante la red Wi-Fi, el cual ejecuta la acción activando una salida digital conectada al sistema de accionamiento de la válvula.

De este modo, el ESP32 actúa como elemento ejecutor dentro del sistema, permitiendo interrumpir el suministro de agua cuando se detecta o confirma una fuga.

Finalmente, el microcontrolador establece la comunicación con el sistema de monitoreo a

través de una red Wi-Fi, transmitiendo las variables de operación para su visualización en la interfaz gráfica desarrollada.

Esta distribución de funciones permite optimizar el desempeño del sistema, delegando la adquisición de datos al microcontrolador y centralizando el procesamiento avanzado en el servidor.

A modo de respaldo técnico, se realizó una comparación con otros microcontroladores que también ofrecen conectividad Wi-Fi y podrían emplearse en aplicaciones similares. Los resultados de esta evaluación se sintetizan en la Tabla 3.

**Tabla 3**

Comparación entre microcontroladores con conectividad Wi-Fi.

| Microcontrolador                   | ESP32                                                                                               | Raspberry Pi Pico W                                                                                 | ESP32-S3                                                                                                                         |
|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Arquitectura                       | Tensilica LX6 dual core                                                                             | ARM Cortex-M0+ single core                                                                          | Xtensa LX7 dual core                                                                                                             |
| Frecuencia de reloj                | 240 MHz                                                                                             | 133 MHz                                                                                             | 240 MHz                                                                                                                          |
| Memoria RAM                        | 520 KB                                                                                              | 264 KB                                                                                              | 512 KB                                                                                                                           |
| Memoria Flash                      | 4 MB (típico)                                                                                       | 2 MB                                                                                                | 8 MB (típico)                                                                                                                    |
| Conectividad                       | Wi-Fi 2.4 GHz, Bluetooth                                                                            | Wi-Fi 2.4 GHz                                                                                       | Wi-Fi 2.4 GHz, Bluetooth LE                                                                                                      |
| Consumo energético                 | Medio                                                                                               | Bajo                                                                                                | Medio-alto                                                                                                                       |
| GPIO disponibles                   | 34                                                                                                  | 26                                                                                                  | 45                                                                                                                               |
| Costo aproximado                   | Bajo                                                                                                | Bajo                                                                                                | Medio                                                                                                                            |
| Adecuado para                      | Sistemas IoT y control embebido                                                                     | Prototipos básicos con Wi-Fi                                                                        | Aplicaciones con IA o procesamiento avanzado                                                                                     |
| Estabilidad de librerías y soporte | Más años de soporte, librerías maduras, amplia documentación y alta compatibilidad con Arduino IDE. | Compatibilidad aceptable, pero con menor variedad de librerías y ejemplos en comparación con ESP32. | Mayor potencia, pero puede presentar incompatibilidades con librerías antiguas, especialmente en Wi-Fi, ADC y sensores de flujo. |

**Fuente:** Elaboración propia.

A partir de la comparación realizada se observa que el ESP32 ofrece el equilibrio más favorable entre capacidad de procesamiento, conectividad inalámbrica, disponibilidad de memoria y costo. Aunque el Raspberry Pi Pico W representa una alternativa económica con buen desempeño básico y el ESP32-S3 integra características avanzadas orientadas a aplicaciones de mayor complejidad, el ESP32 presenta el mejor balance entre rendimiento y eficiencia para sistemas de monitoreo domiciliario. Estas características lo convierten en la

opción más adecuada para el desarrollo del sistema de detección de fugas de agua propuesto.

### **Figura 9**

Microcontrolador ESP32



Fuente: Espressif Systems (2023).

#### **3.4.4 Módulo de Adquisición de Datos**

El módulo de adquisición de datos representa el componente físico encargado de recolectar las variables hidráulicas fundamentales de la red domiciliaria. En este proyecto, se monitorean dos parámetros principales: el caudal de agua en distintas secciones de la red y la presión interna del fluido. Para ello, se ha integrado un conjunto de sensores compuesto por el sensor de flujo YF-S201 y el sensor de presión HK3025 de 5.0 MPa, los cuales permiten obtener mediciones precisas y en tiempo real.

##### **– Sensores de Flujo YF-S201:**

El YF-S201 es un sensor de caudal de tipo rotativo que funciona mediante el principio de detección magnética. Internamente posee una turbina plástica que gira al paso del agua. Esta turbina tiene un pequeño imán adherido a una de sus aspas, el cual al rotar genera un campo magnético alternante. El cambio de este campo es detectado por un sensor Hall incorporado, el cual produce una señal de salida en forma de pulsos digitales.

Cada pulso representa una cantidad fija de volumen de agua que ha atravesado el sensor, por lo que la frecuencia de los pulsos está directamente relacionada con el caudal instantáneo.

Esta frecuencia se puede convertir a litros por minuto (L/min) mediante una constante de calibración, proporcionada por el fabricante o determinada experimentalmente. El sensor se conecta a una entrada digital del microcontrolador, donde se contabilizan los pulsos a través de una interrupción, garantizando una lectura precisa incluso en condiciones de flujo rápido o variable.

El sensor YF-S201 es una opción muy práctica porque se conecta con facilidad a sistemas electrónicos, tiene un costo accesible y ofrece buena resistencia mecánica. Estas características lo convierten en un componente adecuado para aplicaciones domésticas de medición de caudal. A continuación se presenta un cuadro comparativo con los demás sensores empleados en sistemas de detección de fugas.

**Tabla 4**

Comparación de sensores de flujo.

| Característica                  | YF-S201                        | YF-S401                | FS300A                     | Sensor ultrasónico        |
|---------------------------------|--------------------------------|------------------------|----------------------------|---------------------------|
| Costo                           | Bajo (muy accesible)           | Medio                  | Medio                      | Alto                      |
| Facilidad de integración        | Muy alta; compatible con ESP32 | Alta                   | Media                      | Requiere módulo adicional |
| Consumo energético              | Muy bajo                       | Bajo                   | Bajo                       | Medio                     |
| Instalación                     | Simple                         | Requiere mejor sellado | Tuberías de mayor diámetro | Compleja                  |
| Rango útil                      | Ideal (1–30 L/min)             | Mayor                  | Muy alto                   | Variable                  |
| Mantenimiento                   | Bajo                           | Bajo-medio             | Medio                      | Muy bajo                  |
| Sensibilidad a impurezas        | Aceptable                      | Baja                   | Alta                       | Muy baja                  |
| Precisión en detección de fugas | Adecuada                       | Adecuada               | Baja en caudales pequeños  | Muy alta (alto costo)     |
| Disponibilidad                  | Muy alta                       | Media                  | Media                      | Baja                      |
| Relación costo–beneficio        | Muy favorable                  | Moderada               | Baja                       | Baja                      |

**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.4.5 Adaptación de niveles lógicos entre el sensor de flujo y el microcontrolador

En la implementación final del sistema, la adaptación de niveles lógicos entre el sensor de flujo YF-S201 y el microcontrolador ESP32 se realiza mediante un módulo convertidor bidireccional de niveles lógicos.

Este módulo permite la interconexión segura entre dispositivos que operan a diferentes niveles de tensión, específicamente entre los 5 V correspondientes a la salida del sensor y los 3.3 V requeridos por las entradas GPIO del ESP32. Su funcionamiento se basa en una arquitectura que emplea transistores MOSFET de canal N junto con resistencias de polarización, lo que permite una transferencia adecuada de señales digitales entre ambos dominios de voltaje.

A diferencia del uso de un divisor resistivo, el convertidor bidireccional conserva la integridad del tren de pulsos generado por el sensor, evitando distorsiones en los flancos de señal y garantizando una detección más precisa de la frecuencia de pulsos. Esto resulta fundamental en el sistema propuesto, ya que el cálculo del caudal depende directamente del conteo exacto de dichos pulsos.

Cabe mencionar que, en una etapa preliminar del diseño, se evaluó el uso de un divisor resistivo para la adaptación de niveles; sin embargo, esta solución fue descartada debido a posibles pérdidas de integridad en la señal, optándose finalmente por el uso de un convertidor bidireccional por su mayor robustez y confiabilidad.

### **3.5 Sensores del sistema**

#### **3.5.1 Sensor de Flujo YF-S201**

El modelo YF-S201 corresponde a un sensor de tipo electromecánico que incorpora un rotor con un imán, cuyo movimiento es inducido por el paso del fluido. La rotación del rotor genera una serie de pulsos eléctricos mediante un sensor Hall incorporado, permitiendo estimar el caudal volumétrico en función de la frecuencia de estos pulsos.

Desde el punto de vista técnico, este sensor ofrece una solución de bajo costo y fácil integración en sistemas embebidos, como aquellos basados en el microcontrolador ESP32. Su señal de salida, de naturaleza digital, es susceptible de ser procesada directamente mediante interrupciones o contadores internos del microcontrolador. Parámetros operativos relevantes:

- Margen de flujo operativo: 1 a 30 litros por minuto
- Voltaje de alimentación: entre 5 y 18 voltios
- Tipo de señal: tren de pulsos proporcional al caudal

- Errores típicos de medición:  $\pm 10\%$  en condiciones nominales

### 3.5.2 Sensor de Presión HK3025 5.0MPa

El sensor de presión HK3025 es un componente electrónico diseñado para medir la presión en medios líquidos o gaseosos. Es un sensor de tipo industrial, capaz de operar dentro de un rango de hasta 5.0 megapascals (MPa), lo que lo hace adecuado para aplicaciones que requieren monitoreo de alta presión, como sistemas hidráulicos, neumáticos y redes de agua presurizada.

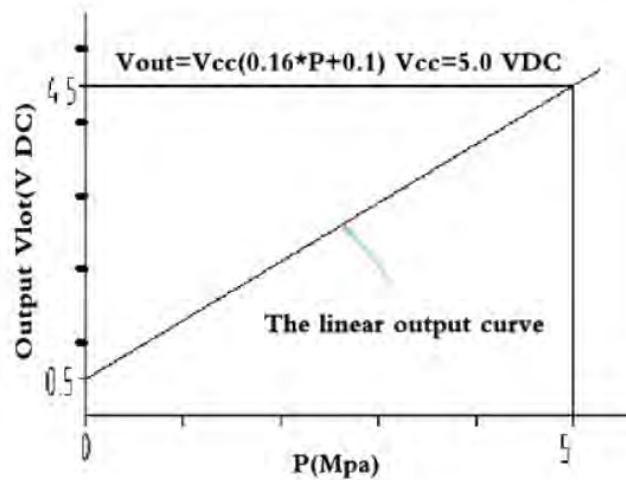
Este dispositivo funciona mediante el principio piezorresistivo, que consiste en detectar los cambios de resistencia eléctrica generados por la deformación de una membrana interna cuando se le aplica presión. Estos cambios son transformados en una señal de salida analógica, que puede interpretarse mediante un microcontrolador u otro sistema de adquisición de datos. A continuación, se detallan las principales especificaciones técnicas del modelo HK3025.

- **Rango de medición:** 0 a 5,0 MPa
- **Salida analógica:** típicamente de 0,5 a 4,5 V DC
- **Voltaje de alimentación:** típicamente 5 V DC
- **Precisión:**  $\pm 0,5$
- **Conexión mecánica:** Rosca G1/4 o similar, comúnmente usada en sistemas de tuberías
- **Material de fabricación:** Acero inoxidable, lo cual proporciona resistencia a la corrosión y durabilidad
- **Rango térmico de funcionamiento:** aproximadamente de  $-40,^{\circ}\text{C}$  a  $125,^{\circ}\text{C}$

La relación entre la presión aplicada y el voltaje de salida del sensor es lineal dentro de su rango de operación. De acuerdo con la información proporcionada por el fabricante, el sensor entrega una señal analógica comprendida entre 0.5 V y 4.5 V para un rango de presión de 0 MPa a 5 MPa.

**Figura 10**

Curva de transferencia del sensor de presión HK3025.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 10 muestra la curva de transferencia del sensor HK3025. A partir de esta característica se obtiene la ecuación que relaciona el voltaje de salida con la presión medida:

$$V_{out} = 0,8P + 0,5 \quad (1)$$

donde:

- $V_{out}$  es el voltaje de salida del sensor (V).
- $P$  es la presión medida (MPa).

Despejando la presión se obtiene:

$$P = \frac{V_{out} - 0,5}{0,8} \quad (2)$$

Esta ecuación fue implementada en el microcontrolador ESP32 para convertir la señal analógica proporcionada por el sensor en valores de presión utilizados por el sistema de monitoreo y detección de fugas.

### 3.6 Modelo matemático para la detección de fugas

#### 3.6.1 Análisis del Coeficiente de Distribución ( $\alpha$ )

El coeficiente de distribución, representado por la letra griega  $\alpha$ , es un parámetro sin dimensiones utilizado para evaluar el equilibrio hidráulico entre el flujo principal y los flujos secundarios de un sistema de conducción de agua. Este indicador permite determinar si la cantidad de caudal que ingresa al sistema coincide con la cantidad que se reparte hacia las diferentes derivaciones.

Matemáticamente, se expresa mediante la relación:

$$\alpha = \frac{F_L + F_T}{F_P}$$

donde:

- $F_L$  corresponde al flujo registrado en la línea de lavandería.
- $F_T$  corresponde al flujo registrado en la línea del tanque.
- $F_P$  indica el flujo total o principal de entrada al sistema.

Cuando el sistema opera de manera estable, el valor de  $\alpha$  debe aproximarse a la unidad, ya que idealmente el flujo que ingresa debería ser igual a la suma de los caudales que se distribuyen. En la práctica, pequeñas desviaciones son normales debido a pérdidas menores, variaciones de presión o errores instantáneos en la medición.

El rango de estabilidad adoptado en esta investigación fue de  $0,93 \leq \alpha \leq 1,20$ . Durante las pruebas experimentales realizadas, el coeficiente  $\alpha$  se calculó a partir de las mediciones simultáneas de los tres sensores de flujo conectados al sistema electrónico de detección. Tras aplicar un proceso de filtrado y exclusión de lecturas anómalas, el promedio obtenido fue  $\alpha = 0,966$  lo cual demuestra que el sistema conserva un balance hidráulico estable y que la adquisición de datos es coherente con el modelo teórico establecido.

Estos resultados confirman la sincronización correcta de los sensores, la consistencia en el procesamiento digital de señales, y la validez del algoritmo de detección de fugas, aspectos que fortalecen la fiabilidad del prototipo propuesto.

**Tabla 5**

Valores representativos del coeficiente de distribución  $\alpha$  en condición normal.

| Nº de muestra | $\alpha$ (adimensional) | Condición        |
|---------------|-------------------------|------------------|
| 1             | 1.048                   | Dentro del rango |
| 2             | 1.032                   | Dentro del rango |
| 3             | 0.971                   | Dentro del rango |
| 4             | 0.963                   | Dentro del rango |
| 5             | 1.015                   | Dentro del rango |
| 6             | 1.067                   | Dentro del rango |
| 7             | 0.982                   | Dentro del rango |
| 8             | 1.112                   | Dentro del rango |
| 9             | 1.148                   | Dentro del rango |
| 10            | 0.997                   | Dentro del rango |

Fuente: Elaboración propia.

En estas mediciones se aprecia que  $\alpha$  oscila entre 0.96 y 1.15, manteniéndose dentro del rango de estabilidad adoptado ( $0,93 \leq \alpha \leq 1,20$ ), lo que indica funcionamiento normal del sistema sin presencia de fugas.

**Figura 11**

Comportamiento del coeficiente de distribución  $\alpha$  (valores filtrados).



Fuente: Elaboración propia.

### 3.6.2 Fundamento teórico del coeficiente de distribución ( $\alpha$ )

Durante las pruebas experimentales, los valores de  $\alpha$  se mantuvieron dentro del rango de estabilidad adoptado para el sistema, comprendido entre 0.93 y 1.20. Este intervalo representa una zona operativa en la que las variaciones de presión y las pérdidas de carga se encuentran dentro de límites normales, sin generar desequilibrios significativos en la distribución del caudal. La permanencia de  $\alpha$  dentro de dicho rango indica que las mediciones de los sensores son coherentes y reflejan adecuadamente el comportamiento hidráulico de la red.

El valor promedio obtenido,  $\alpha = 1,010$  confirma que la suma de los caudales secundarios corresponde de forma prácticamente equivalente al caudal principal, lo que evidencia un reparto volumétrico estable y sin indicios de fuga. Las pequeñas oscilaciones registradas pueden atribuirse a variaciones locales del flujo o a la resolución propia de los sensores YF-S201, sin que estas afecten la tendencia general de equilibrio hidráulico observada.

Este resultado respalda la consistencia del modelo teórico empleado y demuestra que el sistema electrónico de detección opera correctamente bajo condiciones reales de funcionamiento. Asimismo, la estabilidad de los valores de  $\alpha$  confirma la efectividad del filtrado digital aplicado, ya que el procesamiento de datos reduce el impacto de variaciones espurias sin modificar la respuesta física del proceso.

En síntesis, el análisis del coeficiente de distribución  $\alpha$  permite verificar que el sistema mantiene un equilibrio hidráulico estable entre los caudales principales y secundarios, garantizando una detección confiable de fugas mediante relaciones de flujo consistentes y verificables.

A modo de ejemplo, en una de las pruebas experimentales realizadas se registraron los siguientes valores de caudal medidos por los sensores YF-S201:

| Sensor               | Descripción      | Símbolo | Valor (L/min) |
|----------------------|------------------|---------|---------------|
| YF-S201 (principal)  | Línea de ingreso | $F_P$   | 4.20          |
| YF-S201 (lavandería) | Derivación 1     | $F_L$   | 2.10          |
| YF-S201 (tanque)     | Derivación 2     | $F_T$   | 2.00          |

Aplicando la ecuación (4.1), el coeficiente de distribución se determina como:

$$\alpha = \frac{F_L + F_T}{F_P} = \frac{2,10 + 2,00}{4,20} = 0,976$$

El valor obtenido de  $\alpha = 0,976$  se encuentra dentro del rango de equilibrio hidráulico establecido ( $0,93 \leq \alpha \leq 1,20$ ), lo cual indica que el sistema opera de manera estable y que no se detecta pérdida significativa de caudal. Este resultado evidencia que el cálculo del coeficiente  $\alpha$  no es meramente teórico, sino que proviene de mediciones experimentales reales obtenidas por el prototipo de detección de fugas desarrollado.

**Tabla 6**

Variación del coeficiente  $\alpha$  y del caudal de fuga estimado según la condición de operación del sistema.

| Prueba | Condición | $F_P$ (L/min) | $F_L$ (L/min) | $F_T$ (L/min) | $\alpha$ | Fuga (L/min) |
|--------|-----------|---------------|---------------|---------------|----------|--------------|
| 1      | Normal    | 9.62          | 4.85          | 4.70          | 1.008    | 0.07         |
| 2      | Normal    | 9.58          | 4.90          | 4.60          | 0.993    | 0.08         |
| 3      | Normal    | 9.65          | 4.95          | 4.75          | 1.012    | 0.05         |
| 4      | Normal    | 9.60          | 4.80          | 4.90          | 1.020    | 0.10         |
| 5      | Normal    | 9.55          | 4.85          | 4.65          | 0.998    | 0.05         |
| 6      | Umbral    | 9.60          | 4.45          | 4.47          | 0.9299   | 0.67         |
| 7      | Fuga      | 9.60          | 4.20          | 3.90          | 0.833    | 1.50         |
| 8      | Fuga      | 9.55          | 4.10          | 4.00          | 0.851    | 1.45         |
| 9      | Fuga      | 9.62          | 4.00          | 3.85          | 0.818    | 1.77         |

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Tabla 6 se observa que, durante el funcionamiento normal del sistema los valores del coeficiente de distribución  $\alpha$  se mantuvieron dentro del rango de equilibrio hidráulico definido experimentalmente ( $0,93 \leq \alpha \leq 1,008$ ). Este comportamiento evidencia una adecuada correspondencia entre el caudal principal y la suma de los caudales secundarios, lo que confirma que el sistema opera de manera estable y sin pérdidas relevantes de agua en condiciones normales de servicio.

En estas mismas condiciones, el caudal de fuga estimado se mantiene por debajo del umbral mínimo de detección confiable de 0.14 L/min, valor que se asocia principalmente a

fluctuaciones propias del régimen de flujo y a la resolución de los sensores empleados, sin representar una fuga real en la red.

Asimismo, el cuadro muestra un estado próximo al límite inferior de estabilidad, representado por un valor de  $\alpha = 0,9299$  en el cual el caudal de fuga estimado alcanza aproximadamente 0.67 L/min. Este resultado pone en evidencia la transición entre la operación normal y una condición incipiente de fuga, lo que respalda la selección del umbral de  $\alpha = 0,93$  como criterio de decisión para la detección confiable de pérdidas de caudal.

Por otro lado, cuando se introduce una fuga controlada, el coeficiente  $\alpha$  desciende a valores comprendidos entre 0.81 y 0.85, situándose claramente fuera del rango de equilibrio hidráulico. De forma simultánea, el caudal de fuga estimado se incrementa de manera significativa, alcanzando valores entre 1.45 y 1.77 L/min, los cuales superan ampliamente el umbral mínimo de detección establecido.

Este comportamiento valida la respuesta del algoritmo de detección implementado, el cual considera una fuga confirmada únicamente cuando se presenta una disminución del coeficiente de distribución  $\alpha$  por debajo del umbral de 0,93 acompañada de un incremento del caudal de fuga estimado por encima de 0.14 L/min. La aplicación conjunta de ambos criterios permite una detección robusta y reduce la probabilidad de falsas alarmas durante la operación normal del sistema.

### **3.6.3 Interpretación física del coeficiente de distribución**

Desde el punto de vista físico, el coeficiente de distribución  $\alpha$  representa el grado de equilibrio hidráulico en la red de distribución de agua. Este coeficiente se fundamenta en el principio de conservación del flujo, el cual establece que, en ausencia de pérdidas, el caudal de entrada a un sistema debe ser igual a la suma de los caudales de salida.

En condiciones normales de operación, donde no existen fugas, el caudal que circula por la tubería principal es distribuido completamente hacia los ramales de consumo, cumpliéndose la relación:

$$Q_{\text{principal}} \approx Q_{\text{lavandería}} + Q_{\text{tanque}}$$

En este caso, el coeficiente  $\alpha$  toma valores cercanos a la unidad, lo que indica un estado de equilibrio hidráulico en el sistema.

Por el contrario, cuando se presenta una fuga, parte del caudal de entrada no es contabilizado en los puntos de salida, generándose un desbalance en el sistema. Esta pérdida de flujo provoca que el valor de  $\alpha$  disminuya, reflejando la existencia de una pérdida de masa dentro de la red hidráulica.

Por tanto, el coeficiente  $\alpha$  no solo constituye una relación matemática, sino que actúa como un indicador físico del estado del sistema, permitiendo identificar desviaciones respecto al comportamiento ideal y facilitando la detección de fugas en condiciones reales de operación.

### 3.6.4 Presión como variable de referencia.

La presión registrada por el sensor se utiliza únicamente como **dato de apoyo**, con el fin de observar las condiciones hidráulicas del sistema, pero no interviene directamente en el proceso de detección de fugas. Este procedimiento permite distinguir entre consumos normales y pérdidas reales de agua, logrando una detección rápida y confiable que contribuye a reducir el desperdicio en la red domiciliaria.

### 3.6.5 Análisis del balance de caudales para la detección de fugas

Para la detección de fugas, se implementó un análisis del diferencial de caudales entre las diferentes zonas de monitoreo (por ejemplo, la entrada principal y los ramales secundarios del sistema domiciliario). La diferencia de caudales entre sensores permite identificar pérdidas de agua no atribuibles al consumo normal. La expresión utilizada para este cálculo es:

$$\Delta Q = Q_{\text{entrada}} - (Q_{\text{ramal}_1} + Q_{\text{ramal}_2} + \dots + Q_{\text{ramal}_N}) \quad (3)$$

Donde:

- $Q_{\text{entrada}}$  es el caudal medido en la entrada de la red domiciliaria.
- $Q_{\text{ramal}_i}$  representa el caudal medido en cada uno de los ramales de salida del sistema.

Un valor significativo de  $\Delta Q$  (diferente de cero y superior a un umbral permitido) es indicativo de la posible presencia de una fuga de agua.

### 3.6.6 Condiciones de fuga: formulación matemática

La detección de fugas se basa en el principio de conservación de la masa para el flujo de agua en una red cerrada:

$$Q_{\text{entrada}} = \sum Q_{\text{salida}} + Q_{\text{fuga}} \quad (4)$$

- $Q_{\text{entrada}}$  : caudal medido en el punto de entrada principal.
- $\sum Q_{\text{salida}}$  : suma de los caudales medidos en los puntos de consumo del sistema.
- $Q_{\text{fuga}}$  : caudal no contabilizado que se interpreta como fuga.

Por lo tanto, el caudal de fuga se puede expresar como:

$$Q_{\text{fuga}} = Q_{\text{entrada}} - \sum Q_{\text{salida}} \quad (5)$$

Donde  $\varepsilon_Q$  representa el umbral mínimo de caudal de fuga permitido por el sistema para considerar la existencia de una fuga real.

Condición de detección de fuga (umbral):

Una fuga se considera presente si:

$$Q_{\text{fuga}} > \varepsilon_Q \quad (6)$$

En el sistema implementado, el valor experimental establecido para el umbral de detección fue:

$$\varepsilon_Q = 0,14 \text{ L/min} \quad (7)$$

### 3.7 Algoritmo de Detección de Fugas

El proceso de detección se basa principalmente en el análisis de los caudales medidos en tres puntos: el flujo principal de entrada ( $Q_p$ ), el flujo hacia la lavandería ( $Q_{lav}$ ) y el flujo hacia el tanque ( $Q_{tan}$ ). La comparación entre estos valores permite identificar diferencias que indiquen pérdidas de agua dentro de la red domiciliaria.

El criterio principal utilizado es el balance de flujos, expresado como:

$$\Delta Q = Q_p - (Q_{lav} + Q_{tan})$$

Cuando el valor de  $\Delta Q$  es positivo y supera un límite determinado experimentalmente, el sistema interpreta que existe una posible fuga.

#### – Etapas del algoritmo

1. **Adquisición de datos:** El microcontrolador ESP32 realiza la lectura continua de los sensores de flujo YF-S201 instalados en la tubería principal, el ramal de lavandería y el ramal del tanque, así como del sensor de presión. Las señales de pulsos generadas por los sensores de flujo son convertidas en valores de caudal expresados en litros por minuto (L/min).
2. **Almacenamiento y sincronización de datos:** Las mediciones obtenidas no son procesadas de manera instantánea, sino que son almacenadas en estructuras tipo buffer. Este mecanismo permite acumular un conjunto de muestras y asegurar la coherencia temporal entre los distintos puntos de medición del sistema.
3. **Procesamiento digital y filtrado de señales:** Debido a la naturaleza pulsante de los sensores YF-S201 y a las fluctuaciones hidráulicas, las señales presentan variaciones rápidas. Para mejorar la estabilidad de los datos, se aplica un filtrado digital basado en el suavizado de muestras recientes, reduciendo el ruido y obteniendo valores más representativos del comportamiento real del sistema.
4. **Cálculo del coeficiente de distribución:** A partir de los valores filtrados de caudal, se

calcula el coeficiente de distribución  $\alpha$ , el cual permite evaluar el equilibrio hidráulico del sistema mediante la relación entre el caudal de salida y el caudal de entrada.

5. **Estimación del caudal de fuga:** Se realiza el balance de caudales entre la tubería principal y los ramales, obteniendo el caudal de fuga como la diferencia entre el caudal de entrada y la suma de los caudales de salida.
6. **Evaluación de condiciones de fuga:** El algoritmo evalúa de forma conjunta el coeficiente de distribución  $\alpha$ , el balance de caudales, el caudal de fuga estimado y la condición de estabilidad de las señales previamente filtradas. En condiciones de consumo, se considera una posible fuga cuando  $\alpha < 0,93$  y el caudal de fuga supera el umbral de 0,14 L/min. Posteriormente, esta condición es validada mediante un criterio de persistencia temporal antes de confirmar la presencia de una fuga real.
7. **Detección en condición de reposo:** Cuando todas las salidas del sistema se encuentran cerradas, el algoritmo activa un modo de detección en condición de reposo. En este estado, cualquier flujo residual que supere el umbral de 0,50 L/min es considerado como una posible fuga. Posteriormente, esta condición es validada mediante un criterio de persistencia temporal antes de confirmar la presencia de una fuga real, permitiendo identificar pérdidas incluso en ausencia de consumo.
8. **Validación temporal de la detección:** Para evitar falsas alarmas generadas por fluctuaciones momentáneas, la condición de fuga debe mantenerse durante un número determinado de muestras consecutivas antes de ser confirmada como una fuga real.
9. **Generación de alerta:** Una vez confirmada la fuga, el sistema envía los datos al servidor mediante comunicación WiFi y se activa una alarma sonora, además de reflejar el estado en la interfaz gráfica de monitoreo.

### 3.8 Procesamiento digital de señales

#### 3.8.1 Filtrado digital y tratamiento de señales

Con el propósito de obtener datos de caudal confiables y evitar activaciones erróneas del sistema de detección, se empleó un filtro de mediana deslizante implementado en el firmware del ESP32. Este método consiste en almacenar un conjunto de  $N$  mediciones consecutivas de caudal, ordenarlas de menor a mayor y seleccionar el valor central como resultado filtrado. De esta forma, los valores extremos o picos espurios no influyen en el valor final utilizado por el algoritmo de detección.

A diferencia de un promedio móvil, que tiende a suavizar toda la señal, la mediana preserva los cambios abruptos que realmente se producen en la red de agua, asegurando que las variaciones de caudal legítimas sean consideradas en el proceso de decisión.

El cálculo puede expresarse de manera formal como:

$$y[n] = \text{mediana} \{x[n], x[n-1], \dots, x[n-(N-1)]\} \quad (8)$$

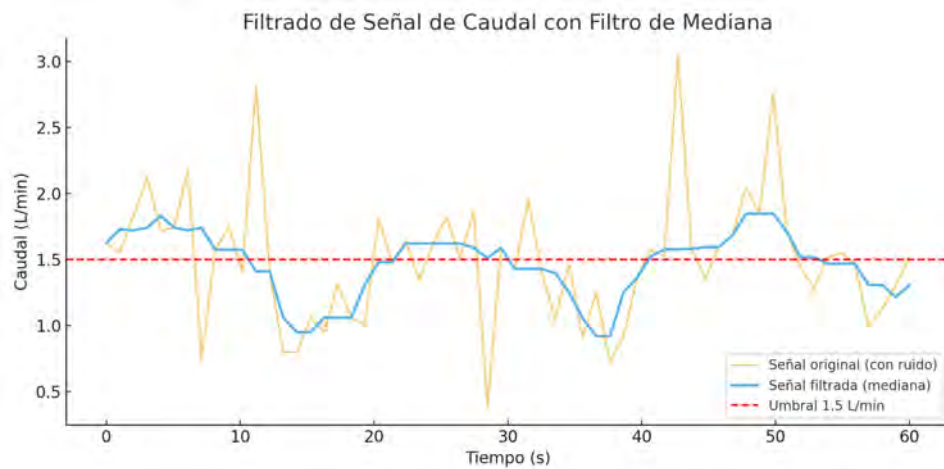
donde  $y[n]$  representa el caudal filtrado en el instante  $n$  y  $x[i]$  corresponde a las lecturas individuales adquiridas en cada ciclo de muestreo.

La utilización de este tipo de filtrado proporciona robustez frente al ruido impulsivo, mejora la estabilidad de la señal y reduce la probabilidad de generar falsas alarmas, incrementando la confiabilidad del sistema en condiciones de operación reales.

Aunque el filtro de mediana constituye la primera etapa del procesamiento digital de las señales de caudal, el algoritmo implementado incorpora posteriormente mecanismos adicionales de procesamiento, tales como la sincronización de las muestras provenientes de los diferentes sensores, el cálculo de promedios ponderados y la validación temporal de las condiciones de fuga. Estas etapas complementarias permiten mejorar la estabilidad de las mediciones, reducir la influencia de variaciones transitorias y aumentar la confiabilidad del sistema de detección de fugas en condiciones reales de operación.

**Figura 12**

Señal de caudal antes y después del filtro de mediana.



Fuente: Elaboración propia.

### 3.8.2 Sincronización y acumulación de muestras

Con el fin de garantizar la coherencia temporal entre las mediciones de los diferentes sensores de flujo, se implementa un mecanismo de acumulación de muestras para cada una de las variables del sistema.

En esta estrategia, los valores de caudal obtenidos en tiempo real no son procesados de manera individual, sino que son almacenados temporalmente en estructuras de datos. Una vez alcanzado un número mínimo de muestras, se procede a realizar el procesamiento correspondiente.

Este enfoque permite trabajar con conjuntos de datos sincronizados, asegurando que las variables analizadas correspondan a un mismo intervalo de tiempo. De esta manera, se evita la desalineación entre las mediciones de los diferentes ramales de la red hidráulica.

A continuación, se presenta un fragmento representativo del código implementado:

```
# Acumulación de muestras de flujo
flujop_sincronizado.append(flujo_principal)
flujol_sincronizado.append(flujo_lavanderia)
flujot_sincronizado.append(flujo_tanque)
# Verificación de número mínimo de muestras
```

```

if len(flujop_sincronizado) >= 4 and len(flujol_sincronizado)
>= 4 and len(flujot_sincronizado) >= 4:
    flujo_p = promedio_ponderado(flujop_sincronizado)
    flujo_l = promedio_ponderado(flujol_sincronizado)
    flujo_t = promedio_ponderado(flujot_sincronizado)
# Limpieza de buffers flujop_sincronizado.clear()
flujol_sincronizado.clear()
flujot_sincronizado.clear()

```

Como se evidencia en el fragmento de código, el sistema acumula un conjunto de muestras antes de realizar el procesamiento, lo que permite mejorar la estabilidad de los datos y reducir el efecto de variaciones instantáneas en las mediciones.

Este mecanismo constituye una etapa previa al cálculo del promedio ponderado y al análisis del coeficiente de distribución, contribuyendo significativamente a la robustez del algoritmo de detección de fugas.

### 3.8.3 Mecanismo de detección y tratamiento de eventos transitorios

Durante la operación normal de una red de distribución domiciliaria se producen variaciones instantáneas de caudal ocasionadas por la apertura y cierre de griferías, llenado de recipientes y cambios repentinos en la demanda de agua. Estas variaciones generan estados transitorios que pueden producir diferencias momentáneas entre las mediciones de los sensores sin representar necesariamente una condición real de fuga.

Con el propósito de evitar falsas alarmas, el algoritmo implementado incorpora un mecanismo de identificación y tratamiento de eventos transitorios basado en la comparación entre los caudales instantáneos y los valores filtrados obtenidos mediante procesamiento digital de señales.

La diferencia entre ambas mediciones se calcula mediante:

$$\Delta Q = |Q_{inst} - Q_{filt}| \quad (9)$$

donde:

- $Q_{inst}$ : caudal instantáneo medido por el sensor.
- $Q_{filt}$ : caudal obtenido después del proceso de filtrado digital.
- $\Delta Q$ : diferencia absoluta entre ambas mediciones.

Cuando la variación del caudal supera el valor establecido experimentalmente,

$$\Delta Q \geq 1,0 \text{ L/min} \quad (10)$$

el sistema considera que se encuentra en una condición transitoria. En consecuencia, el algoritmo suspende temporalmente la evaluación de fugas durante aproximadamente 3.5 segundos, permitiendo que las variables hidráulicas alcancen nuevamente condiciones estables antes de realizar un nuevo análisis.

Asimismo, se implementó una condición especial para detectar el cierre repentino de los ramales de consumo. Esta situación se identifica cuando existe flujo en la línea principal mientras que los ramales monitoreados presentan valores cercanos a cero:

$$Q_{principal} > 0,05 \text{ L/min} \quad (11)$$

$$Q_{lavandera} \leq 0,01 \text{ L/min} \quad (12)$$

$$Q_{tanque} \leq 0,01 \text{ L/min} \quad (13)$$

Bajo estas condiciones, el sistema activa un periodo de bloqueo temporal de aproximadamente 4.3 segundos antes de reanudar el proceso de detección.

Una vez finalizado el estado transitorio, el algoritmo continúa con el cálculo del coeficiente de distribución de caudales ( $\alpha$ ), la estimación del caudal de fuga y la evaluación de los criterios de detección establecidos. Este procedimiento permite diferenciar perturbaciones momentáneas del sistema hidráulico de condiciones reales de fuga, mejorando la confiabilidad del sistema y reduciendo significativamente la generación de falsas alarmas.

### 3.8.4 Implementación del temporizador mediante la librería Ticker en el ESP32

En el sistema desarrollado para la detección de fugas de agua, la adquisición de los pulsos generados por el sensor de flujo YF-S201 se realiza mediante un temporizador periódico implementado utilizando la librería Ticker del microcontrolador ESP32. Este enfoque permite ejecutar una rutina de muestreo de manera automática en intervalos de tiempo constantes, garantizando una lectura continua y controlada de la señal del sensor.

En la implementación, el temporizador se configura con un periodo de 1 ms, lo que permite evaluar el estado lógico del pin conectado al sensor con alta resolución temporal:

$$T = 1 \text{ ms} \quad (14)$$

donde  $T$  representa el periodo de ejecución del temporizador.

Dentro de la rutina asociada al temporizador, se realiza la lectura del estado del pin digital correspondiente al sensor de flujo. Mediante una lógica de habilitación, se detectan las transiciones de la señal, incrementando un contador únicamente cuando se identifica un pulso válido. Este procedimiento permite evitar múltiples conteos durante un mismo pulso y asegura la correcta cuantificación del flujo.

El uso del temporizador permite implementar un esquema de muestreo periódico en el cual la detección de pulsos se realiza mediante software, en lugar de utilizar interrupciones externas por hardware. Esta estrategia resulta adecuada para el sistema desarrollado, ya que proporciona un control preciso del tiempo de muestreo y una mayor estabilidad en la adquisición de datos.

Los pulsos detectados son acumulados durante intervalos de un segundo, tras los cuales se calcula el caudal instantáneo. Posteriormente, este valor es procesado y transmitido mediante comunicación TCP al sistema de monitoreo en Python, donde se emplea en el algoritmo de detección de fugas.

De esta manera, el uso de la librería Ticker constituye un elemento fundamental en la arquitectura del sistema, permitiendo integrar la adquisición de datos del sensor de flujo con el procesamiento en tiempo real requerido para la identificación de fugas en la red hidráulica.

### 3.8.5 Lectura del sensor de presión mediante ADC

El sensor de presión empleado en el sistema es el modelo HK3025, con un rango de medición de 0 a 5.0 MPa. Este dispositivo entrega una señal analógica de voltaje proporcional a la presión aplicada, cuyo rango típico de salida se encuentra entre 0.5 V y 4.5 V.

Para la adquisición de esta señal, se utiliza uno de los canales de entrada analógica del microcontrolador ESP32, el cual incorpora un convertidor analógico-digital (ADC). Este convertidor permite transformar la señal analógica en un valor digital discreto, facilitando su procesamiento dentro del sistema.

En la implementación desarrollada, la conversión de la señal analógica se realiza mediante una relación de escala ajustada experimentalmente, obteniendo el voltaje de salida a partir de la lectura del ADC:

$$V_{out} = \text{Lectura}_{ADC} \times 0,0020 \quad (15)$$

donde:

- $\text{Lectura}_{ADC}$ : valor digital obtenido del conversor analógico-digital.
- 0,0020: factor de conversión determinado experimentalmente.

A partir del voltaje obtenido, se calcula la presión mediante una relación lineal, considerando el comportamiento del sensor:

$$P = \frac{V_{out} - 0,5}{0,8} \quad (16)$$

donde:

- $P$ : presión medida en MPa.
- $V_{out}$ : voltaje de salida del sensor.

El sistema realiza esta conversión en intervalos de un segundo, permitiendo obtener el valor instantáneo de la presión en la red hidráulica. Esta frecuencia de muestreo resulta adecuada para el monitoreo de variaciones graduales en sistemas de distribución de agua.

Este método de adquisición permite integrar eficientemente el sensor de presión dentro del sistema, facilitando el análisis de datos y su posterior uso en el algoritmo de detección de fugas.

### **3.9 Determinación de umbrales de detección**

#### **3.9.1 Recomendación para el Umbral**

Con base en el gráfico obtenido en condición de reposo, donde todos los puntos de consumo se encuentran cerrados, se observa que los caudales medidos en el flujo principal, la lavandería y el tanque se mantienen en 0 L/min durante todo el intervalo de medición, lo que confirma la ausencia de circulación de agua en la red.

Este comportamiento establece la condición de referencia del sistema en estado estacionario sin consumo, en la cual no debe existir flujo en ninguna de las ramas de la instalación. A partir de esta condición, cualquier incremento en el caudal puede ser interpretado como una posible anomalía; sin embargo, el sistema no considera una fuga basándose en una única medición instantánea.

Para garantizar una detección confiable, se implementa un criterio de persistencia, mediante el cual la condición de flujo debe mantenerse durante al menos 15 ciclos consecutivos de adquisición de datos para ser considerada como una posible fuga. Este enfoque permite descartar variaciones momentáneas o perturbaciones del sistema, asegurando que únicamente se detecten condiciones de flujo sostenido en el tiempo.

**Figura 13**

Comportamiento de los caudales en condición de reposo.



Fuente: Elaboración propia.

### 3.9.2 Determinación del Umbral de Detección en Reposo

Con el sistema en estado de reposo (todas las válvulas cerradas), se realizaron pruebas controladas introduciendo caudales pequeños de agua. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 7.

**Tabla 7**

Valores de caudal en los que se activó la detección en pruebas en condición de reposo.

| Prueba | Caudal detectado (L/min) |
|--------|--------------------------|
| 1      | 0.45                     |
| 2      | 0.46                     |
| 3      | 0.48                     |
| 4      | 0.50                     |
| 5      | 0.51                     |
| 6      | 0.51                     |
| 7      | 0.52                     |
| 8      | 0.55                     |

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 7 se muestran los valores de caudal en los que se activó la detección durante las pruebas en condición de reposo, se realizaron múltiples pruebas experimentales introduciendo pequeñas fugas de agua en el sistema. La magnitud de cada fuga fue verificada mediante una jarra graduada, recolectando el volumen de agua durante un intervalo de un minuto y calculando el caudal mediante la relación volumen-tiempo. Los valores obtenidos en las diferentes pruebas permitieron establecer el rango de activación del sistema mostrado en la Tabla 7. Finalmente, a partir del promedio de los caudales registrados se obtuvo un valor aproximado de 0.50 L/min, el cual fue adoptado como umbral de detección en condición de reposo.

Se observa que la detección ocurre en un rango de caudales comprendido entre 0.45 L/min y 0.55 L/min, con un valor promedio aproximado de 0.50 L/min. Por esta razón, se estableció el umbral de activación en 0.50 L/min, con el propósito de minimizar falsas alarmas y garantizar la detección confiable de fugas reales.

### 3.9.3 Determinación del umbral de activación durante consumo normal

Establecer un umbral estadístico  $U_{\Delta}$  que permita diferenciar variaciones normales de consumo de agua respecto a incrementos anormales del caudal que indiquen una fuga. Para cada instante de medición se calcula:

$$\Delta_i = Q_{P,i} - (Q_{L,i} + Q_{T,i}) \quad (17)$$

Si no existe fuga, se espera que  $\Delta_i$  sea cercano a cero.

### Datos experimentales

La determinación del umbral de detección se realizó a partir del análisis de 50 registros experimentales obtenidos en condiciones de operación normal, sin presencia de fugas. Estos registros fueron adquiridos durante diferentes intervalos de medición con el propósito de representar la variabilidad natural del sistema en condiciones normales de funcionamiento. Durante las mediciones, la diferencia de caudales  $\Delta Q$  presentó pequeñas variaciones positivas y negativas atribuibles a los desfases temporales entre las mediciones de los sensores, así

como a las fluctuaciones inherentes al proceso de adquisición de datos. El empleo de 50 registros permitió obtener una estimación estadística más representativa de la media y la desviación estándar, proporcionando una base más confiable para el establecimiento del umbral de detección de fugas.

### **Cálculo estadístico**

Sea  $n = 50$  el número de muestras. La media muestral se calcula como:

$$\mu_{\Delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i \quad (18)$$

Sustituyendo los valores experimentales, se obtiene:

$$\mu_{\Delta} = 0,0363 \text{ L/min} \quad (19)$$

La desviación estándar muestral se calcula mediante:

$$s_{\Delta} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta_i - \mu_{\Delta})^2} \quad (20)$$

$$s_{\Delta} = 0,0514 \text{ L/min} \quad (21)$$

### **Determinación del umbral**

El umbral se define estadísticamente como:

$$U_{\Delta} = \mu_{\Delta} + k s_{\Delta} \quad (22)$$

Para este sistema se adopta  $k = 2$ , obteniéndose:

$$U_{\Delta} = 0,1390 \text{ L/min} \quad (23)$$

Redondeando:

$$U_{\Delta} = 0,14 \text{ L/min} \quad (24)$$

Adicionalmente, el umbral obtenido de (0.14 L/min) resulta cercano al caudal equivalente generado por un único pulso registrado por los sensores YF-S201 durante el intervalo de medición utilizado por el sistema. Considerando la constante de calibración adoptada, dicho valor corresponde aproximadamente a (0.133 L/min), lo que indica que el umbral seleccionado se encuentra próximo a la resolución mínima de detección del sensor. Esto permite discriminar entre variaciones normales de medición y eventos asociados a una posible fuga.

### 3.9.4 Caracterización del sensor en condición de reposo

En condiciones ideales, cuando todas las válvulas de la red están cerradas, el caudal esperado debería ser:

$$Q_{\text{reposo, ideal}} = 0 \text{ L/min}$$

Sin embargo, experimentalmente se observó que el sensor YF-S201 comienza a generar pulsos detectables desde aproximadamente 0.50 L/min.

El valor promedio obtenido fue de 0.50 L/min, el cual representa el límite inferior de detección del sensor en condiciones reales.

### 3.9.5 Modelo de detección de fugas

El caudal de fuga se estima mediante:

$$Q_{\text{fuga}} = |Q_p - Q_l - Q_t|$$

Para estabilizar la medición se aplica un promedio ponderado exponencial:

$$\bar{Q}_{\text{fuga}} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i Q_{\text{fuga},i}}{\sum_{i=1}^n w_i}, \quad w_i = (0,5)^i$$

La condición de activación del sistema se define como:

$$\overline{Q}_{\text{fuga}} \geq 0,14 \text{ L/min}$$

## **Conclusión**

Los resultados experimentales permiten establecer dos aspectos fundamentales del sistema. En condición de reposo, el sensor YF-S201 presenta un límite inferior de detección cercano a 0.50 L/min, asociado a sus características físicas y condiciones de instalación.

Por otro lado, durante condiciones de operación con consumo de agua, el sistema emplea un umbral de 0.14 L/min a nivel del algoritmo, determinado mediante análisis estadístico y procesamiento digital de señales. Esta diferenciación permite detectar fugas pequeñas de manera confiable, evitando falsas alarmas asociadas a las limitaciones del sensor.

### **3.10 Implementación del Sensor YF-S201**

Para la implementación del sistema de monitoreo de caudal se empleó el sensor de flujo YF-S201, seleccionado por su bajo costo, facilidad de integración y confiabilidad en aplicaciones domésticas. El sensor fue instalado en serie con la tubería principal del sistema de distribución de agua, de manera que todo el caudal circulante atravesase su cuerpo, asegurando una medición representativa del flujo total.

Desde el punto de vista eléctrico, la señal de salida del sensor fue acondicionada conforme la subsección Acondicionamiento eléctrico y adaptación de niveles para el sensor YF-S201. Este acondicionamiento permitió compatibilizar los niveles de tensión del sensor con las entradas digitales del ESP32, garantizando una lectura segura y estable del tren de pulsos generado.

#### **3.10.1 Conexión física y eléctrica**

El sensor de flujo YF-S201 cuenta con tres terminales principales: alimentación, referencia a tierra y salida de señal. Para su integración al sistema embebido, el sensor fue alimentado con una tensión de 5 V proveniente del riel de alimentación del sistema, asegurando un suministro estable durante la operación continua.

La salida de señal del sensor, correspondiente a un tren de pulsos digitales generado por

el movimiento del rotor interno, fue conectada a un pin GPIO del microcontrolador ESP32, configurado como entrada digital. La adquisición de estos pulsos se realiza mediante un esquema de muestreo periódico implementado con un temporizador basado en la librería Ticker, el cual ejecuta una rutina de lectura con un intervalo de 1 ms.

Durante este proceso, se emplea un algoritmo de detección de flancos por software que permite contabilizar de manera precisa los pulsos generados por el sensor, evitando múltiples conteos asociados a un mismo pulso. A partir del número de pulsos registrados en un intervalo de tiempo determinado, se calcula el caudal instantáneo de agua que circula por la tubería.

Debido a la diferencia entre los niveles de operación del sensor y del microcontrolador, la señal de salida fue adaptada eléctricamente conforme a los criterios de acondicionamiento de niveles descritos en la sección correspondiente del sistema. Esta adaptación garantiza la compatibilidad eléctrica y protege las entradas digitales del microcontrolador frente a posibles sobretensiones.

Desde el punto de vista físico, la conexión del sensor se realizó mediante una placa electrónica, cuidando el ruteo de la señal y la correcta referencia de tierra. Esta integración permite reducir la susceptibilidad a interferencias electromagnéticas y mejorar la estabilidad de las mediciones durante la operación del sistema.

### **3.10.2 Lectura de datos**

La medición del caudal se realizó a partir de la frecuencia de pulsos generados por el sensor YF-S201. La señal de salida del sensor fue conectada a un pin digital del microcontrolador ESP32, donde es leída de manera periódica mediante un esquema de muestreo basado en temporización.

En lugar de emplear interrupciones por hardware, el sistema implementa un temporizador utilizando la librería Ticker, el cual ejecuta una rutina de adquisición cada 1 ms. Dentro de esta rutina, se evalúa el estado lógico del pin de entrada y se aplica un algoritmo de detección de flancos por software, permitiendo identificar las transiciones válidas de la señal y contabilizar los pulsos generados por el sensor.

Para evitar múltiples conteos asociados a un mismo pulso, se emplea una lógica de

habilitación que garantiza que cada transición sea registrada una única vez. De esta manera, el contador de pulsos refleja de forma confiable la frecuencia de giro del rotor interno del sensor, la cual es proporcional al caudal del fluido.

El cálculo del caudal se realiza en intervalos de un segundo. Al finalizar cada periodo, se obtiene el número total de pulsos registrados, se reinicia el contador y se procede a calcular el caudal instantáneo mediante una constante de calibración característica del sensor, de acuerdo con la siguiente relación:

$$Q \text{ (L/min)} = \frac{N \times 60}{K}$$

donde  $N$  corresponde al número de pulsos contados durante el intervalo de medición y  $K$  representa la constante del sensor expresada en pulsos por litro. En el sistema implementado se empleó un valor de  $K = 450$ , el cual fue ajustado posteriormente mediante un proceso de calibración experimental.

Con el objetivo de mejorar la estabilidad de la señal y reducir la influencia de perturbaciones o fluctuaciones instantáneas, se implementó un filtro de mediana sobre una ventana de 11 muestras consecutivas. Este filtrado permite atenuar valores atípicos sin distorsionar la tendencia real del flujo medido.

Finalmente, los datos procesados son transmitidos mediante comunicación Wi-Fi hacia un servidor local, donde son integrados con las demás variables del sistema, tales como presión y caudales en otros puntos de la red. Esta información es posteriormente utilizada para el análisis del comportamiento hidráulico y la detección de posibles fugas.

Este enfoque de adquisición permite obtener mediciones continuas y estables del caudal, garantizando un desempeño confiable del sistema frente a variaciones reales en las condiciones de operación de la red de distribución.

### **3.10.3 Análisis de la señal de salida del sensor de flujo YF-S201**

El sensor de flujo YF-S201 corresponde a un dispositivo de naturaleza electromecánica cuyo principio de funcionamiento se basa en la detección de variaciones de campo magnético mediante efecto Hall. Internamente, el sensor incorpora un rotor con aletas que es impulsado

por el paso del fluido a través del conducto. Acoplado a este rotor se encuentra un imán permanente cuya rotación genera un campo magnético variable en el tiempo.

Este campo es detectado por un sensor de efecto Hall integrado en el dispositivo, el cual convierte dichas variaciones en una señal eléctrica digital de tipo cuadrada. Como resultado, se obtiene un tren de pulsos cuya frecuencia está directamente relacionada con la velocidad del fluido que atraviesa el sensor.

El número de pulsos generados en un intervalo de tiempo determinado es proporcional al caudal volumétrico del sistema. En términos generales, esta relación puede expresarse mediante:

$$Q = K \cdot f$$

Donde  $Q$  representa el caudal volumétrico en litros por minuto (L/min),  $f$  corresponde a la frecuencia de la señal en hercios (Hz) y  $K$  es una constante característica del sensor, la cual depende de sus condiciones de fabricación y es ajustada experimentalmente durante el proceso de calibración.

En la implementación desarrollada, la medición no se realiza directamente sobre la frecuencia, sino a partir del conteo de pulsos en intervalos de tiempo definidos. Esta estrategia permite estimar la frecuencia de manera discreta, facilitando su procesamiento digital dentro del microcontrolador ESP32.

Durante la etapa de validación, se verificó la forma de la señal de salida del sensor, observándose una onda digital de tipo cuadrada. Asimismo, se evidenció que el periodo de la señal disminuye conforme aumenta el caudal, lo cual confirma la relación directa entre la frecuencia de los pulsos y el flujo del fluido.

Este comportamiento constituye la base para el cálculo del caudal en el sistema implementado, permitiendo transformar una variable física continua en una señal digital fácilmente procesable dentro del entorno embebido.

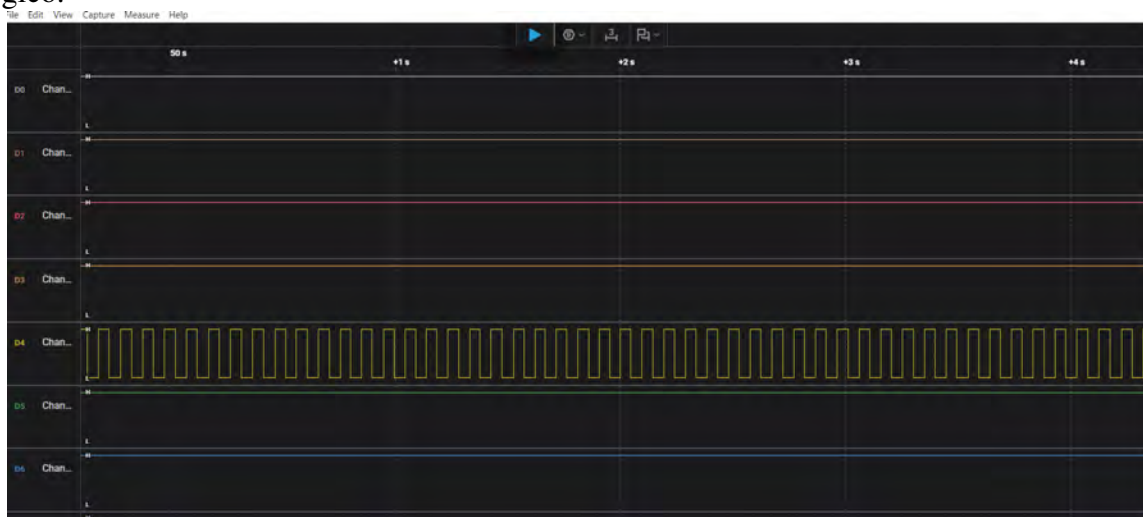
La señal de salida del sensor presenta niveles lógicos de 5 V, por lo que requiere una etapa de adaptación de niveles para su correcta interfaz con el microcontrolador ESP32, cuyas entradas operan a 3.3 V. Para ello, se emplea un módulo convertidor de nivel lógico, el cual garantiza la

integridad de la señal y la protección del sistema de adquisición.

El análisis de la forma de onda confirma que el sensor entrega una señal estable, con bajo nivel de ruido y una relación aproximadamente lineal entre la frecuencia y el flujo, lo cual es fundamental para garantizar la precisión del cálculo de caudal. Este comportamiento valida el funcionamiento del transductor y constituye la base para el proceso de calibración, donde se establece el factor de conversión que permite determinar el volumen de agua en función del número de pulsos registrados.

### Figura 14

Registro de pulsos digitales generados por el sensor de flujo YF-S201 mediante analizador lógico.



Fuente: Elaboración propia.

#### 3.10.4 Conversión de pulsos a caudal volumétrico

El sensor de flujo YF-S201 produce una señal digital que refleja el movimiento del agua en su interior. Cada giro del rotor genera una variación del campo magnético que es detectada por el sensor de efecto Hall integrado, produciendo un pulso eléctrico. De esta manera, la cantidad de pulsos generados en un intervalo de tiempo determinado se relaciona directamente con el volumen de agua que atraviesa el sensor.

En el sistema implementado, la unidad de procesamiento ESP32 registra los pulsos del sensor mediante una entrada digital, utilizando un esquema de muestreo periódico basado en un temporizador. A través de este mecanismo, se evalúa continuamente el estado lógico del

pin de entrada y se aplica un algoritmo de detección de flancos por software, el cual permite contabilizar de manera precisa cada pulso sin recurrir a interrupciones por hardware. Cada pulso detectado incrementa una variable contadora denominada contador.

El cálculo del caudal se realiza en intervalos de un segundo. Al finalizar cada periodo de medición, el valor acumulado en la variable contador es utilizado para estimar el caudal instantáneo de agua. Posteriormente, el contador se reinicia para iniciar un nuevo ciclo de medición.

La relación entre el número de pulsos detectados y el caudal volumétrico se establece mediante una proporcionalidad directa. La conversión de pulsos por segundo a litros por minuto se realiza empleando un factor de escala y una constante de calibración del sensor, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Q = \frac{N \times 60}{K}$$

Donde  $Q$  representa el caudal volumétrico en litros por minuto (L/min),  $N$  es el número de pulsos registrados durante un segundo y  $K$  es la constante de calibración del sensor, expresada en pulsos por litro.

Para el sensor YF-S201, se adoptó un valor de referencia de  $K = 450$ , el cual fue ajustado posteriormente mediante un proceso de calibración experimental. Sustituyendo este valor en la ecuación, se obtiene:

$$Q = \frac{N \times 60}{450}$$

La implementación de este cálculo dentro del microcontrolador se realiza mediante la instrucción:

```
flujo = (float)contador * 60 / 450;
```

De esta forma, la variable flujo representa el caudal instantáneo en litros por minuto, calculado a partir del número de pulsos medidos en cada intervalo de adquisición. Este valor es actualizado continuamente y transmitido al sistema de supervisión, donde es procesado junto con las demás variables hidráulicas para el análisis del comportamiento de la red.

### 3.10.5 Determinación experimental del factor de corrección de los sensores de flujo YF-S201

El sistema desarrollado emplea tres sensores de flujo YF-S201, instalados en la línea de la tubería principal, el ramal de lavandería y el ramal del tanque. Debido a que el algoritmo de detección de fugas se basa en el balance de caudales entre estos puntos de medición, es necesario garantizar la consistencia entre las lecturas proporcionadas por cada sensor. Para ello, se realizó un procedimiento experimental orientado a determinar factores de corrección que permitan compensar las diferencias sistemáticas presentes en las mediciones.

La conversión de pulsos a caudal volumétrico se realizó mediante la ecuación:

$$Q = \frac{N \cdot 60}{450}$$

donde  $Q$  representa el caudal medido en litros por minuto (L/min),  $N$  corresponde al número de pulsos registrados durante un segundo y 450 representa la constante nominal de conversión del sensor YF-S201.

Para la determinación del factor de corrección se consideró como referencia el sensor instalado en la línea principal, debido a que este mide el caudal total de entrada a la red hidráulica y constituye la referencia utilizada por el algoritmo para efectuar el balance entre los diferentes ramales.

Los ensayos experimentales se realizaron bajo diferentes condiciones de flujo, registrando simultáneamente las mediciones del sensor principal y de los sensores ubicados en los ramales secundarios. Los datos obtenidos fueron almacenados por el sistema de monitoreo y posteriormente procesados para comparar el comportamiento de cada sensor respecto al sensor de referencia.

A partir de la comparación de las mediciones se identificaron diferencias sistemáticas en las lecturas de los sensores secundarios, asociadas principalmente a la dispersión propia del dispositivo y a las condiciones de instalación. Por ello, se determinaron factores de corrección individuales para ajustar los valores medidos y mejorar la correspondencia entre los caudales registrados por cada punto de medición. Estos factores fueron posteriormente aplicados en el

algoritmo de detección de fugas para obtener un balance hidráulico más preciso.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 8.

**Tabla 8**

Factores de corrección obtenidos para los sensores de flujo YF-S201.

| Sensor     | Factor de corrección | Error equivalente ( %) | Observación                         |
|------------|----------------------|------------------------|-------------------------------------|
| Principal  | 1.000                | 0.0                    | Sensor de referencia                |
| Tanque     | 1.026                | -2.6                   | Ajuste respecto al sensor principal |
| Lavandería | 1.035                | -3.5                   | Ajuste respecto al sensor principal |

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 8 se presentan los factores de corrección obtenidos para los sensores de flujo YF-S201. Los resultados muestran que los sensores instalados en los ramales secundarios presentaron una ligera subestimación respecto al sensor principal, por lo cual fue necesario aplicar factores de ajuste para mejorar la precisión de las mediciones. Para compensar estas diferencias se implementaron factores de corrección multiplicativos dentro del algoritmo de procesamiento de datos.

Para el sensor instalado en el ramal del tanque se aplicó el factor:

$$Q_{\text{tanque,corr}} = 1,026 \cdot Q_{\text{tanque}}$$

mientras que para el sensor ubicado en el ramal de lavandería se utilizó:

$$Q_{\text{lavandería,corr}} = 1,035 \cdot Q_{\text{lavandería}}$$

La aplicación de estos factores permitió reducir las diferencias entre sensores y mejorar la consistencia de las mediciones empleadas en el balance hidráulico del sistema.

Finalmente, la aplicación de los factores de corrección determinados experimentalmente contribuye a incrementar la precisión del cálculo del coeficiente de distribución  $\alpha$  y mejora

la confiabilidad del algoritmo de detección de fugas, al reducir los errores asociados a las diferencias individuales entre los sensores de flujo.

### **3.10.6 Factor de corrección del sensor de flujo del ramal del tanque**

Con el objetivo de garantizar la coherencia de las mediciones empleadas por el algoritmo de detección de fugas, se determinó un factor de corrección para el sensor de flujo instalado en el ramal del tanque. Para ello, se utilizó como referencia el sensor de flujo ubicado en la línea principal de la tubería principal, debido a que este registra el caudal total que ingresa a la red hidráulica y fue considerado como referencia durante las pruebas experimentales.

La determinación del factor de corrección consistió en hacer circular el mismo flujo de agua a través de ambos sensores y registrar simultáneamente los valores de caudal medidos. Posteriormente, se compararon las lecturas obtenidas para cuantificar la diferencia sistemática entre ambos sensores. A partir de esta comparación se calculó un factor multiplicativo, el cual fue aplicado a las mediciones del sensor del ramal del tanque con el propósito de reducir el error de medición y mejorar la concordancia entre las lecturas empleadas por el algoritmo de detección de fugas.

Los resultados obtenidos durante las pruebas experimentales se presentan en la Tabla 9.

**Tabla 9**

Datos experimentales empleados para obtener el factor de corrección del sensor de flujo del tanque.

| Prueba          | Q <sub>principal</sub> (L/min) | Q <sub>tanque</sub> (L/min) | Q <sub>principal</sub> /Q <sub>tanque</sub> |
|-----------------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------|
| 1               | 2.00                           | 1.96                        | 1.020                                       |
| 2               | 3.15                           | 3.08                        | 1.023                                       |
| 3               | 4.00                           | 3.90                        | 1.026                                       |
| 4               | 5.68                           | 5.53                        | 1.027                                       |
| 5               | 7.00                           | 6.81                        | 1.028                                       |
| 6               | 8.42                           | 8.19                        | 1.028                                       |
| 7               | 10.00                          | 9.73                        | 1.028                                       |
| 8               | 11.56                          | 11.25                       | 1.028                                       |
| 9               | 13.00                          | 12.65                       | 1.028                                       |
| 10              | 14.58                          | 14.20                       | 1.027                                       |
| 11              | 16.00                          | 15.58                       | 1.027                                       |
| 12              | 17.00                          | 16.55                       | 1.027                                       |
| <b>Promedio</b> | —                              | —                           | <b>1.026</b>                                |

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran que el sensor instalado en el ramal del tanque presentó una ligera subestimación respecto al sensor principal. Para cuantificar esta diferencia se calculó la relación entre ambos sensores para cada una de las pruebas realizadas mediante:

$$k_i = \frac{Q_{\text{principal}}}{Q_{\text{tanque}}}$$

donde  $k_i$  representa el factor de corrección correspondiente a cada medición.

Posteriormente se obtuvo el promedio de los factores calculados con la siguiente fórmula:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^{12} k_i}{12}$$

Sustituyendo los valores obtenidos experimentalmente se determina:

$$k \approx 1,026$$

Por lo tanto, el caudal que entrega al instrumento del sensor de tanque, comprende el factor  $K$  multiplicado por el caudal leído por el sensor:

$$Q_{\text{tanque}} = 1,026 \cdot Q$$

donde  $Q$  corresponde al caudal calculado a partir de la ecuación de conversión de pulsos del sensor YF-S201.

La implementación de este ajuste se realizó directamente en el algoritmo de procesamiento mediante la instrucción:

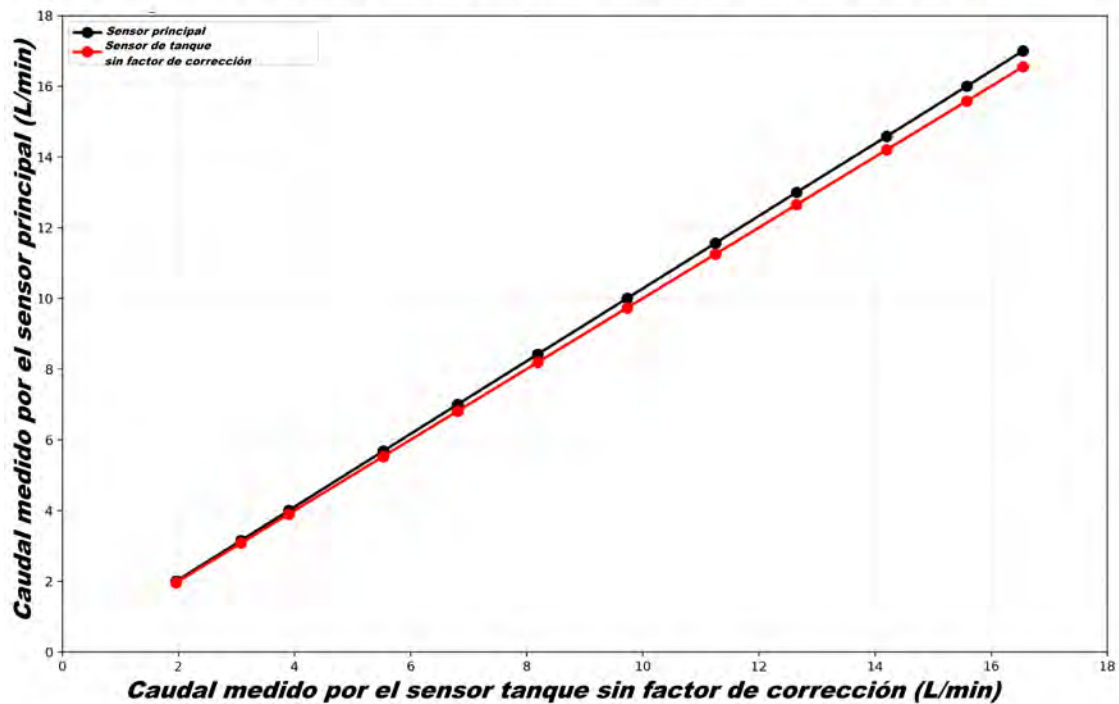
```
flujoFiltrado = 1.026 * flujoFiltrado;
```

La aplicación de este factor permitió compensar la subestimación observada durante las pruebas experimentales y mejorar la concordancia entre las mediciones realizadas por el sensor principal y el sensor del tanque. Este factor de corrección resulta fundamental para garantizar la precisión del balance de caudales utilizado por el algoritmo de detección de fugas.

**Figura 15**

Comparación entre el sensor principal y el sensor de tanque sin factor de corrección.

***Comparación entre el sensor principal y el sensor tanque sin factor de corrección***

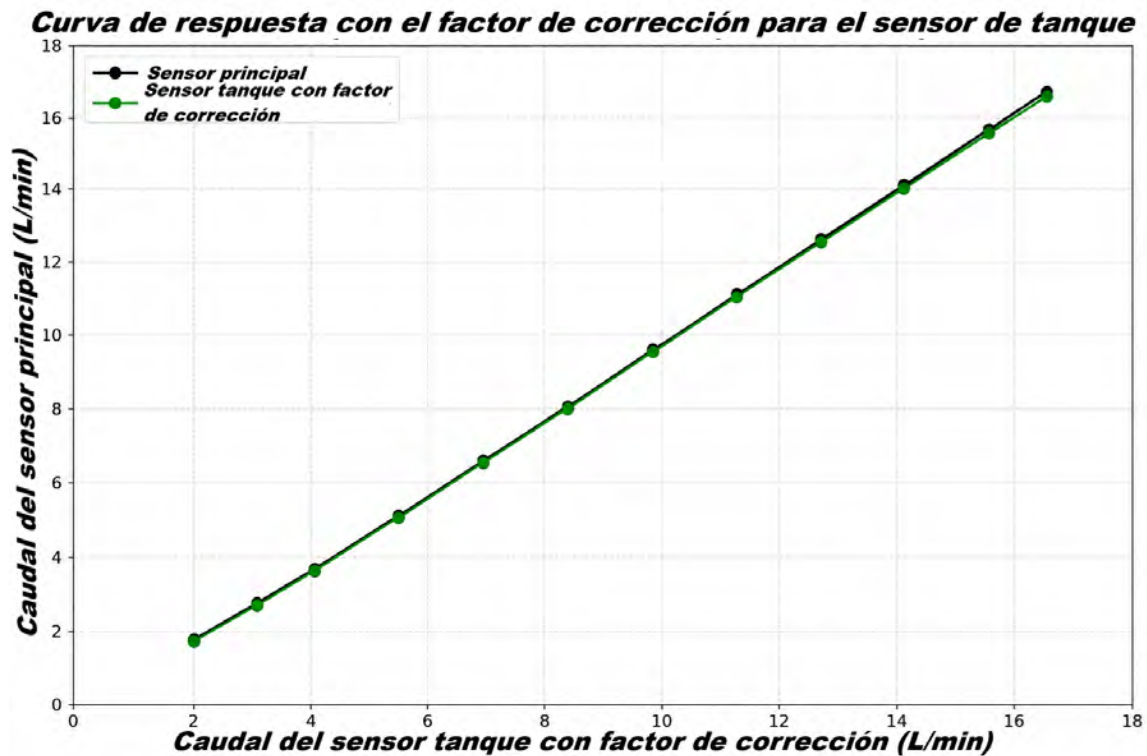


Fuente: Elaboración propia.

La Figura 15 presenta la comparación de las mediciones antes de aplicar el factor de corrección. Se observa que para valores de caudal cercanos a los 7 L/min las lecturas del sensor de tanque presentan una respuesta similar respecto al sensor principal. Sin embargo, a partir de este punto se evidencia un incremento progresivo en la diferencia entre ambas mediciones conforme aumenta el caudal, lo que demuestra la presencia de una desviación sistemática y la necesidad de aplicar un factor de corrección en la respuesta del sensor.

**Figura 16**

Curva de respuesta con el factor de corrección para el sensor tanque.



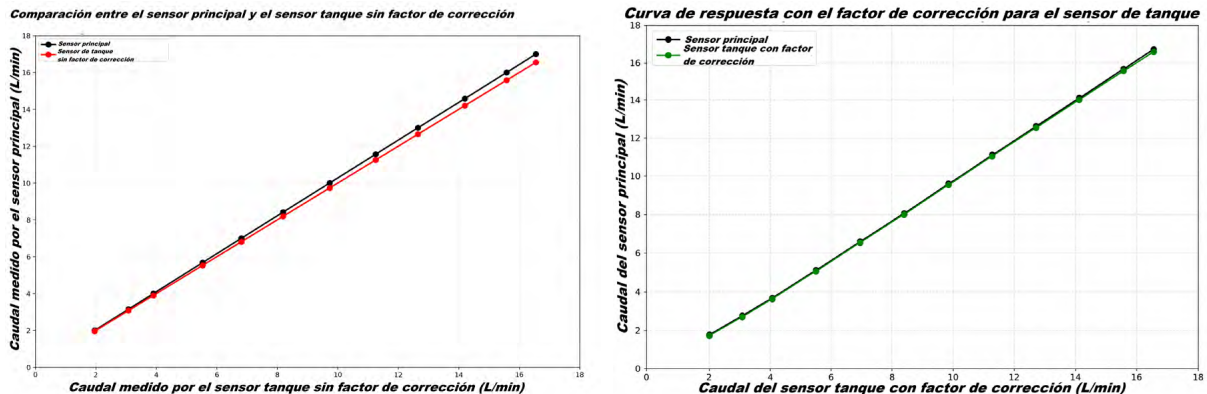
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 16 muestra la comparación de las mediciones después de aplicar el factor de corrección. Se aprecia una coincidencia significativa entre ambas curvas, lo que indica una mejora en la exactitud de las mediciones.

Con la finalidad de evaluar el efecto de la aplicación del factor de corrección determinado para el sensor de flujo del ramal del tanque, a continuación se presenta la comparación entre las mediciones obtenidas antes y después de aplicar dicho factor. Esta comparación permite observar la mejora en la correspondencia entre las mediciones del sensor del tanque y el sensor principal.

**Figura 17**

Comparación del sensor de tanque antes y después de aplicar el factor de corrección.



(a) Sensor de tanque sin factor de corrección (b) Sensor de tanque con factor de corrección

Fuente: Elaboración propia.

Después de aplicar el factor de corrección determinado experimentalmente ( $F = 1,026$ ) se observa una mayor correspondencia entre las mediciones del sensor de flujo del ramal del tanque y el sensor principal. Este ajuste permitió mejorar la precisión de las lecturas del sensor del tanque, reduciendo la diferencia con respecto al sensor principal.

La comparación mostrada en la Figura 17 evidencia que la aplicación del factor de corrección mejora la precisión de las mediciones del ramal del tanque, permitiendo obtener valores más consistentes para el balance de caudales utilizado en el algoritmo de detección de fugas.

### 3.10.7 Factor de corrección del sensor de flujo del ramal de lavandería

Con el propósito de mejorar la precisión de las mediciones empleadas por el algoritmo de detección de fugas, se determinó el factor de corrección del sensor de flujo instalado en el ramal de lavandería. Para ello, se utilizó como referencia el sensor ubicado en la tubería principal, debido a que este registra el caudal total suministrado al sistema hidráulico.

El factor de corrección fue obtenido mediante la comparación de las lecturas registradas por ambos sensores bajo condiciones similares de operación. A partir de las diferencias sistemáticas identificadas entre las mediciones, se calculó un coeficiente de ajuste que permite compensar la desviación propia del sensor instalado en el ramal de lavandería.

Este factor de corrección permite ajustar el valor medido por el sensor de la lavandería antes de ser utilizado en el balance de caudales del sistema, reduciendo errores de medición y mejorando la confiabilidad del algoritmo de detección de fugas.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 10.

**Tabla 10**

Resultados de calibración del sensor de flujo de lavandería respecto al sensor principal.

| <b>Prueba</b>   | <b><math>Q_{principal}</math> (L/min)</b> | <b><math>Q_{lavanderia}</math> (L/min)</b> | <b>Factor</b> |
|-----------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------|
| 1               | 2.00                                      | 1.96                                       | 1.020         |
| 2               | 3.00                                      | 2.93                                       | 1.024         |
| 3               | 4.00                                      | 3.89                                       | 1.028         |
| 4               | 5.50                                      | 5.31                                       | 1.036         |
| 5               | 7.00                                      | 6.75                                       | 1.037         |
| 6               | 8.50                                      | 8.19                                       | 1.038         |
| 7               | 10.00                                     | 9.63                                       | 1.038         |
| 8               | 11.50                                     | 11.06                                      | 1.040         |
| 9               | 13.00                                     | 12.49                                      | 1.041         |
| 10              | 14.50                                     | 13.92                                      | 1.042         |
| 11              | 16.00                                     | 15.34                                      | 1.043         |
| 12              | 17.00                                     | 16.29                                      | 1.044         |
| <b>Promedio</b> | —                                         | —                                          | <b>1.035</b>  |

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 10, los resultados muestran que el sensor instalado en el ramal de lavandería presentó una ligera subestimación respecto al sensor principal. Para cuantificar esta diferencia se calculó la relación entre ambos sensores para cada una de las pruebas realizadas mediante:

$$k_i = \frac{Q_{principal}}{Q_{lavanderia}}$$

donde  $k_i$  representa el factor de corrección correspondiente a cada medición.

Posteriormente se obtuvo el promedio de los factores calculados:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^{12} k_i}{12}$$

Sustituyendo los valores obtenidos experimentalmente se determinó:

$$k \approx 1,035$$

Por lo tanto, el caudal que entrega al instrumento del sensor de lavandería, comprende el factor K multiplicado por el caudal leído por el sensor:

$$Q_{\text{lavandería}} = 1,035 \cdot Q$$

donde  $Q$  corresponde al caudal calculado a partir de la ecuación de conversión de pulsos del sensor YF-S201.

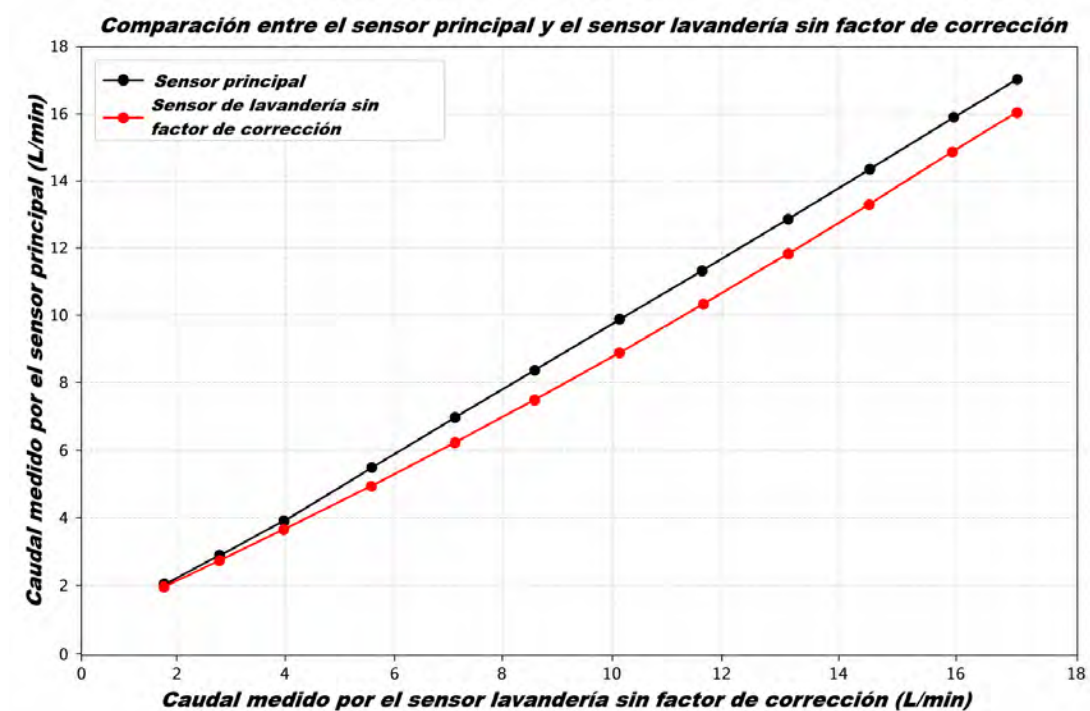
La implementación de este ajuste se realizó directamente en el algoritmo de procesamiento mediante la instrucción:

```
flujoFiltrado = 1.035 * flujoFiltrado;
```

La aplicación del factor de corrección permitió compensar la subestimación observada en las mediciones del sensor de flujo del ramal de lavandería, mejorando la concordancia entre las lecturas del sensor principal y las del sensor de la lavandería. En consecuencia, esta corrección incrementó la precisión del balance hidráulico empleado por el algoritmo de detección de fugas, reduciendo el error asociado a las diferencias sistemáticas entre ambos sensores.

**Figura 18**

Comparación entre el sensor principal y el sensor de lavandería antes de la calibración.

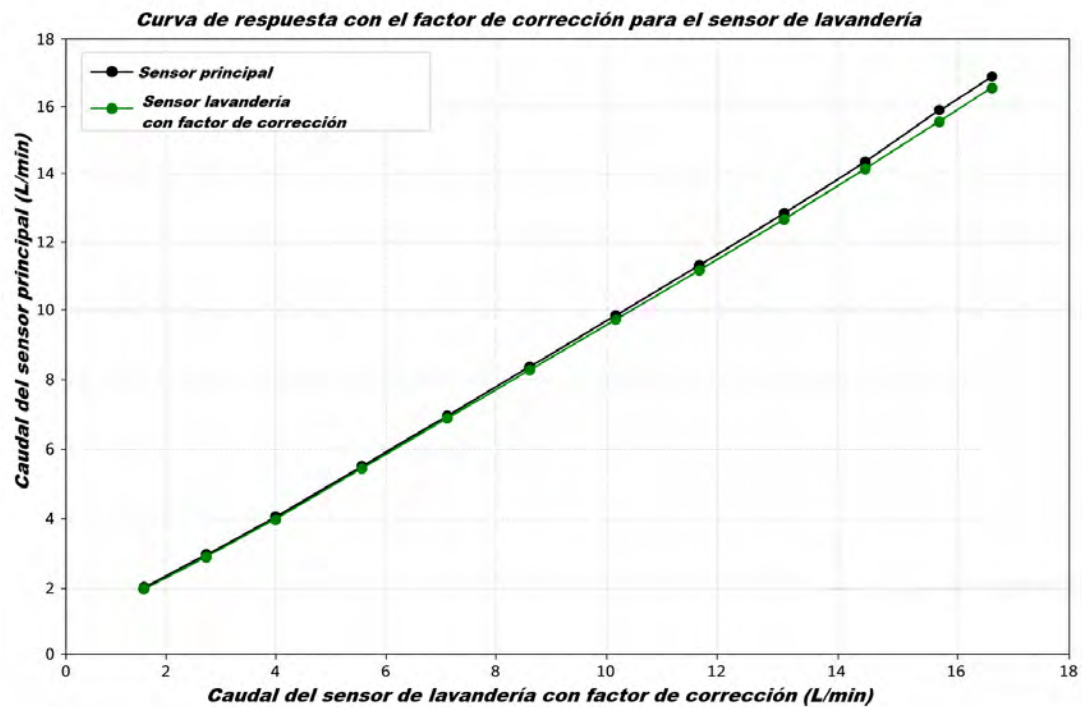


Fuente: Elaboración propia.

La Figura 18 presenta la comparación de las mediciones antes de aplicar el factor de corrección. Se observa que, para caudales de hasta aproximadamente 4 L/min, las mediciones del sensor de lavandería son muy similares a las del sensor principal. Sin embargo, a partir de este valor la diferencia entre ambas lecturas aumenta progresivamente conforme se incrementa el caudal, evidenciando la necesidad de aplicar un factor de corrección para mejorar la correspondencia entre las mediciones.

**Figura 19**

Comparación después de la calibración del sensor de lavandería.

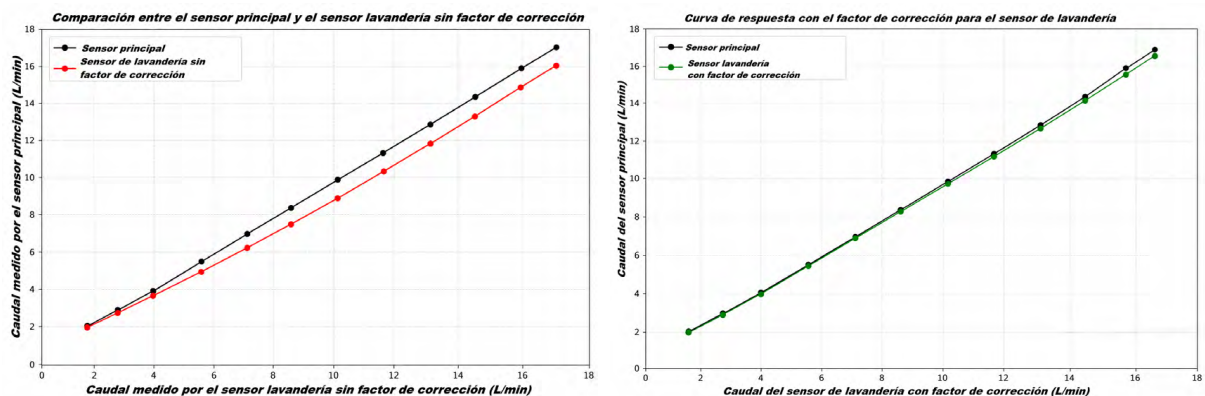


Fuente: Elaboración propia.

La Figura 19 muestra la comparación de las mediciones después de aplicar el factor de corrección. Se aprecia una coincidencia significativa entre ambas curvas, lo que indica una mejora en la exactitud de las mediciones.

**Figura 20**

Comparación del sensor de lavandería antes y después de aplicar el factor de corrección.



(a) Antes de aplicar el factor de corrección

(b) Después de aplicar el factor de corrección

Fuente: Elaboración propia.

la Figura 20 presenta de manera conjunta las mediciones del sensor principal, el sensor de lavandería sin aplicar el factor de corrección y el sensor de lavandería con el factor de corrección aplicado. Se observa que la curva corregida presenta una aproximación considerable respecto a la referencia, confirmando la efectividad del factor de corrección determinado y su aporte en la mejora de la precisión de las mediciones.

### 3.10.8 Verificación experimental del sensor de presión HK3025

Con la finalidad de verificar el correcto funcionamiento del sensor de presión HK3025, se realizó una evaluación experimental de la señal de salida del dispositivo mediante mediciones directas de voltaje utilizando un multímetro digital. Esta verificación permitió comprobar que la respuesta del sensor es consistente con la curva de transferencia proporcionada por el fabricante y con la ecuación implementada en el sistema de monitoreo desarrollado.

La lectura analógica obtenida por el convertidor analógico-digital (ADC) del ESP32 fue transformada a voltaje mediante la siguiente expresión:

$$V_{out} = ADC \left( \frac{3,3}{4095} \right) \quad (25)$$

donde:

- $ADC$  representa la lectura digital obtenida mediante la función `analogRead()`.
- 3,3 V corresponde al voltaje de referencia del ESP32.
- 4095 es el valor máximo del convertidor analógico-digital de 12 bits.

Posteriormente, la presión fue calculada utilizando la ecuación de transferencia del sensor HK3025:

$$P = \frac{V_{out} - 0,5}{0,8} \quad (26)$$

donde:

- $P$  representa la presión en MPa.

- $V_{out}$  corresponde al voltaje de salida del sensor en voltios.

Los resultados obtenidos durante la verificación experimental se presentan en la Tabla 11.

**Tabla 11**

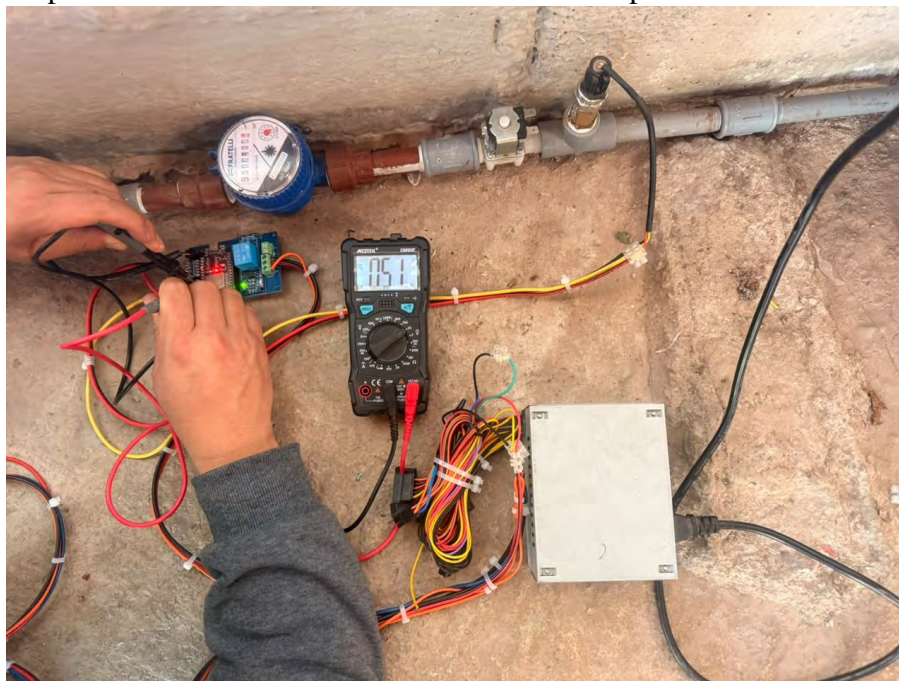
Resultados de la verificación experimental del sensor de presión HK3025.

| Prueba | Voltaje medido (V) | Presión calculada (MPa) |
|--------|--------------------|-------------------------|
| 1      | 0.51               | 0.01                    |
| 2      | 0.82               | 0.40                    |
| 3      | 0.92               | 0.53                    |
| 4      | 0.95               | 0.56                    |

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 21**

Verificación experimental de la señal de salida del sensor de presión HK3025.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 21 muestra la medición experimental realizada sobre la salida analógica del sensor HK3025 mediante un multímetro digital. Durante la prueba se registró una tensión

aproximada de 0.51 V, valor que coincide con el límite inferior de operación especificado por el fabricante para sensores con salida analógica comprendida entre 0.5 V y 4.5 V.

A partir de la ecuación implementada en el sistema se obtuvo una presión aproximada de 0.01 MPa, valor que corresponde a una condición de presión mínima. Este resultado confirma que la señal entregada por el sensor es coherente con la curva de transferencia proporcionada por el fabricante y que la etapa de adquisición de datos basada en el ESP32 realiza correctamente la conversión de la señal analógica a valores de presión.

Los resultados obtenidos evidencian que el sensor presenta un comportamiento adecuado dentro del rango de operación utilizado en el prototipo desarrollado. Asimismo, la medición realizada permitió verificar la correcta integración del sensor con el sistema electrónico de monitoreo.

Cabe señalar que la detección de fugas implementada en esta investigación se fundamenta principalmente en el análisis del balance de caudales entre el sensor principal y los sensores instalados en los ramales monitoreados. Por esta razón, el sensor de presión fue empleado como una variable complementaria para supervisar el comportamiento hidráulico de la red domiciliaria y analizar las variaciones de presión observadas durante las pruebas experimentales.

En consecuencia, la verificación experimental realizada confirma el adecuado funcionamiento del sensor HK3025 dentro del sistema desarrollado, permitiendo utilizar los valores de presión obtenidos como información complementaria para la evaluación del comportamiento de la red hidráulica durante las pruebas de detección de fugas de agua.

### **3.10.9 Instalación hidráulica y ubicación del sensor de presión**

El sensor de presión fue instalado en un ramal derivado de la tubería principal de la red hidráulica domiciliaria, con el objetivo de medir las variaciones de presión representativas del sistema. Esta ubicación permite captar los cambios de presión generados por el consumo de agua o por la presencia de posibles fugas en la red.

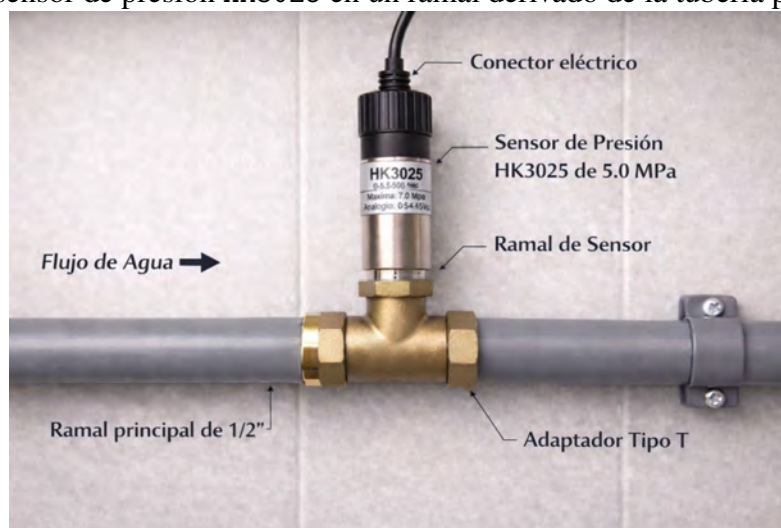
Para su implementación, se utilizó un adaptador tipo T acoplado a la tubería principal, desde el cual se genera el ramal donde se encuentra instalado el sensor. Esta configuración permite

integrar el sensor sin interrumpir el flujo principal de agua, garantizando además una conexión estanca y mecánicamente estable.

La instalación en este punto responde a la necesidad de obtener una medición indirecta pero representativa del comportamiento hidráulico global, ya que cualquier variación en el caudal dentro del sistema produce cambios en la presión que pueden ser detectados en este ramal. De esta manera, la señal de presión se emplea como variable complementaria en el análisis del sistema, contribuyendo al proceso de detección de fugas.

### Figura 22

Instalación del sensor de presión HK3025 en un ramal derivado de la tubería principal.



Fuente: Elaboración propia.

### 3.11 Implementación del prototipo: montaje del sistema en una placa protoboard y posteriormente en una PCB

Con el fin de integrar y organizar adecuadamente los componentes electrónicos utilizados en el sistema de detección de fugas de agua, se procedió al montaje del circuito en una placa protoboard durante la fase de pruebas, y posteriormente se diseñó e implementó un circuito impreso (PCB) para mayor estabilidad, robustez y facilidad de instalación.

#### 3.11.1 Montaje inicial en protoboard

Durante la etapa de validación funcional del sistema, se implementó un montaje preliminar utilizando una protoboard de 830 puntos, la cual permitió realizar conexiones eléctricas de

manera rápida y flexible sin requerir procesos de soldadura. Este tipo de configuración resulta adecuado en fases iniciales de desarrollo, ya que facilita la reorganización de componentes y la detección de posibles errores de conexión.

En esta etapa se emplearon sensores de flujo tipo YF-S201, los cuales fueron conectados al microcontrolador ESP32. Cada sensor cuenta con tres terminales: alimentación (5 V), tierra (GND) y salida de señal digital. La alimentación se distribuyó a través de las líneas de la protoboard, asegurando una referencia común de tierra entre todos los dispositivos.

Las conexiones se realizaron utilizando conductores tipo jumper macho-macho, cuidando la correcta organización de los cables para evitar interferencias y falsos contactos. Asimismo, se verificó la continuidad eléctrica de las conexiones y la adecuada distribución de la alimentación en la protoboard.

Este montaje permitió establecer una base experimental para la integración de los sensores con el sistema electrónico, asegurando un entorno adecuado para pruebas iniciales antes de su implementación en una estructura definitiva.

### **Figura 23**

Prototipo inicial montado en protoboard con sensor de flujo YF-S201 conectado al ESP32.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 23 se muestra el montaje preliminar del sistema en una placa protoboard, donde se integran el microcontrolador ESP32 y el sensor de flujo YF-S201.

### **3.11.2 Diseño y fabricación del PCB**

Una vez validada la etapa de montaje en protoboard, se procedió al diseño y fabricación de una placa de circuito impreso (PCB), con el propósito de lograr una integración física más ordenada, estable y confiable de los componentes electrónicos.

El diseño de la PCB se realizó considerando la correcta distribución de los elementos, priorizando trayectorias de señal cortas, adecuada separación entre pistas y una organización clara de las líneas de alimentación y tierra. Se definieron planos de GND para reducir interferencias eléctricas y mejorar la estabilidad del sistema.

La placa fue diseñada para alojar el microcontrolador ESP32 Dev Module, así como conectores específicos para los sensores YF-S201 y el sensor de presión HK3025. Asimismo, se incluyeron terminales tipo bornera para facilitar la conexión externa de dispositivos y asegurar un contacto eléctrico firme.

Se incorporó un sistema de regulación de voltaje que permite disponer de niveles de 5 V y 3,3 V, garantizando la compatibilidad entre los distintos componentes. De igual manera, se integró un módulo de adaptación de niveles lógicos bidireccional, necesario para la correcta interacción entre el ESP32 y dispositivos que operan a diferentes niveles de tensión.

En cuanto a la fabricación, el diseño fue transferido a una placa de cobre mediante técnicas estándar de elaboración de PCB, asegurando la correcta definición de pistas y la disposición de los componentes. Posteriormente, se realizó el proceso de perforado y montaje de los elementos, verificando la continuidad eléctrica y la ausencia de cortocircuitos.

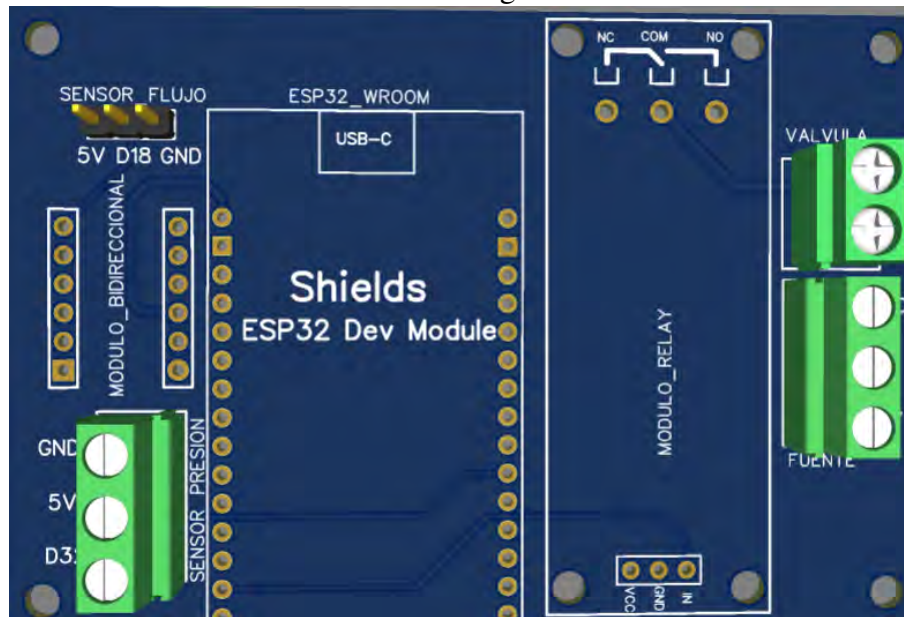
Finalmente, se incorporó serigrafía en la superficie de la placa para la identificación de los distintos puntos de conexión, tales como VCC, GND, SENSOR\_FLUJO, SENSOR\_PRESION y VALVULA, facilitando las labores de instalación y mantenimiento del sistema.

### 3.11.3 Montaje en PCB

Una vez validados los ensayos en protoboard, se procedió al diseño de la PCB para integrar el módulo ESP32, los sensores de flujo, el sensor de presión y la electroválvula en un solo circuito compacto.

**Figura 24**

Vista 3D de la PCB del sistema de detección de fugas.

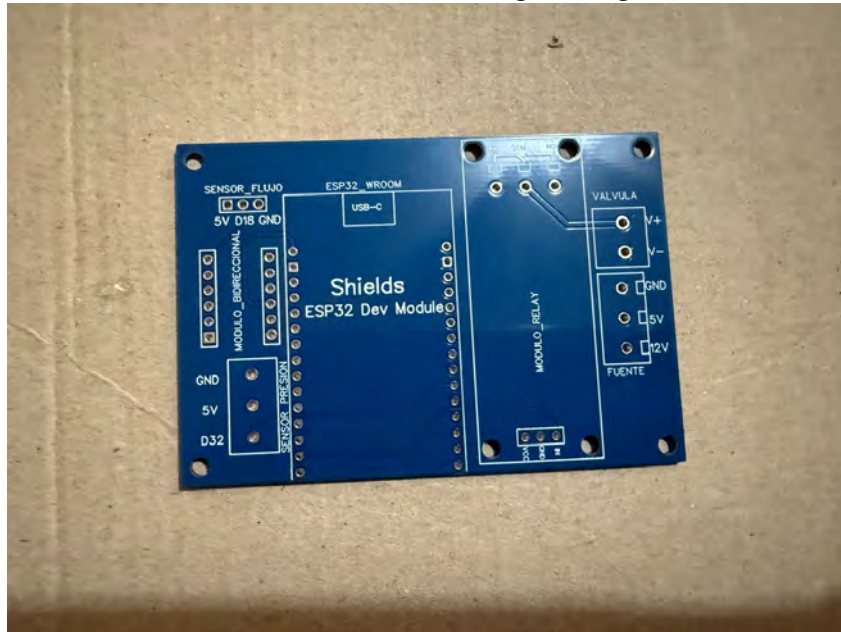


Fuente: Elaboración propia.

El diseño en 3D permitió verificar el correcto espaciado de los componentes y la accesibilidad para el montaje. Asimismo, se garantizó la compatibilidad de los pines de entrada y salida para facilitar el conexionado en el prototipo final.

**Figura 25**

Placa PCB ensamblada del sistema de detección de fugas de agua.



Fuente: Elaboración propia.

El montaje en PCB permitió consolidar todos los componentes en una tarjeta compacta, reduciendo el uso de cables sueltos y la posibilidad de conexiones inestables. Esta implementación representó la transición final del prototipo desde la etapa experimental en protoboard hacia un diseño más robusto y confiable para pruebas en campo.

#### 3.11.4 Módulo electrónico ensamblado

**Figura 26**

Módulo electrónico ensamblado del sistema de detección de fugas de agua.

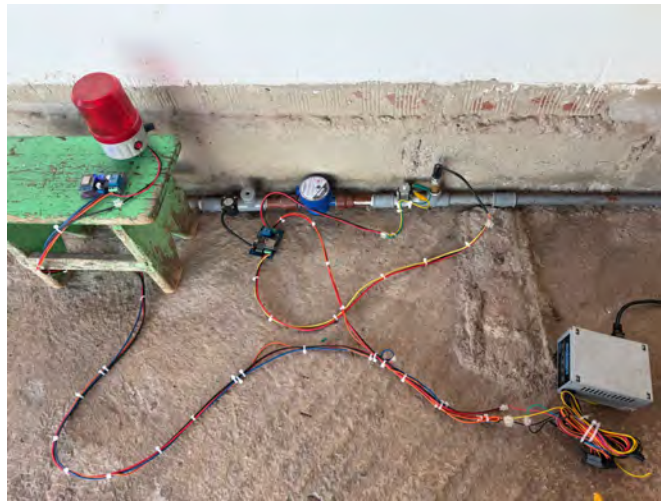


Fuente: Elaboración propia.

La Figura 26 muestra el módulo electrónico ensamblado desarrollado para el sistema de detección de fugas de agua. En esta etapa se integraron sobre la PCB el microcontrolador ESP32, el módulo de relé y los conectores destinados a la interconexión con los sensores y actuadores del sistema. El ensamblaje permitió obtener una estructura compacta y ordenada, facilitando la instalación y operación del prototipo durante las pruebas experimentales.

**Figura 27**

Módulo de adquisición de datos instalados en la tubería principal.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 28**

Módulos de adquisición de datos instalados en los ramales de lavandería y tanque.



Fuente: Elaboración propia.

## Figura 29

Implementación experimental del sistema de detección de fugas de agua en la red hidráulica domiciliar.



Fuente: Elaboración propia.

### 3.12 Componentes complementarios del sistema

#### 3.12.1 Módulo bidireccional de nivel lógico

En sistemas electrónicos donde coexisten dispositivos que operan con distintos niveles de tensión, es necesario implementar mecanismos de adaptación de señal que permitan una comunicación segura y confiable. En este contexto, se emplea un módulo convertidor de nivel lógico bidireccional, cuya función principal es traducir señales digitales entre dominios de 3,3 V y 5 V.

Este módulo permite la transmisión de señales en ambos sentidos, es decir, desde el

dominio de bajo voltaje hacia el de alto voltaje y viceversa, sin comprometer la integridad de los dispositivos conectados. Su funcionamiento se basa en el uso de transistores MOSFET y resistencias de polarización tipo pull-up, los cuales permiten ajustar automáticamente los niveles lógicos de la señal en función del lado al que se conecte.

La implementación de este dispositivo resulta fundamental para proteger al microcontrolador ESP32, que opera a 3,3 V, frente a señales provenientes de módulos o sensores que trabajan a 5 V. Asimismo, garantiza que las señales generadas por el microcontrolador sean interpretadas correctamente por dispositivos externos, manteniendo la compatibilidad eléctrica del sistema.

### **3.12.2 Módulo relé SRD-05VDC-SL-C**

El módulo relé SRD-05VDC-SL-C actúa como un interruptor controlado eléctricamente que permite activar o desactivar dispositivos de mayor potencia mediante una señal de bajo voltaje. En este caso, se emplea para controlar el encendido y apagado de una electroválvula de agua alimentada con 12 V, posibilitando el control automático del flujo de agua en el sistema.

El relé utiliza una bobina interna que, al ser energizada con una tensión de 5 V, genera un campo magnético capaz de accionar un mecanismo electromecánico. Este proceso permite conmutar los contactos eléctricos del relé, cerrando o abriendo el circuito de alimentación de la electroválvula, sin que la señal de control tenga que soportar directamente la carga de mayor potencia.

De esta manera, el módulo relé permite que el microcontrolador ESP32, que opera a 3,3 V, controle indirectamente un dispositivo que requiere 12 V, estableciendo una separación entre la etapa de control y la etapa de potencia.

Este mecanismo de aislamiento y control es fundamental para proteger los componentes electrónicos frente a posibles sobrecorrientes o sobretensiones, garantizando una operación segura, confiable y eficiente del sistema.

### 3.12.3 Mecanismo de activación y control de la válvula principal

El sistema de detección de fugas implementa un mecanismo de control de la válvula principal basado en comunicación remota entre la interfaz de usuario y la unidad de control, permitiendo la intervención directa sobre el flujo de agua en la red hidráulica.

La activación de la válvula se realiza desde la interfaz gráfica desarrollada en Python, donde el usuario dispone de un botón de control que permite alternar entre los estados de apertura y cierre. Al interactuar con este elemento, se generan comandos digitales específicos que son enviados a través del sistema de comunicación TCP/IP hacia el microcontrolador encargado de ejecutar la acción física.

Desde el punto de vista funcional, el proceso de activación se estructura en las siguientes etapas:

- **Generación del comando:** La interfaz envía una instrucción de control en forma de cadena de texto, donde el comando V0 representa el cierre de la válvula y V4 su apertura.
- **Transmisión del comando:** El mensaje es enviado mediante comunicación TCP/IP hacia el sistema embebido, utilizando un servidor implementado en Python que gestiona la conexión con los dispositivos clientes.
- **Recepción y procesamiento:** El microcontrolador recibe el comando a través del módulo de comunicación inalámbrica y lo interpreta como una orden de control.
- **Activación del actuador:** El comando recibido es aplicado sobre un módulo relé, el cual conmuta el estado eléctrico de la válvula solenoide, permitiendo abrir o cerrar el paso del agua.

Este esquema de control se implementa mediante una arquitectura cliente-servidor, en la cual la interfaz actúa como nodo de supervisión y control, mientras que el microcontrolador ejecuta las acciones físicas sobre la red hidráulica.

Es importante destacar que la activación de la válvula no se realiza de manera automática ante la detección de una fuga. En su lugar, el sistema genera una señal de alerta cuando se cumplen las condiciones de fuga definidas por el algoritmo basado en el coeficiente de

distribución  $\alpha$  y el umbral de caudal. Esta alerta permite al usuario tomar la decisión de intervenir manualmente mediante el cierre de la válvula desde la interfaz.

#### **3.12.4 Módulo de alarma sonora**

El módulo de alarma sonora corresponde a la etapa de actuación del sistema de detección de fugas de agua, cuya finalidad es proporcionar una señal de alerta acústica inmediata ante la identificación de una condición anómala en la red hidráulica.

Este módulo está basado en el microcontrolador ESP8266 (Wemos D1 mini), el cual actúa como nodo de ejecución de la alarma dentro de la arquitectura del sistema. La activación de la sirena no se realiza de forma autónoma, sino que depende de la decisión del sistema central, donde se ejecuta el algoritmo de detección de fugas.

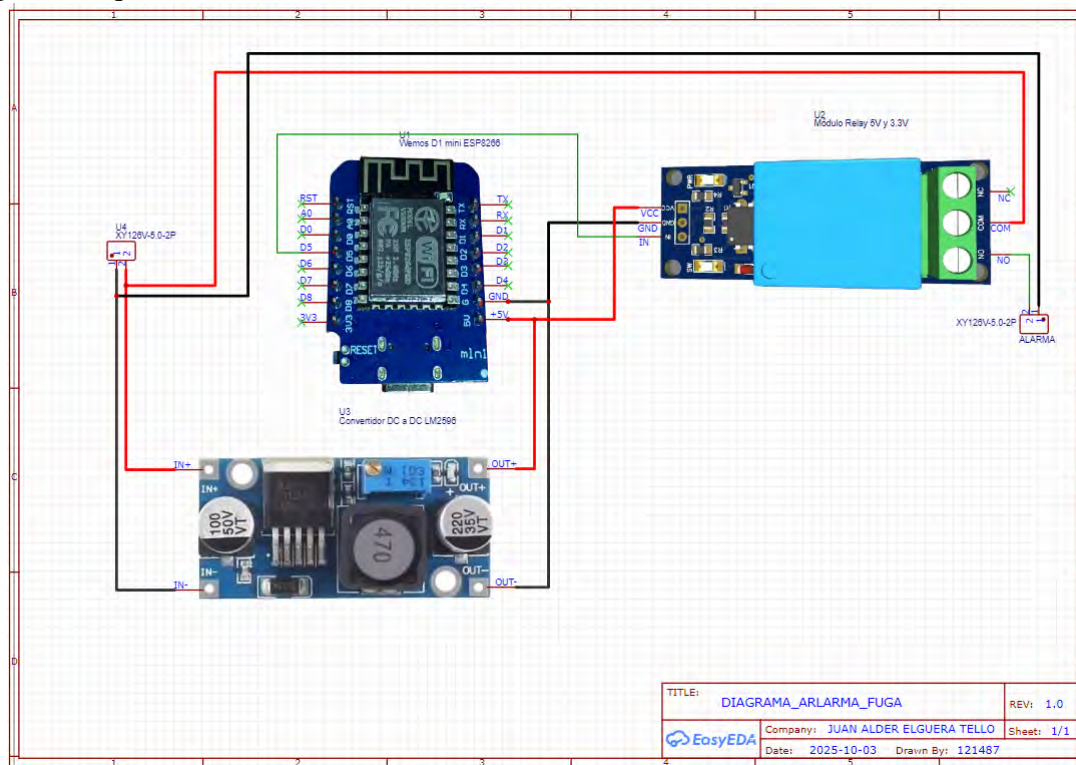
Cuando el sistema principal determina la presencia de una fuga considerando el análisis del coeficiente de distribución  $\alpha$  y el caudal de fuga estimado se envía una señal de control a través de la red local hacia el módulo de alarma. Al recibir esta señal, el ESP8266 genera una salida digital que activa un módulo relay de 5 V.

El relay permite conmutar la alimentación de la sirena industrial modelo LTE-1081 J R ST, la cual opera a 12 V, produciendo una señal sonora de alta intensidad que advierte al usuario sobre la presencia de una fuga. Una vez que la condición de alarma desaparece o es desactivada desde el sistema, el microcontrolador desenergiza el relay, interrumpiendo el funcionamiento de la sirena.

Desde el punto de vista de alimentación, el circuito de control utiliza un convertidor DC-DC LM2596, encargado de reducir la tensión de entrada de 12 V a 5 V, garantizando un suministro estable para el ESP8266 y el módulo relay. La sirena, por su parte, dispone de una línea de alimentación independiente de 12 V, lo que permite aislar eléctricamente la etapa de potencia del sistema de control, reduciendo la posibilidad de interferencias y aumentando la confiabilidad del sistema.

**Figura 30**

Diagrama esquemático del módulo de alarma sonora.



Fuente: Elaboración propia.

### 3.12.5 Diagrama de bloques del sistema de alarma

El sistema de alarma fue implementado con la finalidad de alertar al usuario cuando el algoritmo de detección identifica una condición de fuga de agua en la red de distribución domiciliaria. Este subsistema está conformado por una fuente de alimentación ATX de 12 VDC, un convertidor DC-DC LM2596, un módulo ESP8266, un módulo relé y un buzzer de 12 VDC. La comunicación entre el servidor de procesamiento y el ESP8266 se realiza mediante una red Wi-Fi utilizando el protocolo TCP/IP.

La fuente de alimentación ATX suministra una tensión de 12 VDC al sistema. Parte de esta energía es utilizada directamente para la activación del buzzer, mientras que otra parte es enviada al convertidor DC-DC LM2596, encargado de reducir la tensión de entrada de 12 VDC a 5 VDC. Esta tensión regulada alimenta al módulo ESP8266 y al módulo relé, garantizando condiciones adecuadas de operación para los dispositivos electrónicos de control.

El servidor ejecuta continuamente el algoritmo de detección de fugas y determina el estado

de la alarma en función de los parámetros hidráulicos analizados. Cuando se detecta una fuga, el servidor envía mediante Wi-Fi un comando de activación al ESP8266. Al recibir esta instrucción, el microcontrolador genera una señal digital de control a través del pin D5, la cual es aplicada a la entrada del módulo relé.

El módulo relé funciona como una interfaz de aislamiento entre la etapa de control y la etapa de potencia. Cuando recibe la señal proveniente del ESP8266, conmuta sus contactos internos permitiendo el paso de la alimentación hacia el buzzer. En esta configuración, el contacto común (COM) del relé se encuentra conectado al positivo de 12 VDC de la fuente ATX, mientras que el contacto normalmente abierto (NO) se conecta al terminal positivo del buzzer. El terminal negativo del buzzer se conecta directamente al terminal negativo (GND) de la fuente de alimentación.

Cuando el relé es activado, el contacto COM-NO se cierra, completando el circuito eléctrico y permitiendo que el buzzer reciba la alimentación de 12 VDC. Como consecuencia, se genera una alarma sonora y visual que informa al usuario sobre la presencia de una fuga detectada por el sistema. Una vez eliminada la condición de fuga o recibida la orden de desactivación, el relé retorna a su estado normal, interrumpiendo la alimentación del buzzer y deteniendo la señal de alarma.

La arquitectura implementada permite una adecuada separación entre las etapas de procesamiento, control y potencia, proporcionando un funcionamiento confiable y seguro del sistema de alarma integrado al prototipo de detección de fugas de agua.

**Figura 31**

Diagrama de bloques del sistema de alarma implementado para la notificación de fugas de agua.



Fuente: Elaboración propia.

### 3.12.6 Ensamblaje y pruebas

El ensamblaje del sistema se realizó empleando herramientas de precisión, como un caudín de punta fina, lo que permitió obtener uniones firmes y confiables entre los distintos componentes electrónicos. Una vez completado el montaje, se llevaron a cabo pruebas de continuidad en las pistas y conexiones del circuito, con el fin de descartar posibles fallas como circuitos abiertos o cortocircuitos.

Posteriormente, se verificaron los niveles de voltaje en los diferentes nodos del sistema, asegurando que cada módulo recibiera la tensión adecuada para su correcta operación. Asimismo, se evaluó la respuesta de las señales provenientes de los sensores de flujo YF-S201 y del sensor de presión HK3025, comprobando su estabilidad y comportamiento lineal bajo condiciones reales de funcionamiento.

Los resultados obtenidos evidenciaron un funcionamiento estable y confiable del sistema, destacando una menor susceptibilidad a interferencias eléctricas en comparación con las pruebas iniciales realizadas en protoboard. Esto confirma que la implementación en PCB

mejora significativamente la robustez y desempeño del sistema electrónico.

**Tabla 12**

Verificación de niveles de voltaje en el sistema.

| Punto de medición                           | Voltaje nominal (V) | Voltaje medido (V) | Estado   |
|---------------------------------------------|---------------------|--------------------|----------|
| Fuente de alimentación del sistema          | 5.0                 | 5.14               | Correcto |
| Fuente de alimentación de la electroválvula | 12.0                | 12.21              | Correcto |
| Pin 3V3 del ESP32                           | 3.3                 | 3.34               | Correcto |
| Módulo relé                                 | 5.0                 | 5.01               | Correcto |
| Sensor de flujo YF-S201                     | 5.0                 | 5.12               | Correcto |
| Sensor de presión HK3025                    | 5.0                 | 5.13               | Correcto |
| Electroválvula                              | 12.0                | 12.22              | Correcto |

Fuente: Elaboración propia

Los resultados mostrados en la Tabla 12 evidencian que todos los módulos del sistema recibieron niveles de tensión adecuados para su funcionamiento.

**Figura 32**

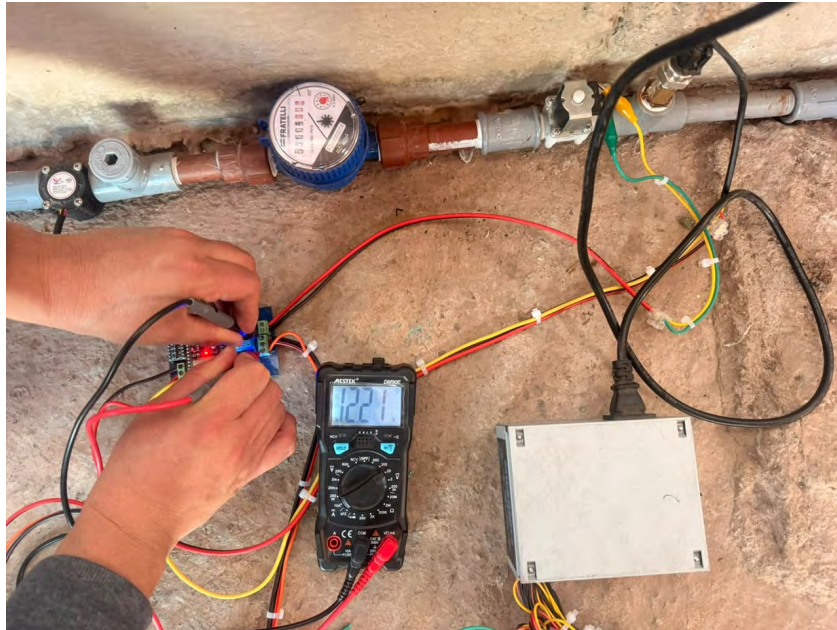
Verificación experimental del voltaje de entrada de la fuente de alimentación. Durante la prueba se registró una tensión de 5.14 V, dentro del rango de operación esperado.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 33**

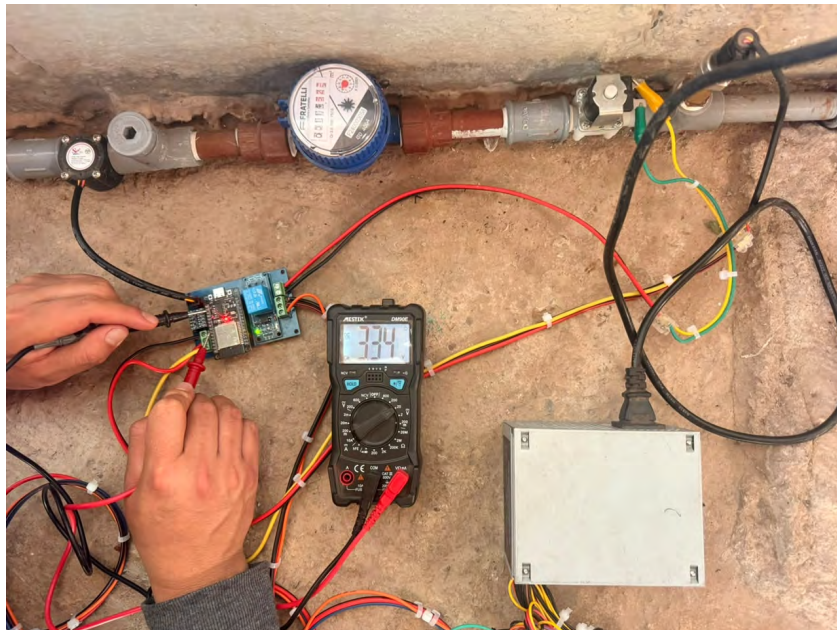
Verificación experimental de la tensión suministrada por la fuente de alimentación durante las pruebas del sistema electrónico de detección de fugas.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 34**

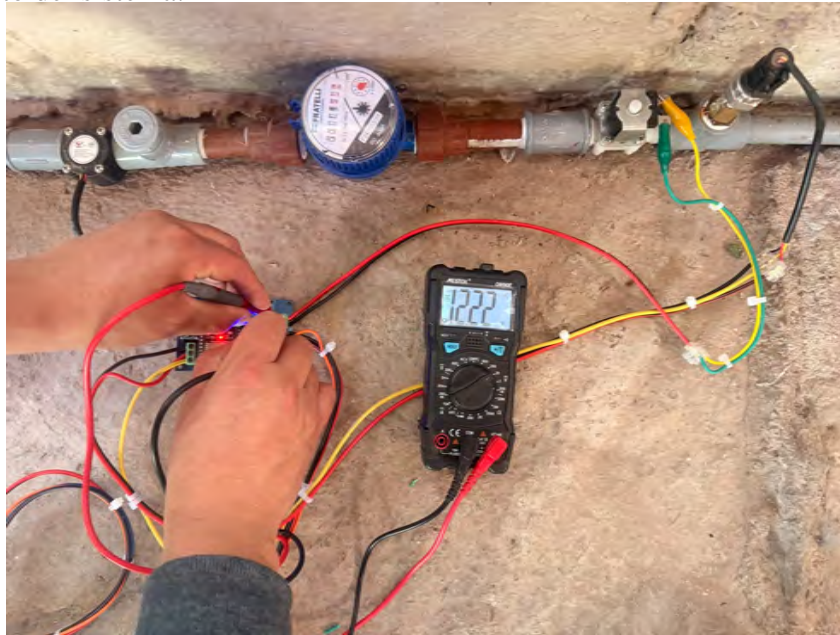
Verificación experimental de la tensión de alimentación del microcontrolador ESP32 durante las pruebas de funcionamiento del sistema.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 35**

Verificación experimental del voltaje aplicado a la electroválvula durante las pruebas de funcionamiento del sistema.



Fuente: Elaboración propia.

### **3.13 Módulo de Comunicación WiFi**

El módulo de comunicación WiFi constituye un elemento esencial dentro del sistema de detección de fugas de agua, debido a que permite la transmisión de los datos generados por los sensores hacia una plataforma de monitoreo local accesible para el usuario. Esta característica amplía el alcance del sistema, posibilitando la supervisión remota y en tiempo real del comportamiento de la red domiciliar de agua, conforme a los principios del Internet de las Cosas (IoT).

El microcontrolador ESP32 integra de manera nativa un módulo de comunicación inalámbrica compatible con el estándar IEEE 802.11 b/g/n, operando en la banda de frecuencia de 2.4 GHz. Esta capacidad le permite establecer conexión con redes inalámbricas domiciliarias y realizar el intercambio de información mediante el protocolo TCP/IP, acorde con la arquitectura de comunicación definida para el sistema propuesto.

En el desarrollo del presente proyecto, la comunicación WiFi se utiliza para el envío continuo de datos hacia una plataforma de monitoreo diseñada específicamente para este

sistema. Dicha plataforma permite la visualización en tiempo real de variables como el caudal, la presión y el estado general de la red, así como la generación de alertas ante la detección de condiciones anómalas asociadas a posibles fugas de agua.

Asimismo, la comunicación implementada es de tipo bidireccional, ya que el sistema no solo transmite información, sino que también es capaz de recibir comandos desde la plataforma de monitoreo. Esto posibilita la ejecución de acciones como el reinicio del sistema, la activación de dispositivos de alerta y la configuración de parámetros operativos, contribuyendo a mejorar el control, la confiabilidad y la adaptabilidad del sistema de detección de fugas desarrollado.

### **3.13.1 Protocolo de comunicación entre el ESP32 y el servidor**

La comunicación entre el microcontrolador ESP32 y el sistema de procesamiento se realiza mediante un protocolo de transmisión basado en tramas identificadas, el cual permite la organización y clasificación de los datos enviados a través de la red WiFi mediante comunicación TCP/IP.

En este esquema, cada tipo de dato es precedido por un identificador específico que permite al servidor reconocer y procesar la información de manera adecuada. Este enfoque facilita la integración de múltiples sensores dentro del sistema y asegura la correcta interpretación de los datos en tiempo real.

Las tramas implementadas en el sistema son las siguientes:

- S1: corresponde a la medición de presión en la red hidráulica.
- S2: corresponde al flujo en la tubería principal.
- S3: corresponde al flujo en el ramal del tanque.
- S5: corresponde al flujo en el ramal de lavandería.

Cada trama es transmitida desde el ESP32 hacia el servidor en forma de cadenas de texto estructuradas, donde los valores son separados por delimitadores, permitiendo su posterior decodificación en el sistema de procesamiento implementado en Python.

Una vez recibidos, los datos son clasificados y almacenados en estructuras de tipo cola, lo que permite su sincronización y procesamiento conjunto en el algoritmo de detección de fugas.

Este mecanismo garantiza la coherencia temporal entre las variables medidas, facilitando el análisis del comportamiento hidráulico del sistema.

El uso de este protocolo permite una transmisión eficiente, organizada y escalable de la información, constituyendo un elemento fundamental en la arquitectura del sistema de detección de fugas desarrollado.

### **3.13.2 Secuencia de procesamiento del sistema**

El funcionamiento del sistema de detección de fugas se basa en una arquitectura distribuida, en la cual cada componente cumple una función específica dentro del proceso de adquisición, transmisión y análisis de datos.

La secuencia de operación del sistema se describe de la siguiente manera:

- Los sensores instalados en la red hidráulica miden las variables de flujo y presión.
- El microcontrolador ESP32 adquiere estas señales y realiza un procesamiento inicial.
- Los datos son enviados mediante comunicación WiFi utilizando el protocolo TCP.
- El servidor implementado en Python recibe, clasifica y sincroniza los datos.
- Se ejecuta el algoritmo de detección de fugas basado en el coeficiente de distribución y el balance de caudales.
- Los resultados son visualizados en tiempo real mediante una interfaz gráfica.
- En caso de detección de fuga, el sistema puede activar mecanismos de alerta o control.

Este enfoque permite integrar la adquisición de datos con el procesamiento en tiempo real, garantizando una detección confiable y eficiente de fugas en la red domiciliaria.

### **3.14 Diagramas de flujo de los algoritmos implementados**

Los diagramas de flujo presentados en esta sección describen la secuencia lógica de operación de los diferentes módulos de software desarrollados para el sistema electrónico de detección de fugas de agua. Estos diagramas permiten visualizar de manera estructurada el

proceso de adquisición, procesamiento, transmisión y análisis de la información generada por los sensores instalados en la red de distribución domiciliaria.

### 3.14.1 Diagrama de flujo del algoritmo del ESP32 principal

El diagrama de flujo mostrado en la Figura 36 describe la secuencia de operación implementada en la tarjeta principal basada en el microcontrolador ESP32. El algoritmo realiza la adquisición de las señales provenientes del sensor de presión HK3025 y del sensor de flujo YF-S201, efectúa el procesamiento de los datos obtenidos y transmite la información al servidor mediante comunicación TCP/IP. Asimismo, permite recibir comandos remotos para el accionamiento de la electroválvula instalada en la red de distribución de agua.

**Figura 36**

Diagrama de flujo del algoritmo implementado en la tarjeta principal basada en el microcontrolador ESP32.



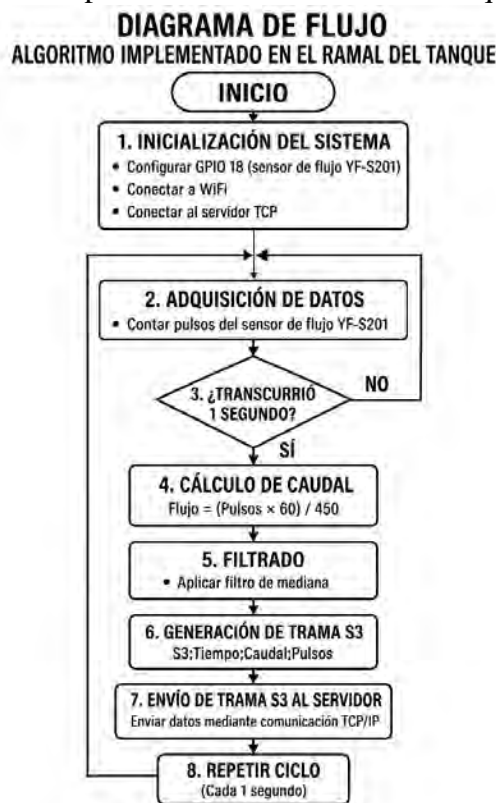
Fuente: Elaboración propia.

### 3.14.2 Diagrama de flujo del algoritmo implementado en el ramal del tanque

El diagrama de flujo mostrado en la Figura 37 describe el algoritmo ejecutado por el ESP32 asociado al ramal del tanque. El dispositivo realiza la adquisición de los pulsos generados por el sensor de flujo YF-S201, calcula el caudal instantáneo, aplica un proceso de filtrado y transmite la información al servidor mediante comunicación TCP/IP para su posterior procesamiento dentro del sistema de detección de fugas de agua.

**Figura 37**

Diagrama de flujo del algoritmo implementado en el ramal del tanque.



Fuente: Elaboración propia.

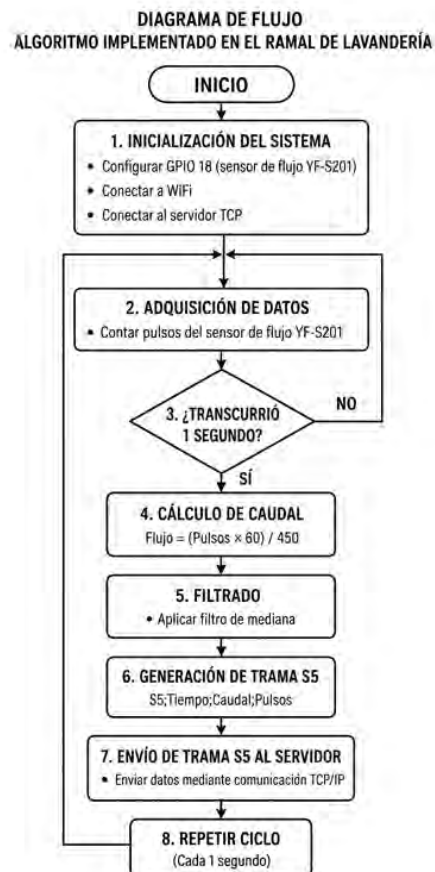
### 3.14.3 Diagrama de flujo del algoritmo implementado en el ramal de lavandería

El diagrama de flujo mostrado en la Figura 38 describe el algoritmo ejecutado por el ESP32 asociado al ramal de lavandería. El dispositivo realiza la adquisición de los pulsos generados por el sensor de flujo YF-S201, calcula el caudal instantáneo, aplica un proceso de

filtrado y transmite la información al servidor mediante comunicación TCP/IP para su posterior procesamiento dentro del sistema de detección de fugas de agua.

### Figura 38

Diagrama de flujo del algoritmo implementado en el ramal de lavandería.

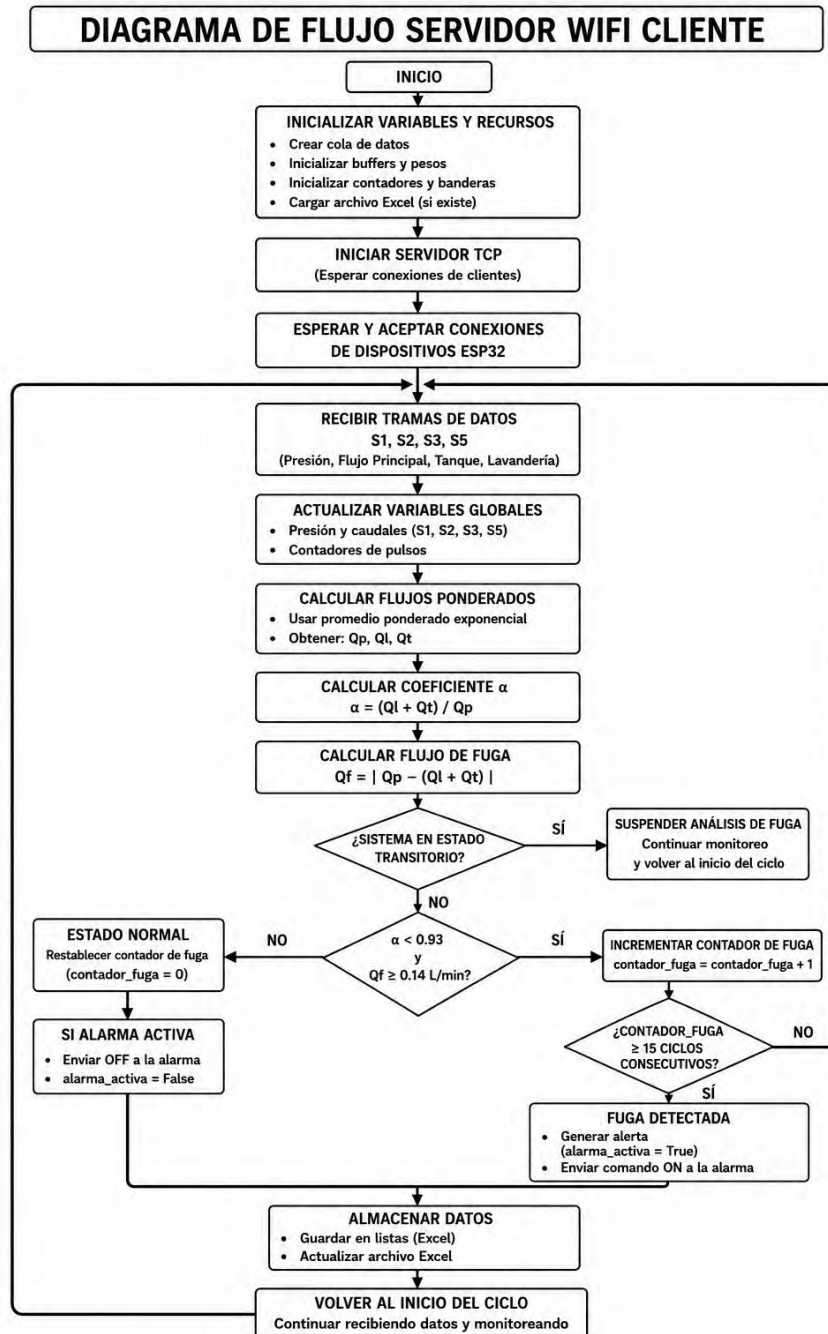


Fuente: Elaboración propia.

### 3.14.4 Diagrama de flujo del servidor WiFi cliente

Figura 39

Diagrama de flujo del servidor WiFi cliente.

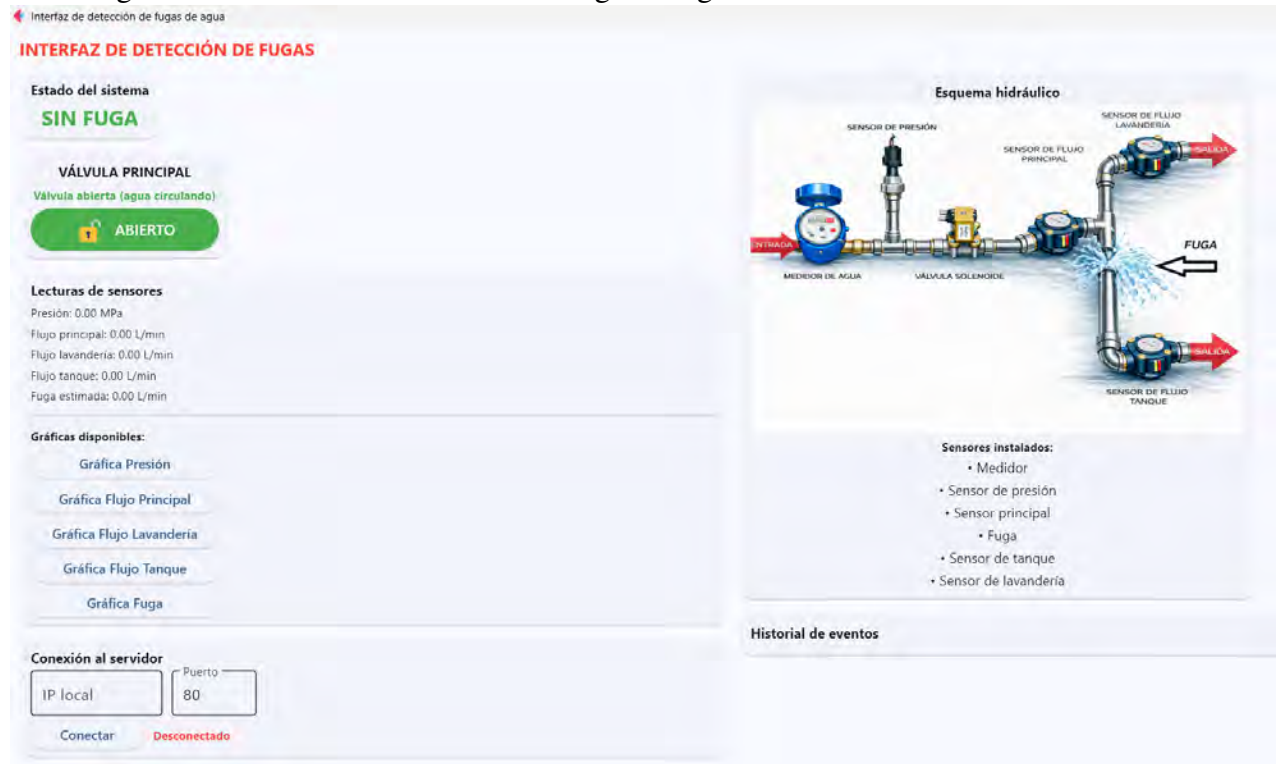


Fuente: Elaboración propia.

### 3.15 Interfaz de Visualización Local con Flet (Python)

Figura 40

Interfaz gráfica del sistema de detección de fugas de agua.



Fuente: Elaboración propia.

El diseño de la interfaz gráfica mostrada en la Figura 40 constituye un componente clave para el monitoreo y la supervisión del sistema electrónico de detección de fugas de agua. Esta interfaz fue desarrollada con el propósito de centralizar la información proveniente de los sensores instalados en la red hidráulica domiciliaria y presentarla de manera clara, ordenada y fácilmente interpretable por el usuario en tiempo real.

A partir del gráfico, se observa que la interfaz permite visualizar el estado general del sistema, indicando de forma inmediata la condición de operación mediante mensajes como “sin fuga”, lo cual facilita una rápida interpretación del funcionamiento hidráulico. Asimismo, se muestra el estado de la válvula principal, indicando si se encuentra abierta o cerrada, lo que resulta esencial para el control del suministro de agua ante la detección de una anomalía.

La sección de lecturas de sensores presenta los valores de presión y caudal medidos en los distintos puntos de la red, incluyendo el flujo principal, el ramal de lavandería y el ramal

del tanque. Esta información permite verificar el equilibrio hidráulico del sistema y detectar discrepancias entre los caudales, las cuales podrían asociarse a la presencia de fugas. La visualización numérica directa de estos parámetros contribuye a una supervisión eficiente y reduce la posibilidad de errores en la interpretación de los datos.

La interfaz también incorpora herramientas gráficas que permiten al usuario seleccionar y visualizar en tiempo real las curvas de presión y caudal correspondientes a cada sensor. Al presionar los botones asociados al flujo principal, lavandería o tanque, se despliega una gráfica temporal que muestra la evolución de las variables medidas. Esta representación gráfica facilita el análisis dinámico del comportamiento del sistema, permitiendo identificar variaciones bruscas, fluctuaciones anómalas o tendencias que podrían indicar fallas hidráulicas o eventos de fuga.

Adicionalmente, el esquema hidráulico incluido en la interfaz cumple una función descriptiva y didáctica, ya que muestra de manera visual la disposición de los sensores dentro de la red, así como la relación entre el medidor, el sensor de presión y los distintos ramales. Esta representación ayuda al usuario a correlacionar los valores medidos con su ubicación física en el sistema, mejorando la comprensión global del funcionamiento de la red.

Finalmente, la interfaz integra el módulo de conexión al servidor local mediante comunicación inalámbrica, mostrando la dirección IP y el puerto de enlace utilizados para la transmisión de datos. Esta característica permite el monitoreo remoto del sistema y garantiza la recepción continua de la información generada por los nodos de medición, consolidando una plataforma de supervisión confiable y adecuada para aplicaciones reales de detección de fugas en redes domiciliarias.

## Capítulo 4

### 4 PRUEBAS Y RESULTADOS

#### 4.1 Fundamento de detección en condición de reposo

##### 4.1.1 Fundamento de la detección en condición de reposo

En la condición de reposo de la red hidráulica, la tubería principal permanece habilitada para el suministro de agua, mientras que los ramales de lavandería y tanque permanecen sin consumo al mantenerse cerradas sus respectivas griferías. Bajo esta condición no debería existir circulación de agua hacia los puntos de consumo monitoreados, por lo que los sensores de caudal registran un valor igual a cero. Este estado constituye la línea base del sistema y sirve como referencia para evaluar el comportamiento hidráulico de la red.

Cuando el sistema opera en condición de reposo y no existe fuga, los sensores de caudal permanecen en cero, confirmando la ausencia de circulación de agua hacia los puntos de consumo. Por el contrario, si se detecta un flujo residual en la tubería principal que supera el umbral de detección establecido y esta condición persiste durante el intervalo de validación temporal definido por el algoritmo, el sistema confirma la presencia de una fuga en la red hidráulica.

Esta condición de referencia permite diferenciar de manera confiable una red en reposo sin pérdidas de agua de una condición anómala asociada a una fuga, constituyendo el fundamento para la validación experimental de los Casos 1A y 1B.

##### 4.1.2 Interpretación matemática del caso con todos los puntos cerrados y presencia de fuga

En esta condición experimental, los ramales de lavandería y tanque permanecen sin consumo, por lo que sus caudales son aproximadamente nulos. En consecuencia, el balance de caudales del sistema se expresa como:

$$Q_{\text{fuga}} = Q_{\text{principal}} - (Q_{\text{lavandería}} + Q_{\text{tanque}}) \quad (27)$$

Dado que durante el ensayo se cumple que

$$Q_{\text{lavandería}} \approx 0, \quad Q_{\text{tanque}} \approx 0, \quad (28)$$

el balance anterior se simplifica a:

$$Q_{\text{fuga}} \approx Q_{\text{principal}} \quad (29)$$

Esta expresión indica que, en presencia de una fuga y bajo condición de reposo, el caudal medido en la tubería principal corresponde aproximadamente al caudal asociado a la fuga, constituyendo el criterio utilizado para el análisis de los resultados experimentales del Caso 1B.

### 4.1.3 Resumen de los casos experimentales

**Tabla 13**

Resumen de los casos experimentales considerados para la validación del sistema.

| <b>Caso</b> | <b>Condición evaluada</b>                                                                                                  |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Caso 1A     | Tubería principal abierta, ramal del tanque sin consumo y ramal de lavandería sin consumo, sin presencia de fuga.          |
| Caso 1B     | Tubería principal abierta, ramal del tanque sin consumo y ramal de lavandería sin consumo, con presencia de fuga.          |
| Caso 2A     | Tubería principal abierta, ramal de lavandería en consumo y ramal del tanque sin consumo, sin presencia de fuga.           |
| Caso 2B     | Tubería principal abierta, ramal de lavandería en consumo y ramal del tanque sin consumo, con presencia de fuga.           |
| Caso 3A     | Tubería principal abierta, ramal del tanque en consumo y ramal de lavandería sin consumo, sin presencia de fuga.           |
| Caso 3B     | Tubería principal abierta, ramal del tanque en consumo y ramal de lavandería sin consumo, con presencia de fuga.           |
| Caso 4A     | Tubería principal abierta, ramal del tanque en consumo y ramal de lavandería en consumo simultáneo, sin presencia de fuga. |
| Caso 4B     | Tubería principal abierta, ramal del tanque en consumo y ramal de lavandería en consumo simultáneo, con presencia de fuga. |

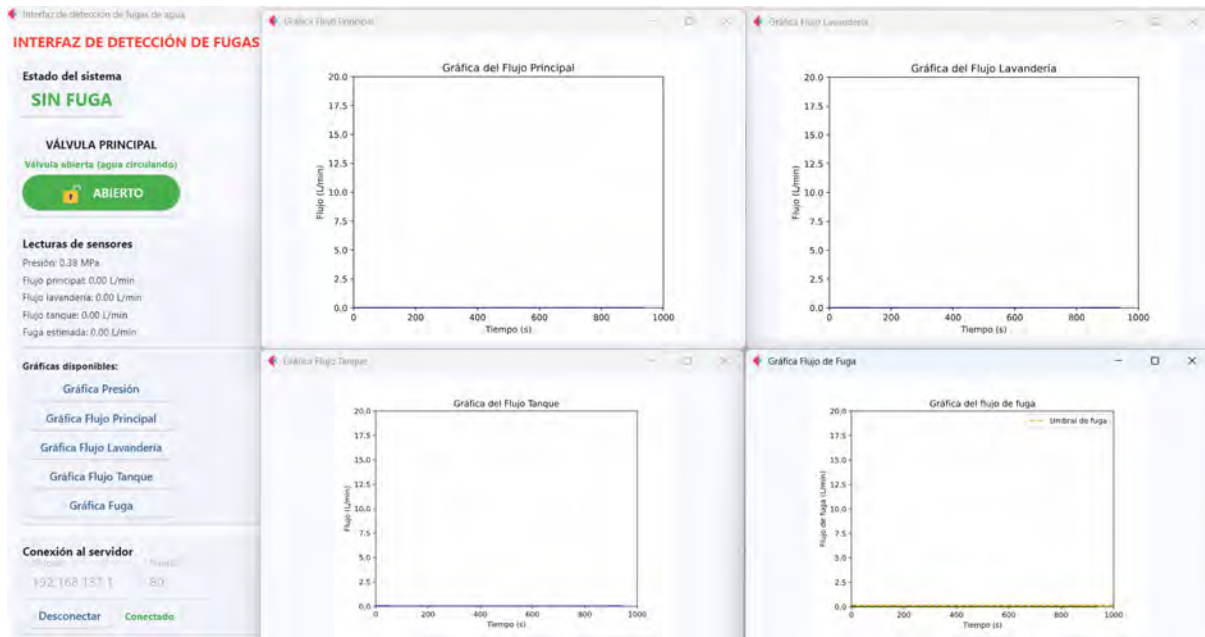
Fuente: Elaboración propia.

## 4.2 Caso 1:Evaluación del sistema en condición de reposo de la red hidráulica

### 4.2.1 Condición sin fuga con la tubería principal abierta y los ramales de lavandería y tanque sin consumo

Figura 41

Interfaz gráfica del sistema de detección de fugas de agua durante la condición sin fuga.



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.2 Validación experimental del sistema en ausencia de fuga

**Tabla 14**

Análisis por tramos del sistema en condición de reposo hidráulico y ausencia de fuga.

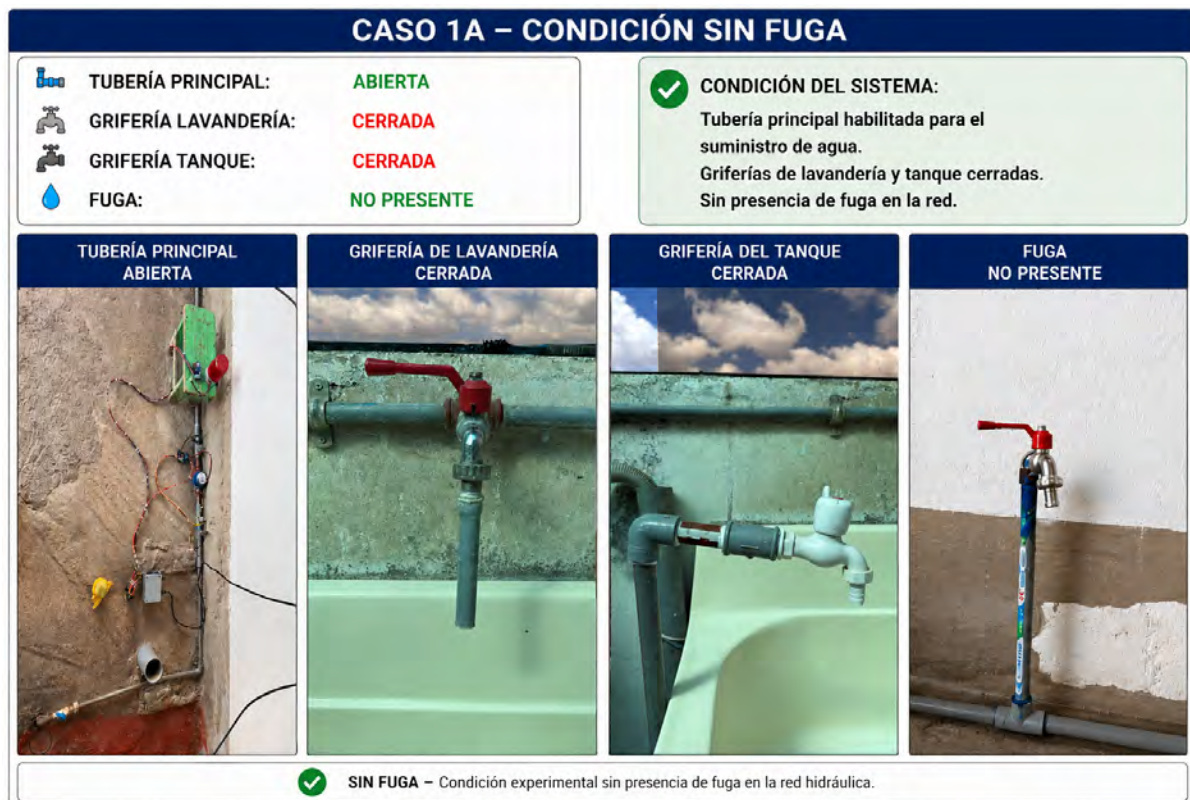
| Ensayo | Intervalo (s) | $Q_{\text{principal}}$<br>(L/min) | $Q_{\text{lavandería}}$<br>(L/min) | $Q_{\text{tanque}}$<br>(L/min) | $Q_{\text{fuga}}$<br>(L/min) | $\alpha$ |
|--------|---------------|-----------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|------------------------------|----------|
| 1      | 0–185         | 0.00                              | 0.00                               | 0.00                           | 0.00                         | 1.00     |
| 2      | 185–370       | 0.00                              | 0.00                               | 0.00                           | 0.00                         | 1.00     |
| 3      | 370–555       | 0.00                              | 0.00                               | 0.00                           | 0.00                         | 1.00     |
| 4      | 555–740       | 0.00                              | 0.00                               | 0.00                           | 0.00                         | 1.00     |
| 5      | 740–925       | 0.00                              | 0.00                               | 0.00                           | 0.00                         | 1.00     |

Fuente: Elaboración propia.

### 4.2.3 Evidencia experimental del Caso 1A

**Figura 42**

Condición experimental correspondiente al Caso 1A sin presencia de fuga en la red hidráulica.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 42 muestra la configuración experimental utilizada para validar el funcionamiento del sistema en ausencia de fugas. En esta condición, la tubería principal permanece habilitada para el suministro de agua, mientras que las griferías de lavandería y tanque se mantienen cerradas. Asimismo, no se presenta ninguna fuga en la red hidráulica, por lo que el sistema opera bajo condiciones normales de funcionamiento.

### 4.2.4 Análisis e interpretación en ausencia de fuga

La Tabla 14 y la Figura 41 presentan los resultados obtenidos durante el ensayo realizado con la tubería principal, el ramal de lavandería y el ramal del tanque sin circulación de agua y sin presencia de fuga. Los resultados muestran que durante todo el periodo de evaluación el sistema permaneció en condición de reposo hidráulico, sin registrarse flujo en ninguno de los

puntos monitoreados.

Los valores de caudal registrados en la tubería principal, el ramal de lavandería y el ramal del tanque permanecieron en 0.00 L/min durante todos los intervalos analizados. Asimismo, el caudal de fuga estimado fue igual a 0.00 L/min y el coeficiente de distribución  $\alpha$  se mantuvo constante en un valor de 1.00 durante toda la prueba.

Estos resultados evidencian que el sistema operó bajo condiciones normales de funcionamiento, sin detectar circulación de agua ni pérdidas en la red hidráulica. La ausencia simultánea de caudal en todos los sensores confirma que no existieron consumos ni fugas durante el ensayo.

Particularmente, en la Figura 47 se observa el tramo final del ensayo, correspondiente al intervalo comprendido entre 740 s y 925 s, cuyos resultados se presentan en la Tabla 14. Durante este intervalo los sensores continuaron registrando valores de 0.00 L/min en la tubería principal, el ramal de lavandería y el ramal del tanque. De igual manera, el caudal de fuga estimado permaneció en 0.00 L/min y el coeficiente de distribución conservó un valor de 1.00.

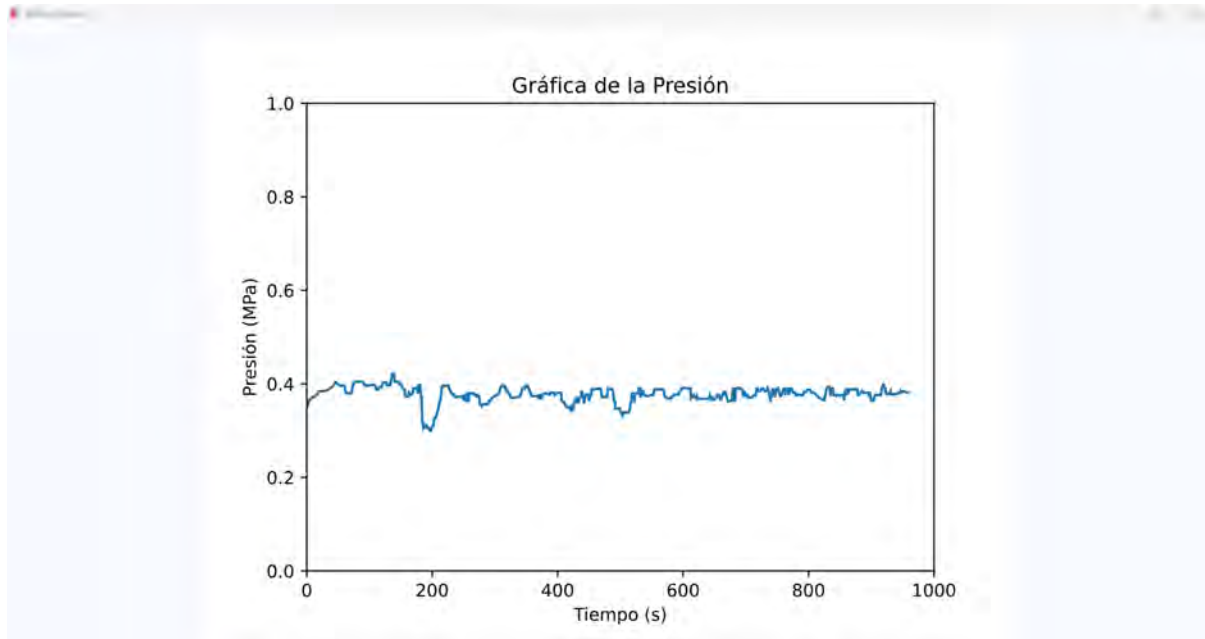
La estabilidad observada en este último intervalo confirma que el sistema no genera falsas detecciones de fuga cuando la red se encuentra completamente cerrada y sin circulación de agua. Además, demuestra que los algoritmos de procesamiento implementados son capaces de diferenciar correctamente una condición de reposo hidráulico de una condición real de fuga.

Por lo tanto, los resultados obtenidos validan el correcto funcionamiento del sistema en ausencia de consumo y ausencia de fuga, garantizando que la detección de eventos se produzca únicamente cuando existen variaciones reales en los caudales monitoreados.

#### 4.2.5 Análisis de la presión durante la condición sin fuga

**Figura 43**

Comportamiento de la presión registrada durante la condición sin presencia de fuga.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 43 se observa el comportamiento de la presión registrada durante la condición de operación con presencia de fuga. Los resultados muestran que la presión del sistema se mantuvo dentro de un rango aproximado comprendido entre 0.30 MPa y 0.41 MPa durante todo el periodo de evaluación.

Las variaciones observadas corresponden a pequeñas fluctuaciones propias del funcionamiento hidráulico de la red y de la dinámica de medición del sensor. Aunque se presentan ligeras disminuciones de presión en algunos intervalos, no se evidencian caídas bruscas ni reducciones sostenidas que permitan identificar de manera directa la presencia de una fuga únicamente a partir de la variable presión.

Particularmente, alrededor de los 180 s se registra una disminución temporal de la presión hasta valores cercanos a 0.30 MPa; sin embargo, posteriormente la señal recupera su nivel normal de operación, manteniéndose estable durante el resto del ensayo. De manera similar, entre los 450 s y 520 s se observan pequeñas oscilaciones que no afectan significativamente el

comportamiento general del sistema.

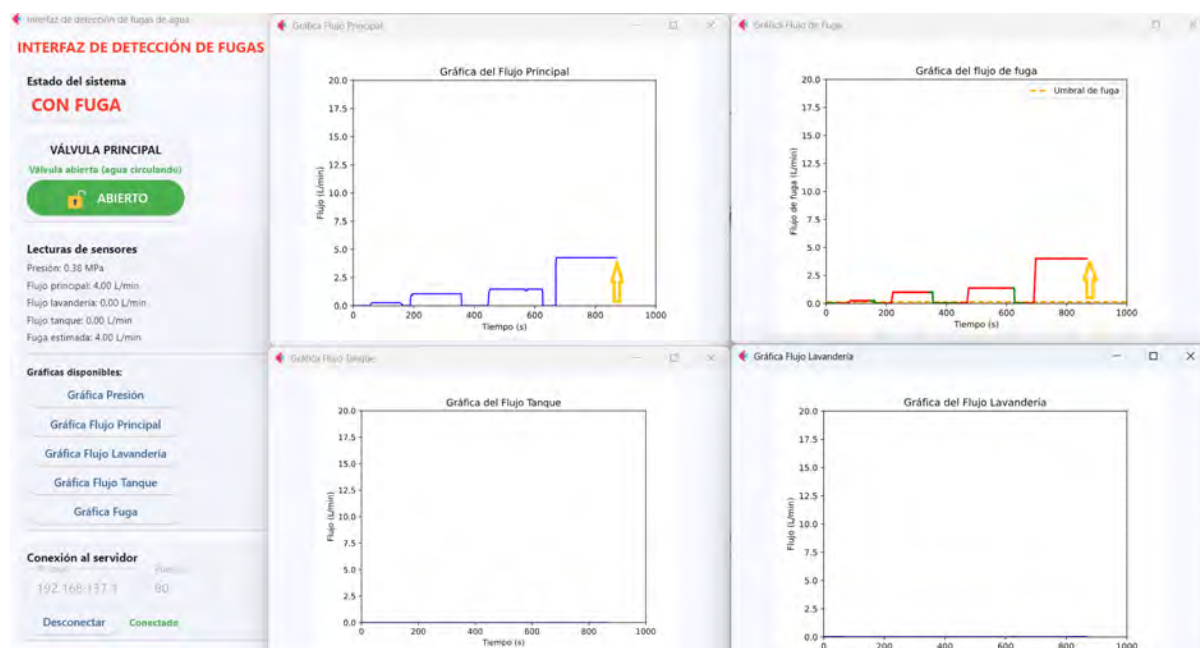
Estos resultados indican que la presión no presenta una variación suficientemente significativa para utilizarse como criterio principal de detección de fugas en las condiciones evaluadas. En consecuencia, la identificación de la fuga se realiza principalmente mediante el análisis del balance de caudales y del coeficiente de distribución  $\alpha$ , los cuales permiten detectar de forma más confiable las pérdidas de agua en la red hidráulica.

Por lo tanto, la presión actúa como una variable complementaria de monitoreo, mientras que la detección efectiva de fugas se fundamenta en la diferencia entre el caudal suministrado por la tubería principal y el caudal registrado en los puntos de consumo.

#### 4.2.6 Condición con fuga con la tubería principal abierta y los ramales de lavandería y tanque sin consumo

**Figura 44**

Interfaz gráfica del sistema durante la condición de operación con la tubería principal activa, los ramales de lavandería y tanque en reposo, con presencia de fuga.



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.7 Validación experimental del sistema con fuga

**Tabla 15**

Análisis por tramos del caso con todos los puntos cerrados y presencia de fuga.

| Ensayo | Intervalo (s) | $Q_{\text{principal}}$<br>(L/min) | $Q_{\text{lavandería}}$<br>(L/min) | $Q_{\text{tanque}}$<br>(L/min) | $Q_{\text{fuga}}$<br>(L/min) | $\alpha$ | Interpretación  |
|--------|---------------|-----------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|------------------------------|----------|-----------------|
| 1      | 60–170        | 0.2                               | 0.0                                | 0.0                            | 0.2                          | 0.00     | Fuga leve       |
| 2      | 170–360       | 1.0                               | 0.0                                | 0.0                            | 1.0                          | 0.00     | Fuga detectable |
| 3      | 360–450       | 0.0                               | 0.0                                | 0.0                            | 0.0                          | 0.00     | Sin circulación |
| 4      | 450–620       | 1.4                               | 0.0                                | 0.0                            | 1.4                          | 0.00     | Fuga detectable |
| 5      | 620–680       | 0.0                               | 0.0                                | 0.0                            | 0.0                          | 0.00     | Sin circulación |
| 6      | 680–880       | 4.0                               | 0.0                                | 0.0                            | 4.0                          | 0.00     | Fuga alta       |

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.8 Evidencia experimental del Caso 1B

Figura 45

Condición experimental del Caso 1B con presencia de fuga en la red hidráulica.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 45 muestra la configuración experimental correspondiente al Caso 1B. En esta condición, la tubería principal permanece abierta permitiendo el suministro de agua hacia la red, mientras que las griferías de lavandería y tanque se mantienen cerradas. Adicionalmente, se genera una fuga controlada en el sistema hidráulico, simulando una pérdida de agua sin consumo autorizado en los ramales monitoreados.

#### 4.2.9 Análisis e interpretación en ausencia de consumo con presencia de fuga

La Tabla 15 y la Figura 44 presentan los resultados obtenidos durante el ensayo realizado con la tubería principal activa y los ramales de lavandería y tanque sin consumo, bajo una condición de fuga. Los resultados muestran que el caudal registrado en la tubería principal corresponde íntegramente al caudal de fuga, debido a que no existe demanda de agua en los

ramales secundarios.

Los valores del coeficiente de distribución  $\alpha$  permanecieron iguales a 0.00 durante todos los intervalos analizados, debido a que los caudales registrados en los ramales de lavandería y tanque fueron nulos. Asimismo, el caudal de fuga estimado presentó valores comprendidos entre 0.20 L/min y 4.00 L/min, superando en varios intervalos el umbral mínimo de detección confiable de 0.14 L/min establecido para el sistema.

Estos resultados evidencian que el sistema identificó correctamente la presencia de fuga, ya que todo el caudal detectado en la tubería principal corresponde a una pérdida de agua, al no existir consumo en los ramales monitoreados. Esta condición genera un desequilibrio hidráulico total, reflejado por el valor nulo del coeficiente de distribución.

Particularmente, en la Figura 44 se ha señalado mediante una marca de color amarillo el intervalo correspondiente al Ensayo 6 (680–880 s), cuyos resultados se presentan en la Tabla 15. Este tramo representa la etapa final de la prueba y corresponde a la condición de fuga de mayor magnitud registrada durante el ensayo.

Durante este intervalo se registró un caudal promedio de 4.0 L/min en la tubería principal, mientras que los caudales medidos en el ramal de lavandería y en el ramal del tanque permanecieron en 0.0 L/min. Asimismo, el caudal de fuga estimado fue igual a 4.0 L/min y el coeficiente de distribución permaneció en 0.00.

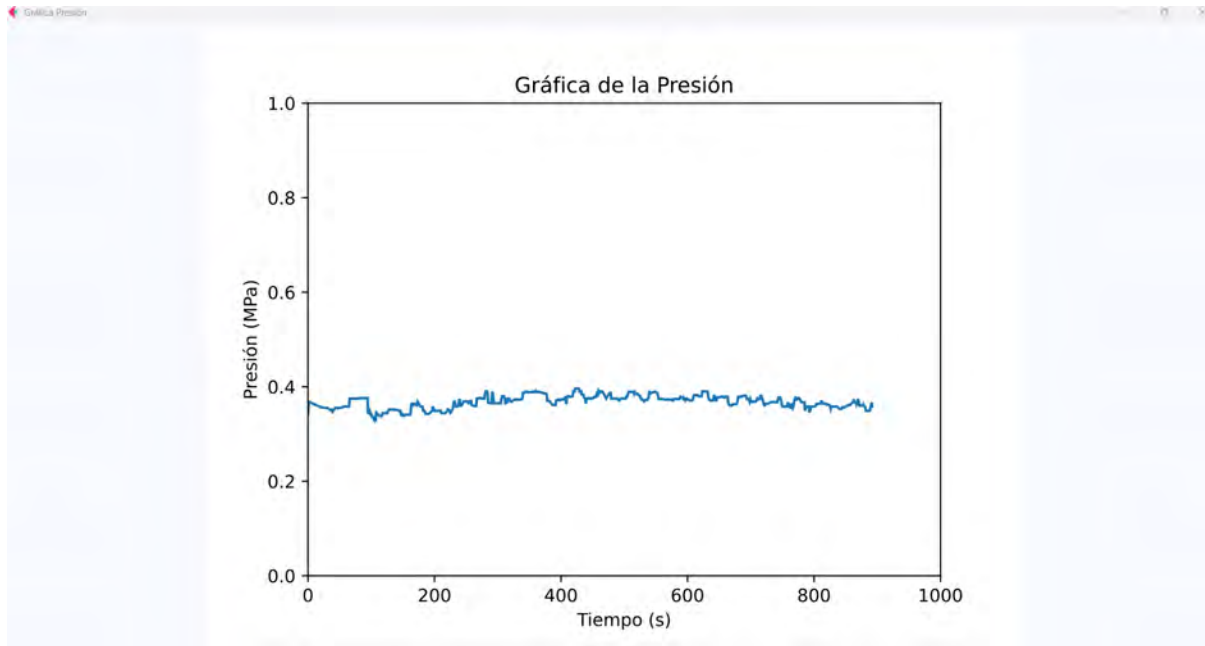
Los resultados obtenidos muestran que la totalidad del caudal suministrado por la tubería principal fue identificada como fuga, debido a que no se registró consumo en ninguno de los ramales monitoreados. Esta condición confirma la existencia de una pérdida de agua significativa en la red hidráulica evaluada.

Por lo tanto, el comportamiento observado en el Ensayo 6 confirma la presencia de una fuga de alta magnitud y demuestra el correcto funcionamiento del algoritmo de detección implementado. La condición de fuga es identificada de manera inequívoca debido a que el caudal de fuga registrado supera ampliamente el umbral mínimo de detección de 0.14 L/min, mientras que los ramales de lavandería y tanque permanecen completamente inactivos durante todo el intervalo analizado.

#### 4.2.10 Análisis de la presión durante la condición sin fuga

**Figura 46**

Comportamiento de la presión del sistema durante la condición de fuga con los ramales de lavandería y tanque en reposo.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 46 muestra el comportamiento de la presión del sistema durante la condición de fuga con los ramales de lavandería y tanque en reposo. Se observa que la presión permanece relativamente estable a lo largo del ensayo, registrando valores comprendidos aproximadamente entre 0.34 MPa y 0.39 MPa. Las variaciones observadas son pequeñas y corresponden al comportamiento normal de la red hidráulica y a las fluctuaciones propias del sistema de medición.

Asimismo, no se evidencian caídas bruscas de presión durante los intervalos en los que se detecta fuga. Esto indica que la red de abastecimiento mantiene una presión suficiente para compensar la pérdida de agua, por lo que la presencia de la fuga no genera una disminución significativa de esta variable. En consecuencia, los resultados experimentales muestran que el balance de caudales constituye el indicador más confiable para la detección de fugas en el sistema desarrollado, mientras que la presión actúa como una variable complementaria de

monitoreo.

### **4.3 Fundamento de detección en condición de consumo**

#### **4.3.1 Teoría de detección de fugas en condición de consumo**

Cuando uno o más puntos de consumo de la red domiciliaria se encuentran abiertos, el agua suministrada por la tubería principal se distribuye hacia los diferentes ramales de consumo. Bajo condiciones normales de operación y en ausencia de fugas, el caudal que ingresa por la tubería principal debe ser aproximadamente igual a la suma de los caudales registrados en los ramales monitoreados, cumpliéndose el principio de conservación de masa.

La presencia de una fuga provoca que una parte del caudal suministrado por la tubería principal no llegue a los puntos de consumo, generando un desbalance entre el caudal de entrada y la suma de los caudales de salida. Esta diferencia corresponde al caudal de fuga y constituye el principal indicador hidráulico utilizado para la detección.

Con el propósito de incrementar la confiabilidad del sistema, el algoritmo no basa la decisión únicamente en el balance de caudales. La detección considera además el coeficiente de distribución  $\alpha$ , el procesamiento digital de las señales de los sensores y la validación temporal de las condiciones detectadas, reduciendo la probabilidad de falsas alarmas durante cambios normales de consumo.

#### **4.3.2 Interpretación matemática del caso con consumo**

Durante las condiciones de consumo, el balance de caudales del sistema se expresa mediante:

$$Q_{\text{fuga}} = Q_{\text{principal}} - (Q_{\text{lavandería}} + Q_{\text{tanque}}) \quad (30)$$

En ausencia de fugas, el sistema satisface aproximadamente la siguiente relación:

$$Q_{\text{principal}} \approx Q_{\text{lavandería}} + Q_{\text{tanque}} \quad (31)$$

En presencia de una fuga, parte del caudal suministrado por la tubería principal no es

registrado en los ramales monitoreados, por lo que se cumple:

$$Q_{\text{principal}} > Q_{\text{lavandería}} + Q_{\text{tanque}} \quad (32)$$

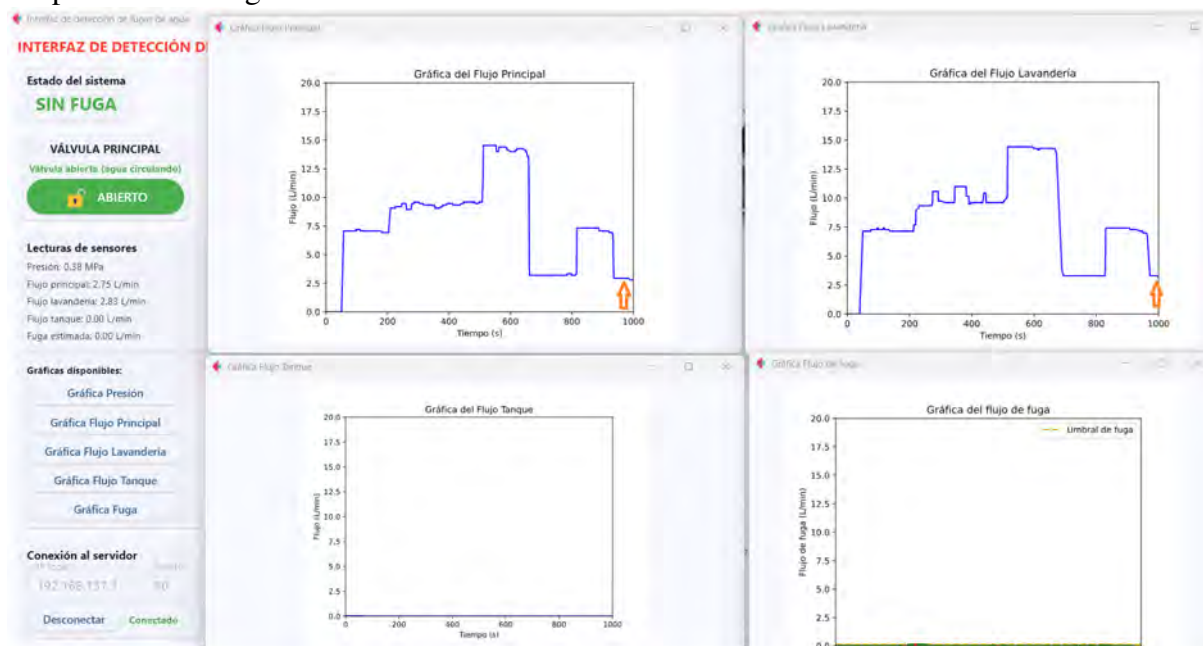
La diferencia entre ambos términos corresponde al caudal de fuga estimado. Posteriormente, el algoritmo evalúa conjuntamente el coeficiente de distribución  $\alpha$ , el caudal de fuga calculado y el criterio de persistencia temporal antes de confirmar la presencia de una fuga en la red hidráulica.

## 4.4 Caso 2: Tubería principal y ramal de lavandería

### 4.4.1 Tubería principal y ramal hacia la lavandería con griferías abiertas sin fuga

**Figura 47**

Interfaz gráfica del sistema de detección de fugas de agua durante la validación experimental sin presencia de fuga.



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.4.2 Validación experimental del sistema en ausencia de fuga

**Tabla 16**

Análisis por ensayos del comportamiento del sistema con flujo principal y ramal de lavandería abiertos en ausencia de fuga.

| Ensayo | Intervalo (s) | $Q_{\text{principal}}$ (L/min) | $Q_{\text{lavandería}}$ (L/min) | $Q_{\text{fuga}}$ (L/min) | $\alpha$ |
|--------|---------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------|----------|
| 1      | 0–100         | 7.2                            | 7.2                             | 0.00                      | 1.00     |
| 2      | 100–180       | 7.2                            | 7.3                             | 0.00                      | 1.01     |
| 3      | 180–280       | 9.2                            | 9.3                             | 0.00                      | 1.01     |
| 4      | 280–380       | 9.3                            | 9.4                             | 0.00                      | 1.01     |
| 5      | 380–500       | 9.4                            | 9.5                             | 0.00                      | 1.01     |
| 6      | 500–580       | 14.4                           | 14.3                            | 0.10                      | 0.99     |
| 7      | 580–660       | 14.1                           | 14.2                            | 0.00                      | 1.01     |
| 8      | 660–800       | 3.3                            | 3.3                             | 0.00                      | 1.00     |
| 9      | 800–930       | 7.2                            | 7.2                             | 0.00                      | 1.0      |
| 10     | 930–1000      | 2.75                           | 2.83                            | 0.00                      | 1.03     |

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.4.3 Evidencia experimental del Caso 2A

**Figura 48**

Condición experimental correspondiente al Caso 2A, con consumo en el ramal de lavandería y ausencia de fuga en la red hidráulica.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 48 muestra la configuración experimental correspondiente al Caso 2A. En esta condición, la tubería principal permanece habilitada para el suministro de agua y la grifería de lavandería se encuentra abierta, generando consumo de agua en dicho ramal. Por otro lado, la grifería del tanque permanece cerrada y no existe presencia de fuga en la red hidráulica. Esta configuración permite evaluar el comportamiento del sistema bajo una condición de consumo normal en la lavandería.

#### 4.4.4 Análisis e interpretación en ausencia de fuga

La Tabla 16 y la Figura 47 presentan los resultados obtenidos durante el ensayo realizado con la tubería principal y el ramal de lavandería en funcionamiento, sin presencia de fuga. Los resultados muestran una elevada correspondencia entre los caudales registrados en la tubería principal y en el ramal de lavandería durante todo el periodo de evaluación.

Los valores del coeficiente de distribución  $\alpha$  permanecieron comprendidos entre 0.99 y 1.03, encontrándose dentro del rango normal de funcionamiento establecido para el sistema ( $0,93 \leq \alpha \leq 1,20$ ). Asimismo, el caudal de fuga estimado se mantuvo igual a 0.00 L/min en la mayoría de los intervalos analizados, registrándose únicamente un valor máximo de 0.10 L/min entre 500 s y 580 s. Sin embargo, dicho valor se encuentra por debajo del umbral mínimo de detección confiable de 0.14 L/min definido para el sistema, por lo que no corresponde a una fuga real.

Estos resultados evidencian que el sistema mantuvo el equilibrio hidráulico esperado entre el caudal suministrado por la tubería principal y el caudal consumido en el ramal de lavandería, confirmando la ausencia de pérdidas significativas de agua durante todo el ensayo.

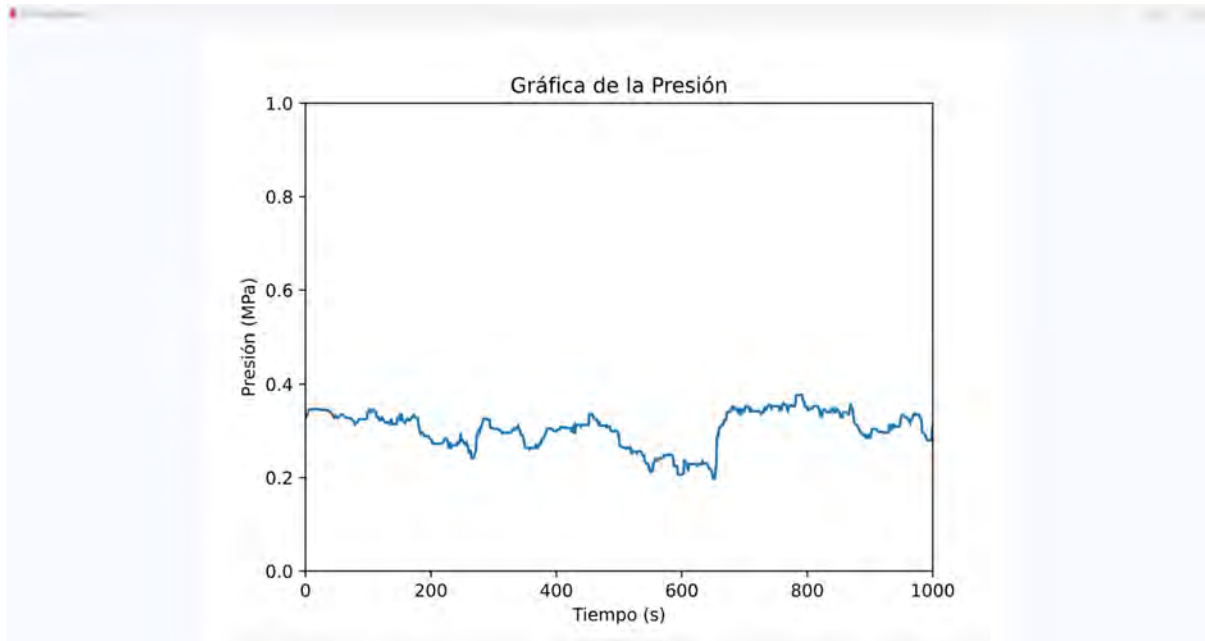
Particularmente, en la Figura 47 se ha señalado el intervalo correspondiente al Ensayo 10 (930–1000 s), debido a que representa la etapa final de la prueba. Durante este intervalo se registró un caudal promedio de 2.75 L/min en la tubería principal y 2.83 L/min en el ramal de lavandería. Asimismo, el coeficiente de distribución alcanzó un valor de 1.03 y el caudal de fuga estimado fue igual a 0.00 L/min.

La disminución observada en este tramo corresponde al cierre progresivo de las griferías del ramal de lavandería y, por consiguiente, a una reducción normal de la demanda de agua. Esta condición es corroborada por el valor de  $\alpha$ , que permanece dentro del rango normal de funcionamiento, así como por la ausencia de caudal de fuga significativo. Por lo tanto, el comportamiento observado en el Ensayo 10 confirma nuevamente que el sistema continuó operando bajo condiciones normales de servicio y sin presencia de fuga hasta la finalización de la prueba.

#### 4.4.5 Análisis de la presión durante la condición sin fuga

**Figura 49**

Comportamiento de la presión registrada durante la condición sin presencia de fuga.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 49 durante la prueba sin presencia de fuga, la presión registrada por el sensor se mantuvo dentro de un rango aproximado de 0.20 MPa a 0.38 MPa. Las variaciones observadas corresponden a los cambios de consumo generados durante los diferentes intervalos del ensayo, produciendo ligeras disminuciones cuando el caudal aumentó y recuperaciones cuando la demanda disminuyó.

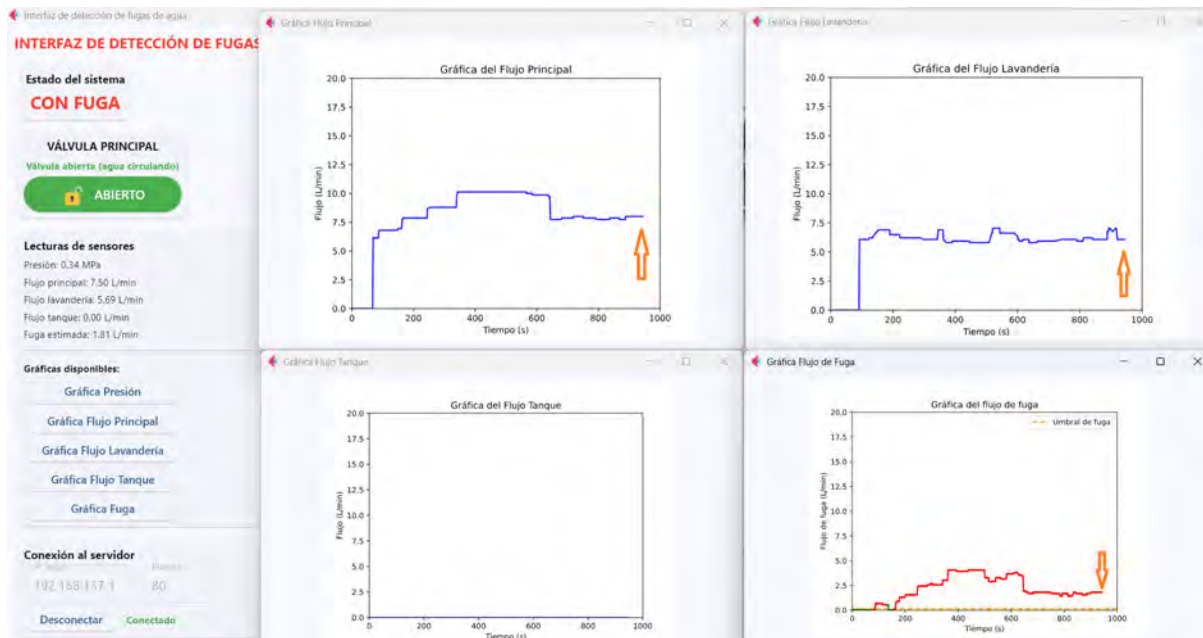
Asimismo, no se identificaron caídas bruscas ni reducciones permanentes de presión que pudieran asociarse a una pérdida de agua en la red. El comportamiento estable de la señal confirma que el sistema operó bajo condiciones normales de funcionamiento, manteniendo el equilibrio hidráulico entre el caudal suministrado y el caudal consumido.

Los resultados obtenidos son consistentes con los valores del coeficiente de distribución reportados en la condición sin fuga, donde  $\alpha$  permaneció cercano a la unidad y el caudal de fuga estimado se mantuvo en 0.00 L/min durante todo el ensayo.

#### 4.4.6 Tubería principal y ramal hacia la lavandería con griferías abiertas con fuga

Figura 50

Interfaz gráfica del sistema durante la condición de operación con presencia de fuga.



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.4.7 Validación experimental del sistema con fuga

**Tabla 17**

Análisis por ensayos del comportamiento del sistema ante diferentes condiciones de fuga en la red hidráulica.

| Ensayo | Intervalo (s) | $Q_{\text{principal}}$ (L/min) | $Q_{\text{lavandería}}$ (L/min) | $Q_{\text{fuga}}$ (L/min) | $\alpha$ | Estado             |
|--------|---------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------|----------|--------------------|
| 1      | 70–140        | 6.80                           | 6.10                            | 0.70                      | 0.90     | Fuga leve          |
| 2      | 140–220       | 7.80                           | 6.20                            | 1.60                      | 0.79     | Fuga detectada     |
| 3      | 220–320       | 8.80                           | 6.20                            | 2.60                      | 0.70     | Fuga detectada     |
| 4      | 320–420       | 10.00                          | 6.00                            | 4.00                      | 0.60     | Fuga significativa |
| 5      | 420–520       | 10.00                          | 6.00                            | 4.00                      | 0.60     | Fuga significativa |
| 6      | 520–620       | 9.80                           | 6.30                            | 3.50                      | 0.64     | Fuga significativa |
| 7      | 620–700       | 7.80                           | 5.80                            | 2.00                      | 0.74     | Fuga detectada     |
| 8      | 700–800       | 7.80                           | 6.00                            | 1.80                      | 0.77     | Fuga detectada     |
| 9      | 800–900       | 7.70                           | 5.90                            | 1.80                      | 0.77     | Fuga detectada     |
| 10     | 900–940       | 7.50                           | 5.69                            | 1.81                      | 0.76     | Fuga detectada     |

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.4.8 Caso 2B: Tubería principal y lavandería en consumo con fuga

Figura 51

Condición experimental del Caso 2B con consumo en lavandería y presencia de fuga.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 51 muestra la configuración experimental correspondiente al Caso 2B. En esta condición, la tubería principal permanece abierta permitiendo el suministro de agua hacia la red, mientras que la grifería del ramal de lavandería se encuentra abierta y en condición de consumo. Por otro lado, la grifería asociada al tanque permanece cerrada, impidiendo el paso de agua por dicho ramal.

Adicionalmente, se genera una fuga controlada en la red hidráulica, produciendo una diferencia entre el caudal medido en la tubería principal y la suma de los caudales registrados en los puntos de consumo monitoreados. Esta condición permite evaluar la capacidad del sistema para detectar fugas durante escenarios de consumo parcial, verificando el desempeño del algoritmo de detección cuando existe simultáneamente una demanda legítima de agua y una

pérdida no autorizada en la red.

#### **4.4.9 Análisis e interpretación con presencia de fuga**

La Tabla 17 y la Figura 50 presentan los resultados obtenidos durante el ensayo realizado con la tubería principal y el ramal de lavandería en funcionamiento, con presencia de fuga. Los resultados muestran diferencias significativas entre los caudales registrados en la tubería principal y en el ramal de lavandería durante todo el periodo de evaluación, evidenciando pérdidas de agua en la red hidráulica.

Los valores del coeficiente de distribución  $\alpha$  permanecieron comprendidos entre 0.60 y 0.90, encontrándose por debajo del rango normal de funcionamiento establecido para el sistema, definido por  $0,93 \leq \alpha \leq 1,20$ . Asimismo, el caudal de fuga estimado presentó valores comprendidos entre 0.70 L/min y 4.00 L/min durante todos los intervalos analizados, superando en todos los casos el umbral mínimo de detección confiable de 0.14 L/min definido para el sistema.

Estos resultados evidencian que el sistema identificó correctamente la presencia de una fuga, debido a que simultáneamente se registraron coeficientes de distribución inferiores al límite establecido y caudales de fuga superiores al umbral mínimo de detección. La diferencia observada entre el caudal suministrado por la tubería principal y el caudal registrado en el ramal de lavandería confirma la existencia de pérdidas de agua dentro de la red evaluada.

Particularmente, en la Figura 50 se ha señalado mediante una marca de color naranja el intervalo correspondiente al Ensayo 10 (900–940 s), cuyos resultados se presentan en la Tabla 17. Este intervalo representa una condición claramente identificable de fuga durante la etapa final de la prueba. Durante este intervalo se registró un caudal promedio de 7.50 L/min en la tubería principal y 5.69 L/min en el ramal de lavandería. Asimismo, el coeficiente de distribución alcanzó un valor de 0.76 y el caudal de fuga estimado fue igual a 1.81 L/min.

La diferencia observada entre ambos caudales evidencia que una parte del agua suministrada por la tubería principal no alcanzó el punto de consumo previsto, siendo asociada a la fuga introducida durante la validación experimental. Esta condición es corroborada por el valor del coeficiente de distribución, el cual permanece por debajo del límite normal de

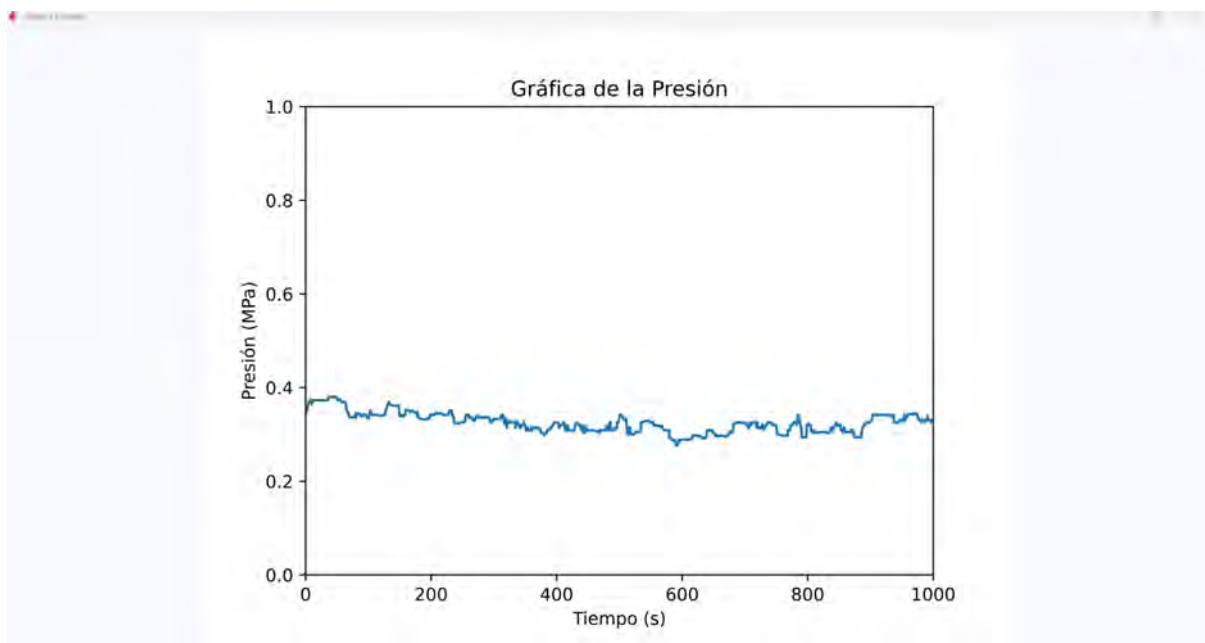
funcionamiento, así como por el caudal de fuga registrado, que supera ampliamente el umbral mínimo de detección establecido para el sistema.

Por lo tanto, el comportamiento observado en el Ensayo 10 confirma nuevamente la presencia de una fuga en la red hidráulica y demuestra el correcto funcionamiento del algoritmo de detección implementado, ya que se cumplen simultáneamente las dos condiciones establecidas para la identificación de fugas: un coeficiente de distribución inferior a 0.93 y un caudal de fuga superior a 0.14 L/min.

#### 4.4.10 Análisis de la presión durante la condición con fuga

**Figura 52**

Comportamiento de la presión registrada durante la condición con presencia de fuga.



Fuente: Elaboración propia.

Durante la prueba con presencia de fuga, la presión registrada por el sensor se mantuvo dentro de un rango aproximado de 0.28 MPa a 0.38 MPa durante los 1000 s de evaluación. La señal presentó pequeñas fluctuaciones alrededor de un valor medio cercano a 0.33 MPa, comportamiento asociado a las variaciones hidráulicas del sistema y a las condiciones de operación establecidas durante el ensayo.

A pesar de la presencia de la fuga, no se observaron caídas bruscas ni reducciones permanentes de presión, debido a que la red continuó siendo alimentada por la fuente de suministro. No obstante, se identificaron ligeras disminuciones de presión en determinados intervalos, especialmente entre los 500 s y 700 s, donde se registraron los valores mínimos de presión cercanos a 0.28 MPa.

Los resultados obtenidos evidencian que la detección de la fuga no dependió exclusivamente de la presión registrada en la red, sino principalmente del análisis de los caudales y del coeficiente de distribución. Durante esta condición experimental se registraron valores de  $\alpha$  inferiores al umbral establecido y caudales de fuga superiores al límite mínimo de detección definido para el sistema, permitiendo identificar correctamente la condición de fuga.

Por tanto, la presión actuó como una variable complementaria de supervisión, mientras que el criterio principal de detección estuvo basado en el desbalance hidráulico existente entre el caudal suministrado por la tubería principal y los caudales medidos en los ramales monitoreados por el sistema.

#### **4.4.11 Análisis e interpretación en presencia de fuga**

En la Tabla 17 se observa una diferencia significativa entre el caudal registrado en la tubería principal y el caudal medido en el ramal de lavandería, lo cual evidencia la presencia de una fuga en el sistema hidráulico. Esta diferencia indica que una fracción del flujo suministrado por la línea principal no alcanza el punto de consumo, siendo desviada a través de la fuga.

Desde el punto de vista físico, este comportamiento representa una pérdida de caudal dentro del sistema, rompiendo el equilibrio hidráulico observado en condiciones normales de operación. A medida que la magnitud de la fuga incrementa, la diferencia entre el caudal de entrada y salida se vuelve más pronunciada, lo que se refleja en un aumento del caudal de fuga estimado.

El coeficiente de distribución  $\alpha$  presenta una disminución progresiva conforme aumenta el caudal de fuga, evidenciando una relación inversa entre ambas variables. Para valores de  $\alpha$  cercanos a 0.90 se identifican fugas leves, mientras que en el rango de 0.76 a 0.81 se presentan fugas claramente detectables. Asimismo, cuando  $\alpha$  desciende por debajo de 0.70, el sistema

clasifica la condición como fuga significativa o severa, alcanzando caudales de fuga de hasta 8.0 L/min.

Este comportamiento confirma que el coeficiente  $\alpha$  es un indicador sensible y confiable para la detección de fugas, ya que permite diferenciar de manera clara entre condiciones normales y anómalas en función de la relación entre los caudales medidos.

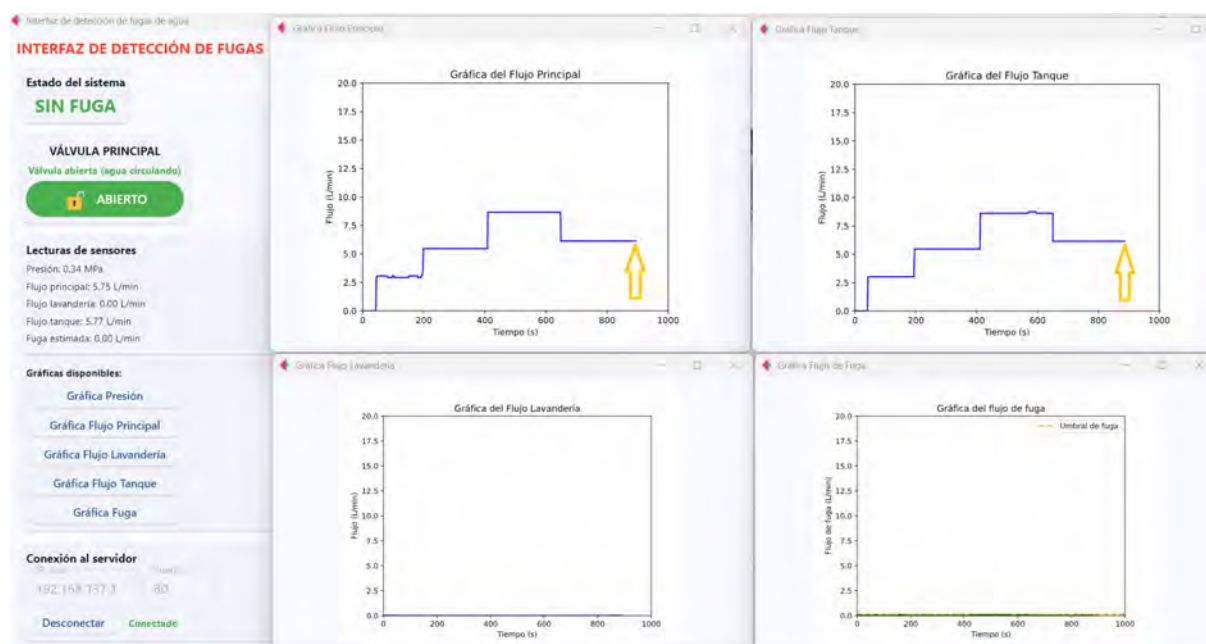
Finalmente, se verifica que el criterio de detección basado en  $\alpha < 0,93$  y un caudal de fuga superior a 0.14 L/min permite identificar de manera efectiva la presencia de fugas en la red hidráulica, validando el correcto funcionamiento del sistema en condiciones de operación con consumo activo.

## 4.5 Caso 3: Tubería principal y ramal de tanque

### 4.5.1 Tubería principal y ramal hacia el tanque con griferías abiertas sin fuga

**Figura 53**

Interfaz gráfica del sistema durante la condición de operación con la tubería principal y el ramal del tanque en funcionamiento, con griferías abiertas y ausencia de fuga.



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.5.2 Validación experimental del sistema sin fuga

**Tabla 18**

Análisis detallado por ensayos del comportamiento del sistema con flujo principal y ramal del tanque abiertos sin presencia de fuga.

| Ensayo | Intervalo (s) | $Q_{\text{principal}}$ (L/min) | $Q_{\text{tanque}}$ (L/min) | $Q_{\text{fuga}}$ (L/min) | $\alpha$ | Estado |
|--------|---------------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------|--------|
| 1      | 0–180         | 3.00                           | 3.00                        | 0.00                      | 1.00     | Normal |
| 2      | 180–220       | 5.50                           | 5.50                        | 0.00                      | 1.00     | Normal |
| 3      | 220–400       | 5.50                           | 5.50                        | 0.00                      | 1.00     | Normal |
| 4      | 400–450       | 8.70                           | 8.70                        | 0.00                      | 1.00     | Normal |
| 5      | 450–620       | 8.70                           | 8.80                        | 0.00                      | 1.01     | Normal |
| 6      | 620–700       | 6.20                           | 6.20                        | 0.00                      | 1.00     | Normal |
| 7      | 700–760       | 6.20                           | 6.20                        | 0.00                      | 1.00     | Normal |
| 8      | 760–820       | 6.20                           | 6.20                        | 0.00                      | 1.00     | Normal |
| 9      | 820–900       | 6.00                           | 6.00                        | 0.00                      | 1.00     | Normal |
| 10     | 900–950       | 5.75                           | 5.77                        | 0.00                      | 1.00     | Normal |

Fuente: Elaboración propia.

### 4.5.3 Evidencia experimental del Caso 3A

**Figura 54**

Condición experimental correspondiente al Caso 3A, con consumo en el ramal del tanque y ausencia de fuga en la red hidráulica.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 54 muestra la configuración experimental correspondiente al Caso 3A. En esta condición, la tubería principal permanece habilitada para el suministro de agua, la grifería de lavandería se mantiene cerrada y la grifería del tanque se encuentra abierta, generando consumo en dicho ramal. Asimismo, no existe presencia de fuga en la red hidráulica, por lo que el sistema opera bajo condiciones normales de distribución de agua con consumo únicamente en el ramal del tanque.

#### 4.5.4 Análisis e interpretación en ausencia de fuga

La Tabla 18 y la Figura 53 presentan los resultados obtenidos durante el ensayo realizado con la tubería principal y el ramal del tanque en funcionamiento, manteniéndose el ramal de lavandería sin consumo y sin presencia de fuga. Los resultados muestran una elevada correspondencia entre los caudales registrados en la tubería principal y en el ramal del tanque durante todo el periodo de evaluación.

Los valores del coeficiente de distribución  $\alpha$  permanecieron comprendidos entre 1.00 y 1.01, encontrándose dentro del rango normal de funcionamiento establecido para el sistema, definido por  $0,93 \leq \alpha \leq 1,20$ . Asimismo, el caudal de fuga estimado se mantuvo igual a 0.00 L/min durante todos los intervalos analizados, sin registrarse diferencias significativas entre el caudal suministrado por la tubería principal y el caudal consumido en el ramal del tanque.

Estos resultados evidencian que el sistema mantuvo el equilibrio hidráulico esperado entre el caudal de entrada y el caudal de salida durante todo el ensayo, confirmando la ausencia de pérdidas significativas de agua en la red de distribución evaluada.

Particularmente, en la Figura 53 se ha señalado mediante una marca de color amarillo el intervalo correspondiente al Ensayo 10 (900–950 s), cuyos resultados se presentan en la Tabla 18. Este intervalo representa la etapa final de la prueba y permite verificar el comportamiento del sistema antes de concluir el ensayo experimental.

Durante este intervalo se registró un caudal promedio de 5.75 L/min en la tubería principal y 5.77 L/min en el ramal del tanque. Asimismo, el coeficiente de distribución alcanzó un valor de 1.00 y el caudal de fuga estimado fue igual a 0.00 L/min. Estos resultados muestran que prácticamente la totalidad del caudal suministrado por la tubería principal fue registrada en el ramal del tanque, manteniéndose el equilibrio hidráulico característico de una condición normal de funcionamiento.

La ligera diferencia observada entre ambos caudales corresponde a las tolerancias propias del sistema de medición y no representa una pérdida real de agua. Esta condición es corroborada por el valor del coeficiente de distribución, que permanece dentro del rango normal de funcionamiento, así como por la ausencia total de caudal de fuga registrado por el sistema.

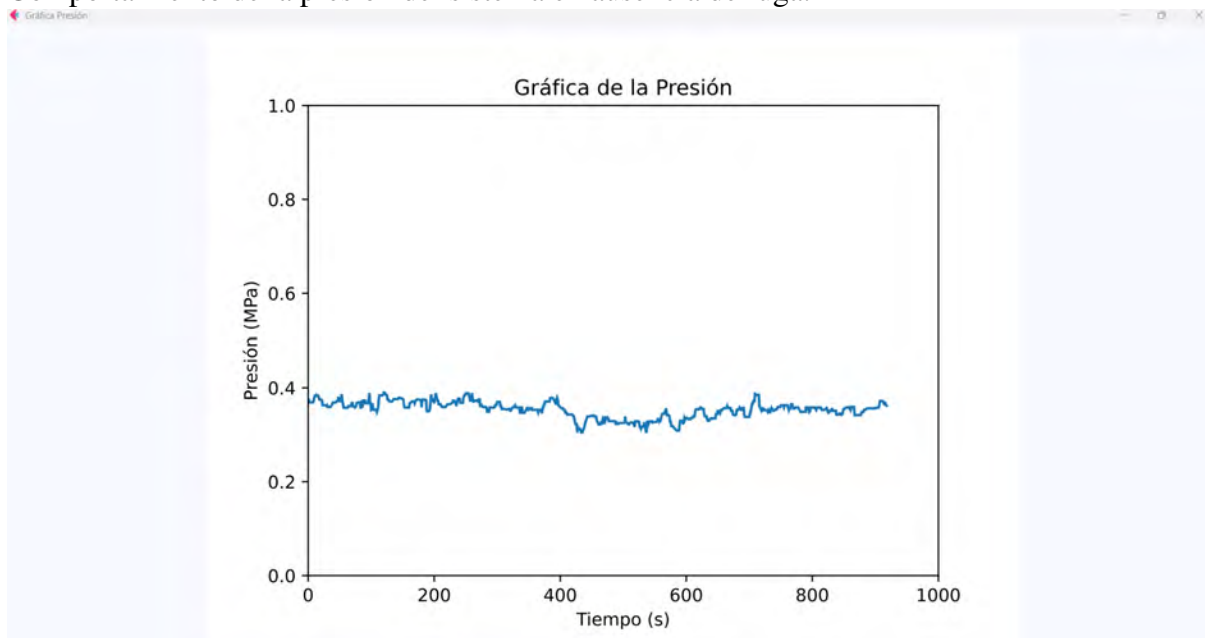
Por lo tanto, el comportamiento observado en el Ensayo 10 confirma nuevamente que

el sistema continuó operando bajo condiciones normales de servicio y sin presencia de fuga hasta la finalización de la prueba. En consecuencia, los resultados obtenidos validan el correcto funcionamiento del algoritmo de detección implementado, ya que el coeficiente de distribución permaneció cercano a la unidad y el caudal de fuga se mantuvo nulo durante todo el periodo de evaluación.

#### 4.5.5 Análisis de la presión durante la condición con fuga

**Figura 55**

Comportamiento de la presión del sistema en ausencia de fuga.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 55 presenta el comportamiento de la presión durante la validación experimental del sistema con flujo en la tubería principal y consumo en el ramal del tanque, manteniendo el ramal de lavandería en reposo y sin presencia de fuga.

Se observa que la presión se mantuvo estable durante todo el periodo de evaluación, registrando valores comprendidos aproximadamente entre 0.32 MPa y 0.39 MPa, con un valor promedio cercano a 0.35 MPa. Las pequeñas fluctuaciones observadas corresponden al comportamiento normal de la red hidráulica y a las variaciones inherentes al proceso de medición del sensor de presión.

Asimismo, no se evidencian caídas bruscas ni descensos sostenidos de presión que indiquen pérdidas de agua o alteraciones en la operación del sistema. Aunque se aprecia una ligera reducción temporal de la presión entre los 420 s y 600 s, esta se mantiene dentro del rango normal de funcionamiento y posteriormente recupera su valor promedio.

Los resultados obtenidos demuestran que, en ausencia de fuga y con el ramal del tanque en operación, la presión de la red domiciliaria permanece estable durante todo el ensayo, garantizando condiciones adecuadas para la distribución del agua. Esta estabilidad confirma además que el sistema opera correctamente bajo condiciones normales de suministro, sin presentar anomalías hidráulicas asociadas a pérdidas de agua.

#### **4.5.6 Análisis e interpretación en ausencia de fuga**

En la Tabla 18 se observa que el caudal registrado en la tubería principal y en el ramal del tanque presenta valores muy similares en todos los ensayos, con diferencias mínimas del orden de 0.0 a 0.1 L/min. Esta correspondencia indica que el flujo suministrado por la línea principal es transferido casi en su totalidad hacia el tanque, evidenciando un adecuado comportamiento hidráulico del sistema en condiciones normales de operación.

El coeficiente de distribución  $\alpha$  se mantiene en un rango cercano a la unidad ( $0,98 \leq \alpha \leq 1,02$ ), lo cual confirma el equilibrio entre el caudal de entrada y salida. Desde el punto de vista físico, esto implica que no existen pérdidas significativas en la red, cumpliéndose el balance de caudales dentro del sistema hidráulico.

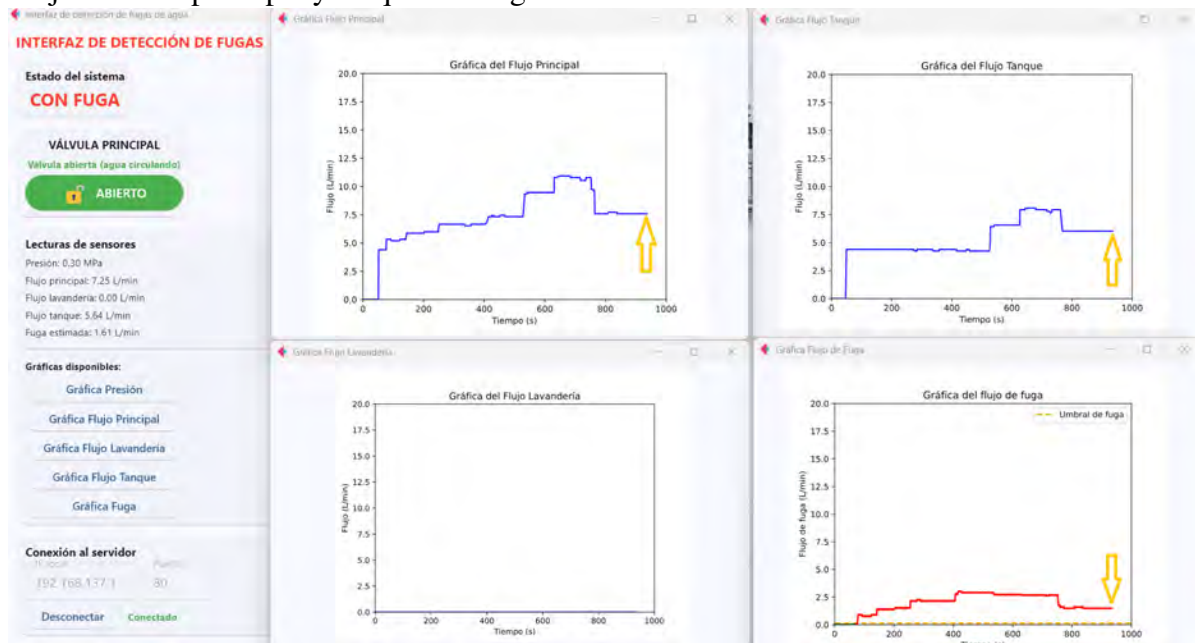
Asimismo, el caudal de fuga estimado presenta valores aproximadamente nulos, con pequeñas variaciones atribuibles a errores instrumentales, tales como tolerancias de calibración, cuantización en el conteo de pulsos y fluctuaciones propias del flujo. Estas variaciones son de baja magnitud y no afectan la validez del modelo de detección implementado.

En consecuencia, el sistema identifica correctamente esta condición como ausencia de fuga, manteniendo el coeficiente  $\alpha$  dentro del rango normal de operación. Este comportamiento valida el adecuado desempeño del sistema en condiciones de consumo en el ramal del tanque.

#### 4.5.7 Tubería principal y ramal hacia el tanque con griferías abiertas con fuga

Figura 56

Flujo en línea principal y tanque con fuga.



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.5.8 Validación experimental del sistema con fuga

**Tabla 19**

Análisis detallado por ensayos del comportamiento del sistema con flujo principal y ramal del tanque abiertos con presencia de fuga.

| Ensayo | Intervalo (s) | $Q_{\text{principal}}$ (L/min) | $Q_{\text{tanque}}$ (L/min) | $Q_{\text{fuga}}$ (L/min) | $\alpha$ | Estado             |
|--------|---------------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------|--------------------|
| 1      | 0–80          | 4.50                           | 4.40                        | 0.10                      | 0.98     | Sin Fuga           |
| 2      | 80–180        | 5.50                           | 4.40                        | 1.10                      | 0.80     | Fuga detectada     |
| 3      | 180–300       | 6.00                           | 4.40                        | 1.60                      | 0.73     | Fuga detectada     |
| 4      | 300–420       | 6.70                           | 4.40                        | 2.30                      | 0.66     | Fuga significativa |
| 5      | 420–520       | 7.40                           | 4.40                        | 3.00                      | 0.59     | Fuga significativa |
| 6      | 520–620       | 9.40                           | 6.50                        | 2.90                      | 0.69     | Fuga detectada     |
| 7      | 620–760       | 10.80                          | 8.00                        | 2.80                      | 0.74     | Fuga detectada     |
| 8      | 760–820       | 7.60                           | 6.00                        | 1.60                      | 0.79     | Fuga detectada     |
| 9      | 820–900       | 7.50                           | 6.00                        | 1.50                      | 0.80     | Fuga detectada     |
| 10     | 900–980       | 7.25                           | 5.64                        | 1.61                      | 0.78     | Fuga detectada     |

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.5.9 Evidencia experimental del Caso 3B

Figura 57

Condición experimental del Caso 3B: consumo en el ramal del tanque con presencia de fuga.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 57 muestra la evidencia experimental correspondiente al Caso 3B. En esta condición de ensayo, la tubería principal permaneció abierta, el ramal de lavandería se mantuvo cerrado y el ramal del tanque operó en condición de consumo. Asimismo, se incorporó una fuga controlada en la red hidráulica con el propósito de evaluar la capacidad del sistema para detectar pérdidas de agua durante el abastecimiento del tanque.

#### 4.5.10 Análisis e interpretación con presencia de fuga

La Tabla 19 y la Figura 56 presentan los resultados obtenidos durante el ensayo realizado con la tubería principal y el ramal del tanque en funcionamiento, manteniéndose el ramal de lavandería sin consumo y con presencia de fuga. Los resultados muestran diferencias

significativas entre los caudales registrados en la tubería principal y en el ramal del tanque durante todo el periodo de evaluación, evidenciando pérdidas de agua en la red hidráulica.

Los valores del coeficiente de distribución  $\alpha$  permanecieron comprendidos entre 0.59 y 0.98. Exceptuando el Ensayo 1, todos los valores registrados se encuentran por debajo del rango normal de funcionamiento establecido para el sistema, definido por  $0,93 \leq \alpha \leq 1,20$ . Asimismo, el caudal de fuga estimado presentó valores comprendidos entre 0.10 L/min y 3.00 L/min durante los diferentes intervalos analizados.

Estos resultados evidencian que el sistema identificó correctamente la presencia de una fuga, debido a que se registraron diferencias entre el caudal suministrado por la tubería principal y el caudal consumido en el ramal del tanque. Conforme aumentó la magnitud de la fuga, el coeficiente de distribución disminuyó progresivamente, reflejando el desequilibrio hidráulico generado por la pérdida de agua en la red.

Particularmente, en la Figura 56 se ha señalado mediante una marca de color amarillo el intervalo correspondiente al Ensayo 10 (900–980 s), cuyos resultados se presentan en la Tabla 19. Este intervalo representa la etapa final de la prueba y permite verificar el comportamiento del sistema bajo una condición persistente de fuga.

Durante este intervalo se registró un caudal promedio de 7.25 L/min en la tubería principal y 5.64 L/min en el ramal del tanque. Asimismo, el coeficiente de distribución alcanzó un valor de 0.78 y el caudal de fuga estimado fue igual a 1.61 L/min.

La diferencia observada entre ambos caudales evidencia que una parte del agua suministrada por la tubería principal no llegó al punto de consumo previsto, siendo asociada a la fuga introducida durante la validación experimental. Esta condición es corroborada por el valor del coeficiente de distribución, el cual permanece por debajo del límite normal de funcionamiento, así como por el caudal de fuga registrado, que supera ampliamente el umbral mínimo de detección confiable de 0.14 L/min establecido para el sistema.

Adicionalmente, la gráfica de fuga mostrada en la Figura 56 evidencia valores superiores al umbral de detección durante gran parte del ensayo, alcanzando sus mayores magnitudes entre los Ensayos 5 y 7, donde se registraron caudales de fuga comprendidos entre 2.80 L/min y 3.00 L/min. En estos intervalos también se obtuvieron los menores valores del coeficiente de

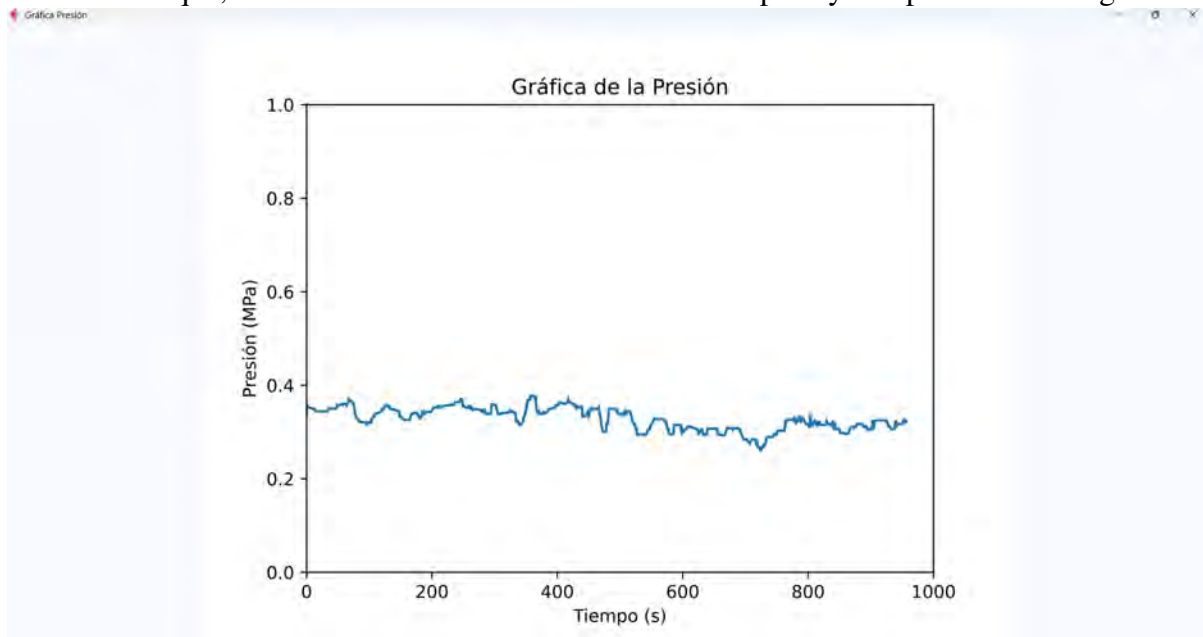
distribución, confirmando la relación existente entre el incremento de la fuga y la reducción del equilibrio hidráulico del sistema.

Por lo tanto, el comportamiento observado en el Ensayo 10 confirma nuevamente la presencia de una fuga en la red hidráulica y demuestra el correcto funcionamiento del algoritmo de detección implementado, ya que se cumplen simultáneamente las dos condiciones establecidas para la identificación de fugas: un coeficiente de distribución inferior a 0.93 y un caudal de fuga superior a 0.14 L/min. En consecuencia, los resultados obtenidos validan la capacidad del sistema para detectar de manera confiable pérdidas de agua en la red de distribución domiciliaria evaluada.

#### 4.5.11 Análisis de la presión durante la condición con fuga

**Figura 58**

Comportamiento de la presión del sistema con flujo en la tubería principal y consumo en el ramal del tanque, manteniendo el ramal de lavandería en reposo y con presencia de fuga.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 58 muestra el comportamiento de la presión durante la validación experimental del sistema con flujo en la tubería principal y consumo en el ramal del tanque, manteniendo el ramal de lavandería en reposo y con presencia de fuga.

Se observa que la presión presentó variaciones comprendidas aproximadamente entre 0.27 MPa y 0.38 MPa durante el ensayo. En los primeros instantes la presión se mantuvo cercana a 0.35 MPa; posteriormente se registraron fluctuaciones moderadas y una disminución gradual, alcanzando valores mínimos próximos a 0.27 MPa alrededor de los 700 s.

Estas variaciones se encuentran asociadas al comportamiento dinámico del sistema hidráulico y a la presencia de la fuga introducida en la red. A pesar de ello, la presión se mantuvo dentro de un rango operativo que permitió el suministro continuo de agua durante toda la prueba.

Los resultados muestran que la presencia de una fuga genera una ligera reducción de la presión respecto a las condiciones normales de funcionamiento. Sin embargo, la detección de la fuga se realiza principalmente mediante el análisis de los caudales medidos y del coeficiente de distribución  $\alpha$ , parámetros que permiten identificar con mayor precisión la pérdida de agua en la red domiciliaria.

#### **4.5.12 Análisis e interpretación en presencia de fuga**

En la Tabla 19 se observa una diferencia sostenida entre el caudal registrado en la tubería principal y el caudal medido en el ramal del tanque, lo cual evidencia la presencia de una fuga en el sistema hidráulico. Esta diferencia indica que una fracción del flujo suministrado no alcanza el punto de consumo, generando un desequilibrio de caudales en la red.

Desde el punto de vista hidráulico, este comportamiento representa una pérdida de caudal dentro del sistema, rompiendo el equilibrio observado en condiciones normales de operación. A medida que la magnitud de la fuga incrementa, la diferencia entre el caudal de entrada y salida se vuelve más pronunciada, lo que se refleja en el aumento del caudal de fuga estimado.

El coeficiente de distribución  $\alpha$  presenta una disminución progresiva conforme aumenta el caudal de fuga, evidenciando una relación inversa entre ambas variables. Para valores cercanos a  $\alpha = 0,96$ , el sistema se encuentra próximo al equilibrio, mientras que en el rango de  $0,70 \leq \alpha \leq 0,80$  se identifican fugas detectadas. Asimismo, cuando  $\alpha$  desciende por debajo de 0.60, se clasifican fugas significativas o severas, asociadas a pérdidas de mayor magnitud.

Este comportamiento confirma que el coeficiente  $\alpha$  es un indicador confiable para la

detección de fugas, ya que permite diferenciar claramente entre condiciones normales y anómalas en función de la relación entre los caudales medidos.

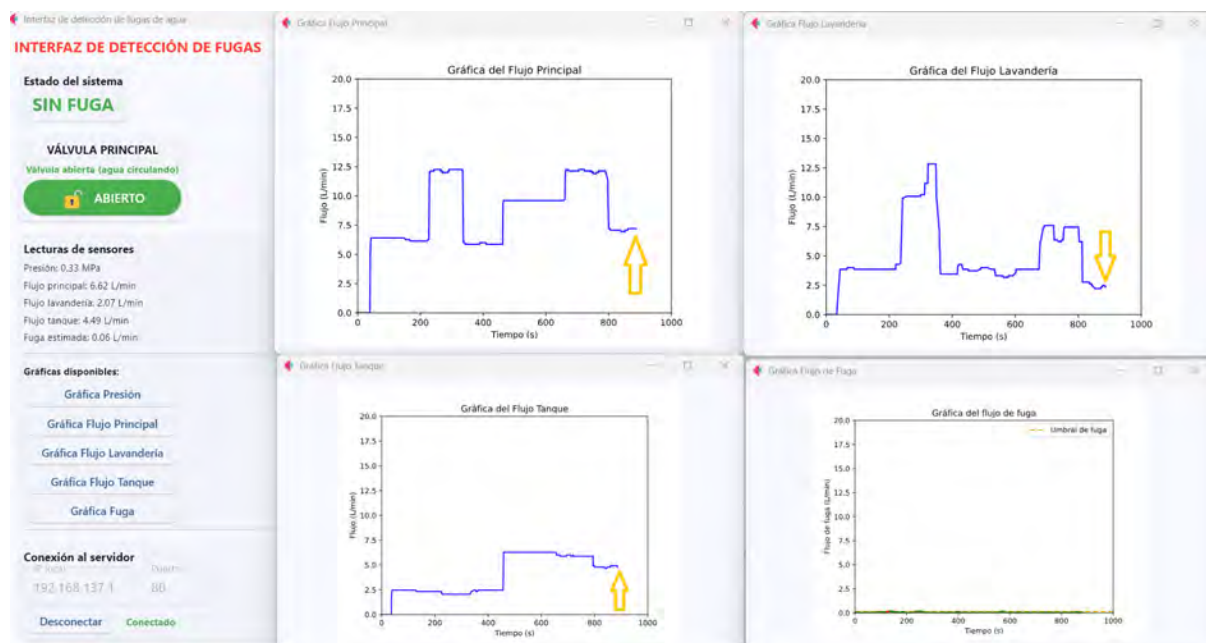
Finalmente, se verifica que el criterio de detección basado en  $\alpha < 0,93$  y un caudal de fuga superior a 0.14 L/min permite identificar de manera efectiva la presencia de fugas en el sistema, validando el correcto funcionamiento del prototipo en condiciones de consumo en el ramal del tanque.

## 4.6 Caso 4: Tubería principal , ramal de tanque y ramal de lavandería

### 4.6.1 Tubería principal , ramal de tanque y ramal de lavandería con griferías abiertas sin fuga

**Figura 59**

Interfaz gráfica del sistema durante la condición de operación con la tubería principal, el ramal del tanque y el ramal de lavandería en funcionamiento, con griferías abiertas y ausencia de fuga.



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.6.2 Validación experimental del sistema sin fuga

**Tabla 20**

Análisis por ensayos del comportamiento del sistema con flujo principal, ramal de lavandería y ramal del tanque abiertos sin presencia de fuga.

| Ensayo | Intervalo (s) | $Q_{\text{principal}}$ (L/min) | $Q_{\text{lavandería}}$ (L/min) | $Q_{\text{tanque}}$ (L/min) | $Q_{\text{fuga}}$ (L/min) | $\alpha$ | Estado |
|--------|---------------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------|--------|
| 1      | 40–220        | 6.30                           | 3.90                            | 2.30                        | 0.10                      | 0.98     | Normal |
| 2      | 220–340       | 12.10                          | 10.00                           | 2.20                        | 0.10                      | 1.01     | Normal |
| 3      | 340–420       | 5.90                           | 3.50                            | 2.30                        | 0.10                      | 0.98     | Normal |
| 4      | 420–650       | 9.60                           | 3.80                            | 5.90                        | 0.00                      | 1.01     | Normal |
| 5      | 650–800       | 12.10                          | 6.00                            | 6.00                        | 0.10                      | 0.99     | Normal |
| 6      | 800–860       | 7.10                           | 3.00                            | 4.00                        | 0.10                      | 0.99     | Normal |
| 7      | 860–900       | 7.20                           | 2.30                            | 4.80                        | 0.10                      | 0.99     | Normal |
| 8      | 900–940       | 7.10                           | 2.50                            | 4.80                        | 0.00                      | 1.03     | Normal |
| 9      | 940–980       | 6.62                           | 2.07                            | 4.49                        | 0.06                      | 0.99     | Normal |

Fuente: Elaboración propia.

### 4.6.3 Evidencia experimental del Caso 4A

**Figura 60**

Condición experimental del Caso 4A: consumo simultáneo en los ramales de lavandería y tanque sin presencia de fuga.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 60 muestra la evidencia experimental correspondiente al Caso 4A. En esta condición de ensayo, la tubería principal permaneció abierta mientras que los ramales de lavandería y tanque operaron simultáneamente en condición de consumo. No se incorporó ninguna fuga en la red hidráulica, por lo que el caudal registrado en la tubería principal se distribuyó únicamente hacia ambos ramales. Esta configuración permitió evaluar el comportamiento normal del sistema bajo una condición de demanda simultánea de agua y verificar la correcta distribución del caudal en ausencia de pérdidas.

#### 4.6.4 Análisis e interpretación en ausencia de fuga

La Tabla 20 y la Figura 59 presentan los resultados obtenidos durante el ensayo realizado con la tubería principal, el ramal de lavandería y el ramal del tanque en funcionamiento, sin presencia de fuga. Los resultados muestran una adecuada correspondencia entre el caudal registrado en la tubería principal y la suma de los caudales consumidos en ambos ramales durante todo el periodo de evaluación.

Los valores del coeficiente de distribución  $\alpha$  permanecieron comprendidos entre 0.98 y 1.03, encontrándose dentro del rango normal de funcionamiento establecido para el sistema, definido por  $0,93 \leq \alpha \leq 1,20$ . Asimismo, el caudal de fuga estimado presentó valores comprendidos entre 0.00 L/min y 0.10 L/min, manteniéndose siempre por debajo del umbral mínimo de detección confiable de 0.14 L/min establecido para el sistema.

Estos resultados evidencian que el sistema mantuvo el equilibrio hidráulico esperado entre el caudal suministrado por la tubería principal y los caudales consumidos en los ramales de lavandería y tanque, confirmando la ausencia de pérdidas significativas de agua durante todo el ensayo.

Particularmente, en la Figura 59 se ha señalado mediante una marca de color amarillo el intervalo correspondiente al Ensayo 9 (940–980 s), cuyos resultados se presentan en la Tabla 20. Este intervalo representa la etapa final de la prueba y permite verificar el comportamiento del sistema antes de concluir la validación experimental.

Durante este intervalo se registró un caudal promedio de 6.62 L/min en la tubería principal, 2.07 L/min en el ramal de lavandería y 4.49 L/min en el ramal del tanque. Asimismo, el coeficiente de distribución alcanzó un valor de 0.99 y el caudal de fuga estimado fue igual a 0.06 L/min.

Los resultados obtenidos muestran que la suma de los caudales registrados en los ramales de lavandería y tanque es prácticamente igual al caudal suministrado por la tubería principal. Esta condición es corroborada por el valor del coeficiente de distribución, el cual permanece dentro del rango normal de funcionamiento, así como por el caudal de fuga registrado, que se mantiene por debajo del umbral mínimo de detección establecido para el sistema.

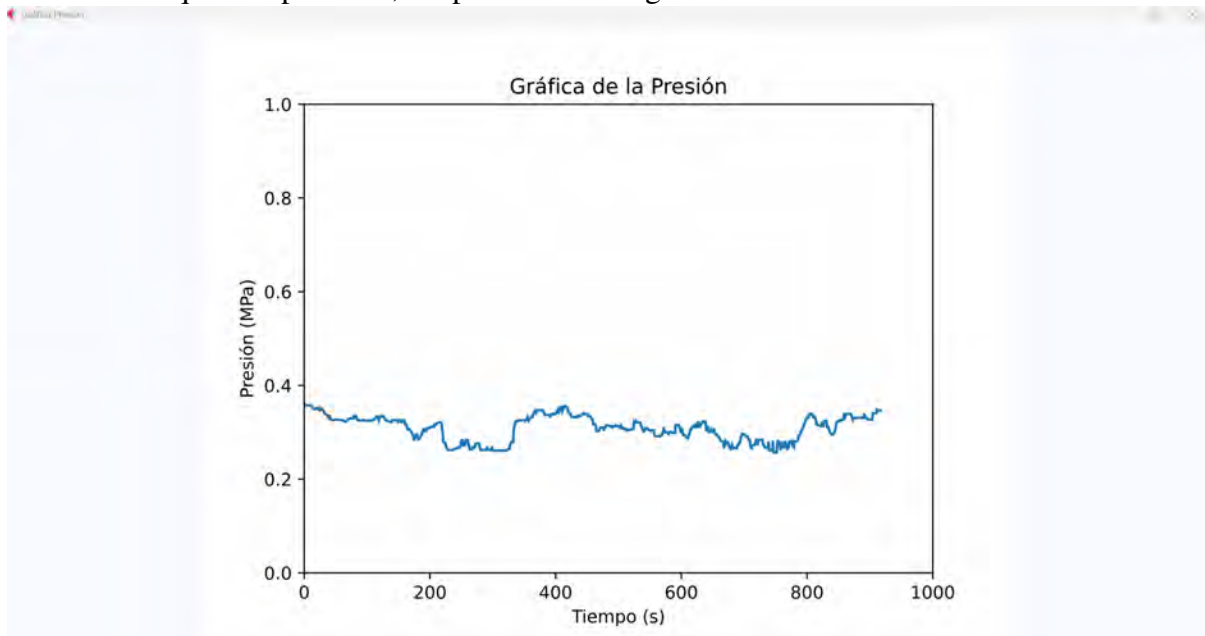
Por lo tanto, el comportamiento observado en el Ensayo 9 confirma nuevamente que el

sistema continuó operando bajo condiciones normales de servicio y sin presencia de fuga hasta la finalización de la prueba. En consecuencia, los resultados obtenidos validan el correcto funcionamiento del algoritmo de detección implementado, ya que el coeficiente de distribución permaneció dentro del rango normal de operación y el caudal de fuga se mantuvo por debajo del umbral mínimo de detección durante todo el periodo de evaluación.

#### 4.6.5 Análisis de la presión durante la condición con fuga

**Figura 61**

Comportamiento de la presión del sistema con la tubería principal, ramal de lavandería y ramal del tanque en operación, sin presencia de fuga.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 61 muestra la evolución de la presión del sistema durante el ensayo realizado con la tubería principal, el ramal de lavandería y el ramal del tanque en funcionamiento, sin presencia de fuga. Se observa que la presión se mantiene dentro de un rango aproximado entre 0.26 MPa y 0.36 MPa durante todo el periodo de evaluación.

En los primeros segundos del ensayo, la presión presenta valores cercanos a 0.35 MPa. Posteriormente, entre los 200 s y 320 s, se aprecia una ligera disminución hasta aproximadamente 0.26 MPa. Luego, alrededor de los 350 s, la presión se recupera gradualmente

alcanzando nuevamente valores próximos a 0.35 MPa.

A lo largo del resto del ensayo se observan pequeñas oscilaciones alrededor de un valor medio cercano a 0.31 MPa, las cuales son atribuibles a las variaciones normales del flujo de agua y a las pérdidas de carga propias de la red hidráulica. Sin embargo, no se evidencian caídas bruscas ni descensos sostenidos que indiquen una alteración significativa en las condiciones de operación del sistema.

Los resultados obtenidos demuestran que la presión permanece relativamente estable durante el funcionamiento simultáneo de los ramales evaluados, lo que evidencia un comportamiento hidráulico normal y la ausencia de fugas significativas en la red de distribución. Asimismo, esta condición constituye una referencia experimental para la comparación con los ensayos realizados en presencia de fuga.

#### **4.6.6 Análisis e interpretación en ausencia de fuga**

En la Tabla 20 se observa que el caudal registrado en la tubería principal y la suma de los caudales en el ramal de lavandería y el ramal del tanque presentan valores muy próximos en todos los ensayos, lo que evidencia una adecuada distribución del flujo dentro del sistema.

Las diferencias registradas son mínimas, del orden de 0.0 a 0.2 L/min, lo cual indica que el flujo suministrado por la línea principal es transferido casi en su totalidad hacia los puntos de consumo, manteniéndose un equilibrio hidráulico en la red.

El coeficiente de distribución  $\alpha$  presenta valores comprendidos entre 0.95 y 1.00, dentro del rango normal de operación, lo que confirma que el sistema se encuentra en condiciones de equilibrio, sin pérdidas significativas de caudal.

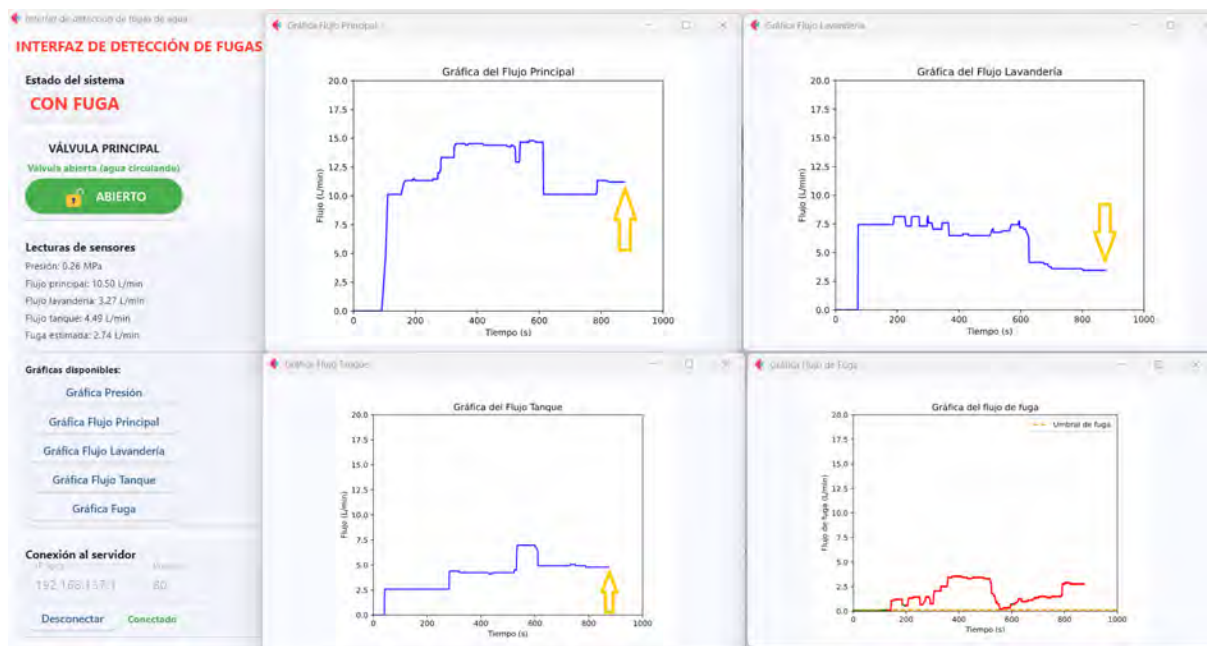
Asimismo, el caudal de fuga estimado presenta valores cercanos a cero, con pequeñas variaciones atribuibles a errores instrumentales, tales como tolerancias de calibración, cuantización en el conteo de pulsos y fluctuaciones propias del flujo. Estas variaciones no afectan la validez del modelo de detección implementado.

En consecuencia, el sistema identifica correctamente esta condición como ausencia de fuga, validando su correcto desempeño en un escenario donde los tres ramales se encuentran habilitados simultáneamente.

#### 4.6.7 Tubería principal , ramal de tanque y ramal de lavandería con griferías abiertas con fuga

Figura 62

Interfaz gráfica del sistema durante la condición de operación con la tubería principal, el ramal de lavandería y el ramal del tanque en funcionamiento, con griferías abiertas y presencia de fuga.



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.6.8 Validación experimental del sistema con fuga

**Tabla 21**

Análisis por ensayos del comportamiento del sistema con flujo en la tubería principal, ramal de lavandería y ramal del tanque con presencia de fuga.

| Ensayo | Intervalo (s) | $Q_{\text{principal}}$ (L/min) | $Q_{\text{lavandería}}$ (L/min) | $Q_{\text{tanque}}$ (L/min) | $Q_{\text{fuga}}$ (L/min) | $\alpha$ | Estado         |
|--------|---------------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------|----------------|
| 1      | 100–180       | 10.00                          | 7.40                            | 2.50                        | 0.10                      | 0.99     | Sin fuga       |
| 2      | 180–260       | 11.30                          | 7.50                            | 2.50                        | 1.30                      | 0.88     | Fuga detectada |
| 3      | 260–340       | 12.00                          | 8.00                            | 2.50                        | 1.50                      | 0.88     | Fuga detectada |
| 4      | 340–540       | 14.50                          | 7.80                            | 2.50                        | 3.50                      | 0.71     | Fuga severa    |
| 5      | 540–590       | 14.70                          | 7.20                            | 7.00                        | 0.50                      | 0.97     | Sin fuga       |
| 6      | 590–660       | 10.00                          | 6.80                            | 5.00                        | 1.00                      | 0.88     | Fuga detectada |
| 7      | 660–740       | 10.00                          | 4.40                            | 5.00                        | 1.40                      | 0.89     | Fuga detectada |
| 8      | 740–820       | 10.00                          | 3.90                            | 4.90                        | 1.50                      | 0.88     | Fuga detectada |
| 9      | 820–880       | 11.20                          | 4.00                            | 4.80                        | 2.40                      | 0.79     | Fuga detectada |
| 10     | 880–940       | 10.50                          | 3.27                            | 4.49                        | 2.74                      | 0.74     | Fuga detectada |

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.6.9 Evidencia experimental del Caso 4B

**Figura 63**

Condición experimental del Caso 4B: consumo simultáneo en los ramales de lavandería y tanque con presencia de fuga.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 63 muestra la evidencia experimental correspondiente al Caso 4B. En esta condición de ensayo, la tubería principal permaneció abierta mientras que los ramales de lavandería y tanque operaron simultáneamente en condición de consumo. Adicionalmente, se incorporó una fuga controlada en la red hidráulica con el propósito de evaluar la capacidad del sistema para detectar pérdidas de agua cuando existe demanda simultánea en ambos ramales. Esta configuración representa una de las condiciones de operación más exigentes para el sistema, debido a que el caudal principal debe distribuirse entre el consumo de los ramales y el flujo asociado a la fuga.

#### 4.6.10 Análisis e interpretación con presencia de fuga

La Tabla 21 y la Figura 62 presentan los resultados obtenidos durante el ensayo realizado con la tubería principal, el ramal de lavandería y el ramal del tanque en funcionamiento, con presencia de una fuga controlada. Los resultados muestran diferencias entre el caudal registrado en la tubería principal y la suma de los caudales consumidos en ambos ramales durante la mayor parte del periodo de evaluación.

Los valores del coeficiente de distribución  $\alpha$  variaron entre 0.71 y 0.99. En la mayoría de los ensayos, los valores registrados fueron inferiores al rango normal de funcionamiento establecido para el sistema ( $0,93 \leq \alpha \leq 1,20$ ), lo que evidencia un desequilibrio entre el caudal suministrado por la tubería principal y la suma de los caudales consumidos en los ramales de lavandería y tanque. Asimismo, el caudal de fuga estimado presentó valores comprendidos entre 0.10 L/min y 3.50 L/min durante los diferentes intervalos analizados, superando en la mayor parte de los ensayos el umbral mínimo de detección confiable de 0.14 L/min establecido para el sistema.

Se observa además que, durante el intervalo comprendido entre 540 y 590 s (Ensayo 5), el sistema registró un comportamiento hidráulico correspondiente a una condición de *Sin fuga*, con un coeficiente de distribución de 0.97 y un caudal de fuga aproximado de 0.50 L/min, valor cercano al umbral de detección establecido. Posteriormente, a partir del intervalo 590–660 s (Ensayo 6), el sistema volvió a identificar la presencia de una fuga, condición que se mantuvo durante los ensayos restantes, registrándose nuevamente diferencias entre el caudal suministrado por la tubería principal y la suma de los caudales consumidos en los ramales.

En términos generales, conforme aumentó la magnitud del caudal de fuga, el coeficiente de distribución disminuyó progresivamente, reflejando el desequilibrio hidráulico generado por la pérdida de agua en la red. Este comportamiento confirma la relación inversa entre ambas variables y evidencia la capacidad del sistema para detectar variaciones producidas por la presencia de fugas.

Particularmente, en la Figura 62 se ha señalado mediante una marca de color amarillo el intervalo correspondiente al Ensayo 10 (880–940 s), cuyos resultados se presentan en la Tabla 21. Este intervalo representa la etapa final de la prueba y permite verificar el comportamiento

del sistema bajo una condición sostenida de fuga.

Durante este intervalo se registró un caudal promedio de 10.50 L/min en la tubería principal, 3.27 L/min en el ramal de lavandería y 4.49 L/min en el ramal del tanque. Asimismo, el coeficiente de distribución alcanzó un valor de 0.74 y el caudal de fuga estimado fue de 2.74 L/min.

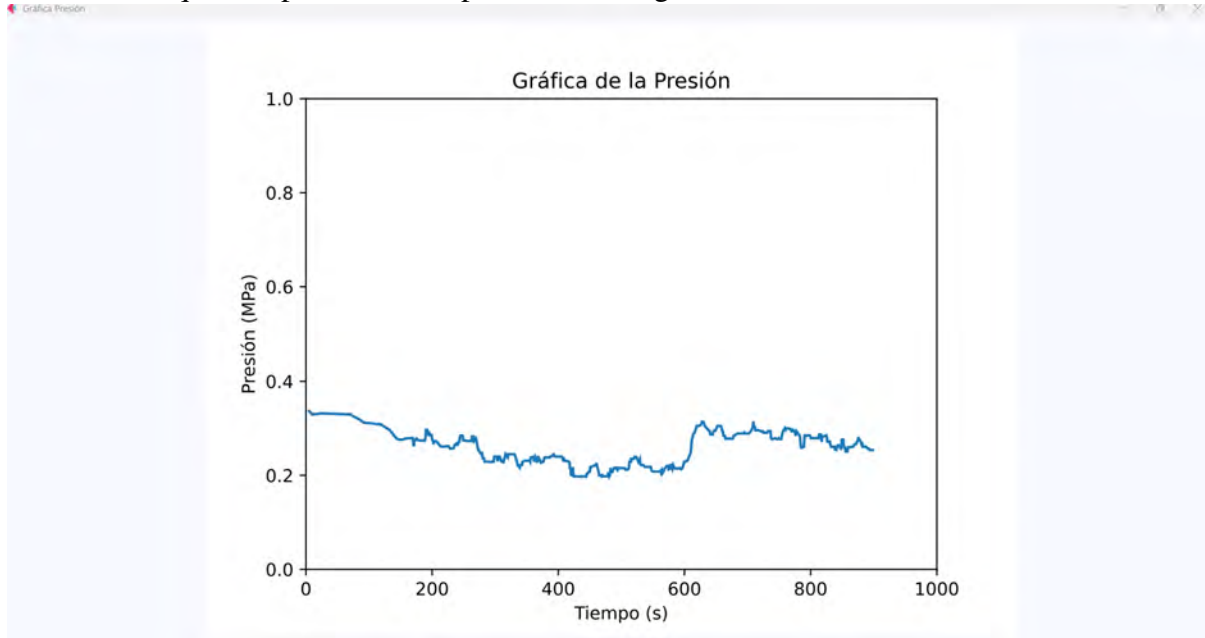
La diferencia observada entre el caudal suministrado por la tubería principal y la suma de los caudales registrados en los ramales evidencia que una parte importante del agua no llegó a los puntos de consumo previstos, siendo asociada a la fuga introducida durante la validación experimental. Esta condición es corroborada por el valor del coeficiente de distribución, el cual permanece considerablemente por debajo del rango normal de funcionamiento, así como por el caudal de fuga registrado, que supera ampliamente el umbral mínimo de detección establecido para el sistema.

Por lo tanto, el comportamiento observado en el Ensayo 10 confirma nuevamente la presencia de una fuga en la red hidráulica y demuestra el correcto funcionamiento del algoritmo de detección implementado. En consecuencia, los resultados obtenidos validan la capacidad del sistema para detectar de manera confiable pérdidas de agua cuando la tubería principal, el ramal de lavandería y el ramal del tanque se encuentran operando simultáneamente.

#### 4.6.11 Análisis de la presión durante la condición con fuga

**Figura 64**

Comportamiento de la presión del sistema con la tubería principal, el ramal de lavandería y el ramal del tanque en operación, con presencia de fuga.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 64 presenta el comportamiento de la presión del sistema durante el ensayo realizado con la tubería principal, el ramal de lavandería y el ramal del tanque en funcionamiento, bajo condiciones de fuga controlada. Se observa que la presión experimenta una disminución gradual desde valores cercanos a 0.33 MPa al inicio del ensayo hasta aproximadamente 0.20 MPa entre los 450 s y 550 s.

Esta reducción de presión está asociada al incremento de la demanda hidráulica ocasionada por la fuga, la cual genera una pérdida adicional de agua dentro de la red. Posteriormente, alrededor de los 620 s, se aprecia una recuperación parcial de la presión hasta valores próximos a 0.30 MPa, manteniéndose después con pequeñas fluctuaciones alrededor de dicho valor.

A lo largo del ensayo se observan variaciones continuas de presión, atribuibles a las condiciones dinámicas del flujo de agua y a las pérdidas de carga presentes en el sistema. Sin embargo, en comparación con la condición sin fuga, la presión presenta valores promedio inferiores y una mayor tendencia al descenso durante una parte significativa del periodo de

evaluación.

Los resultados obtenidos evidencian que la presencia de fuga altera el comportamiento hidráulico de la red, provocando una disminución de la presión disponible en determinados intervalos de tiempo. No obstante, la variación de presión observada no resulta suficientemente pronunciada para utilizarla como único criterio de detección, por lo que la identificación de fugas se realiza principalmente mediante el análisis del balance de caudales y del coeficiente de distribución  $\alpha$  implementado en el sistema.

#### **4.6.12 Análisis e interpretación en presencia de fuga**

En la Tabla 21 se observa que el caudal registrado en la tubería principal es mayor que la suma de los caudales en el ramal de lavandería y el ramal del tanque, lo que evidencia un desequilibrio de caudales en el sistema hidráulico.

Este comportamiento indica que una fracción del flujo suministrado no llega a los puntos de consumo, siendo desviada a través de la fuga presente en la red. Desde el punto de vista hidráulico, esto representa una pérdida de caudal dentro del sistema, rompiendo el equilibrio observado en condiciones normales de operación.

El caudal de fuga estimado presenta valores positivos y persistentes en todos los ensayos, alcanzando valores de hasta 3.2 L/min, lo cual confirma la existencia de pérdidas reales de agua en el sistema. La variación de este flujo en el tiempo refleja cambios en las condiciones de operación, pero su permanencia por encima del umbral de detección permite diferenciar claramente entre fuga y ruido de medición.

El coeficiente de distribución  $\alpha$  presenta valores inferiores al rango normal ( $\alpha < 0,93$ ) en varios ensayos, evidenciando una relación inversa entre  $\alpha$  y la magnitud de la fuga. Para valores cercanos a  $\alpha = 0,93$ , el sistema se encuentra en el límite de detección, mientras que valores más bajos ( $\alpha < 0,80$ ) corresponden a fugas detectadas o significativas.

Este comportamiento confirma que el coeficiente  $\alpha$  es un indicador robusto para la detección de fugas, incluso en condiciones donde múltiples ramales se encuentran operando simultáneamente.

Finalmente, se valida que el criterio de detección basado en  $\alpha < 0,93$  y un caudal de

fuga superior a 0.14 L/min permite identificar de manera confiable la presencia de fugas, demostrando la efectividad del sistema en escenarios complejos de operación.

## 4.7 Resumen comparativo de los casos evaluados

**Tabla 22**

Resumen comparativo de los casos experimentales del sistema de detección de fugas.

| Caso | Condición experimental                            | $Q_{\text{principal}}$ | $Q_{\text{lavandería}}$ | $Q_{\text{tanque}}$ | $Q_{\text{fuga}}$ | $\alpha$  | Diagnóstico    |
|------|---------------------------------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------|-------------------|-----------|----------------|
| 1    | Sin consumo y sin fuga                            | 0.00                   | 0.00                    | 0.00                | 0.00              | 1.00      | Normal         |
| 2    | Sin consumo en ramales, con fuga                  | 0.20–4.00              | 0.00                    | 0.00                | 0.20–4.00         | 0.00      | Fuga detectada |
| 3    | Principal y lavandería abiertos, sin fuga         | 2.75–14.40             | 2.83–14.30              | 0.00                | 0.00–0.10         | 0.99–1.03 | Normal         |
| 4    | Principal y lavandería abiertos, con fuga         | 6.80–10.00             | 5.69–6.30               | 0.00                | 0.70–4.00         | 0.60–0.90 | Fuga detectada |
| 5    | Principal y tanque abiertos, sin fuga             | 3.00–8.70              | 0.00                    | 3.00–8.80           | 0.00              | 1.00–1.01 | Normal         |
| 6    | Principal y tanque abiertos, con fuga             | 4.50–10.80             | 0.00                    | 4.40–8.00           | 0.10–3.00         | 0.59–0.80 | Fuga detectada |
| 7    | Principal, lavandería y tanque abiertos, sin fuga | 5.90–12.10             | 2.07–10.00              | 2.20–6.00           | 0.00–0.10         | 0.98–1.03 | Normal         |
| 8    | Principal, lavandería y tanque abiertos, con fuga | 10.00–14.70            | 3.27–8.00               | 2.50–7.00           | 0.10–4.20         | 0.71–0.89 | Fuga detectada |

Fuente: Elaboración propia.

## 4.8 Análisis del tiempo de detección de fugas

### 4.8.1 Resultados del tiempo de detección de fugas con todos los ramales cerrados

Se realizaron veinte pruebas experimentales para determinar el tiempo requerido por el sistema para detectar una fuga, definido como el intervalo comprendido entre la aparición de una condición de desequilibrio hidráulico y la activación de la alarma. Las pruebas se efectuaron bajo condiciones de todos los ramales cerrados y con los parámetros actuales del algoritmo de detección. En estas condiciones, el sistema presenta tiempos de detección del orden de dos minutos, priorizando la confiabilidad de la detección frente a fluctuaciones transitorias del caudal.

**Tabla 23**

Resultados de las pruebas de tiempo de detección de fugas con ramales cerrados.

| Prueba              | Tiempo (min) | Tiempo (s) | Descripción |
|---------------------|--------------|------------|-------------|
| 1                   | 2.04         | 122.4      | Prueba 1    |
| 2                   | 2.00         | 120.0      | Prueba 2    |
| 3                   | 1.45         | 87.0       | Prueba 3    |
| 4                   | 1.50         | 90.0       | Prueba 4    |
| 5                   | 2.02         | 121.2      | Prueba 5    |
| 6                   | 1.95         | 117.0      | Prueba 6    |
| 7                   | 1.85         | 111.0      | Prueba 7    |
| 8                   | 1.70         | 102.0      | Prueba 8    |
| 9                   | 1.90         | 114.0      | Prueba 9    |
| 10                  | 1.75         | 105.0      | Prueba 10   |
| 11                  | 1.80         | 108.0      | Prueba 11   |
| 12                  | 1.92         | 115.2      | Prueba 12   |
| 13                  | 1.88         | 112.8      | Prueba 13   |
| 14                  | 1.60         | 96.0       | Prueba 14   |
| 15                  | 1.98         | 118.8      | Prueba 15   |
| 16                  | 1.82         | 109.2      | Prueba 16   |
| 17                  | 1.76         | 105.6      | Prueba 17   |
| 18                  | 1.87         | 112.2      | Prueba 18   |
| 19                  | 1.93         | 115.8      | Prueba 19   |
| 20                  | 1.72         | 103.2      | Prueba 20   |
| Promedio            | 1.82         | 109.3      | —           |
| Varianza muestral   | —            | 109.6      | —           |
| Desviación estándar | —            | 10.5       | —           |

Fuente: Elaboración propia

#### 4.8.2 Análisis y discusión del tiempo de detección

Se realizaron veinte mediciones del tiempo requerido para la detección de una fuga bajo la condición de ramales cerrados, cuyos valores se muestran en la Tabla 23. Denotando por  $N$  el número de mediciones y por  $t_i$  cada tiempo expresado en segundos, se tiene  $N = 20$ .

La media aritmética muestral se calcula mediante:

$$\bar{t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i \quad (33)$$

Reemplazando los valores experimentales obtenidos se obtiene:

$$\bar{t} \approx 109,3 \text{ s} \quad (34)$$

lo que equivale aproximadamente a:

$$\bar{t} \approx 1,82 \text{ min} \quad (35)$$

Este resultado indica que, bajo condiciones de ausencia de consumo en los ramales, el sistema requiere en promedio cerca de dos minutos para confirmar la presencia de una fuga y activar la alarma correspondiente.

La varianza muestral, aplicando la corrección de Bessel, se determina mediante:

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2 \quad (36)$$

obteniéndose:

$$s^2 \approx 109,6 \text{ s}^2 \quad (37)$$

Por su parte, la desviación estándar muestral resulta:

$$s = \sqrt{s^2} \quad (38)$$

$$s \approx 10,5 \text{ s} \quad (39)$$

La desviación estándar obtenida representa aproximadamente el 9.6 % del valor medio, lo que evidencia una dispersión relativamente baja entre las diferentes pruebas realizadas. Este comportamiento indica que el algoritmo de detección mantiene una respuesta consistente y repetible cuando la red hidráulica se encuentra en condición de reposo.

Los tiempos de detección observados se encuentran comprendidos entre 87.0 s y 122.4 s, mostrando una variación moderada atribuible a pequeñas fluctuaciones en las mediciones de caudal y a los mecanismos de validación temporal implementados en el algoritmo. Dichos mecanismos fueron incorporados con el propósito de evitar falsas alarmas producidas por perturbaciones transitorias o ruido de medición.

En consecuencia, los resultados obtenidos demuestran que el sistema presenta un comportamiento estable y confiable para la detección de fugas en condiciones de todos los ramales cerrados, alcanzando un tiempo promedio de detección de aproximadamente 1.82 minutos y manteniendo una variabilidad reducida entre ensayos consecutivos.

#### **4.8.3 Interpretación de resultados**

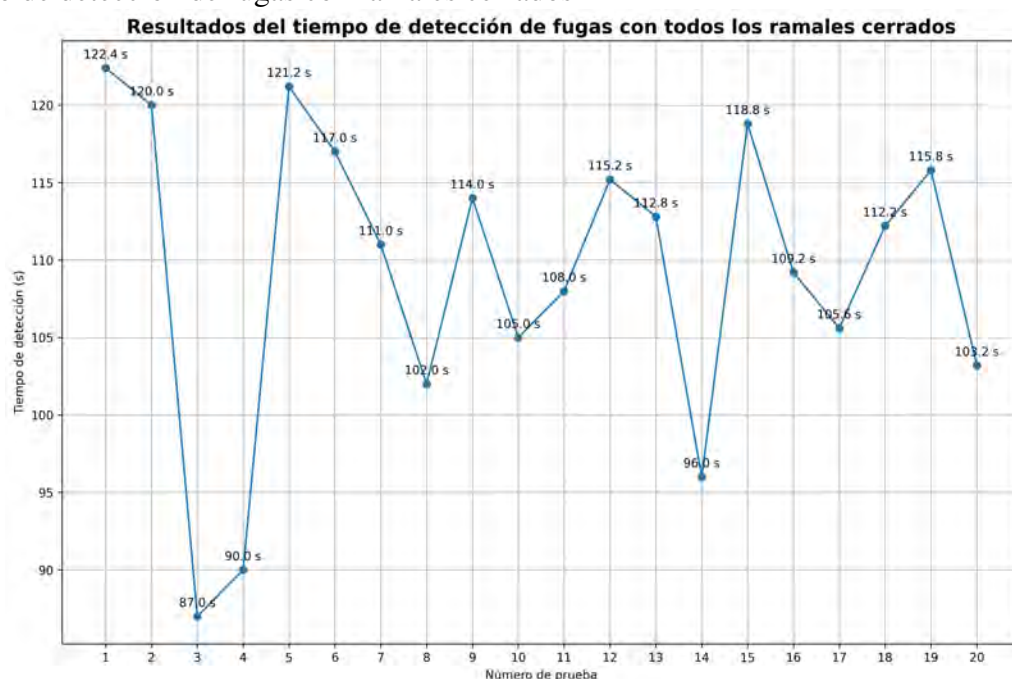
El tiempo promedio de detección obtenido, de aproximadamente 109.3 s (1.82 min), indica que el algoritmo requiere un periodo de observación relativamente prolongado para confirmar de manera confiable la presencia de una fuga cuando no existen consumos activos en la red hidráulica. Este comportamiento está asociado a los mecanismos de filtrado temporal y validación de persistencia implementados en el sistema, los cuales permiten discriminar entre una fuga real y posibles perturbaciones transitorias generadas por ruido de medición o pequeñas fluctuaciones del caudal.

La desviación estándar de 10.5 s evidencia una dispersión reducida respecto al valor medio, lo que demuestra una adecuada repetibilidad en los tiempos de detección obtenidos durante las veinte pruebas experimentales. Asimismo, los tiempos registrados se mantuvieron dentro de un intervalo comprendido entre 87.0 s y 122.4 s, mostrando un comportamiento consistente del algoritmo bajo condiciones de reposo hidráulico.

En conjunto, los resultados confirman que el sistema presenta un funcionamiento estable y confiable para la detección de fugas cuando todos los ramales permanecen cerrados. Aunque el tiempo de respuesta es superior al observado en condiciones con consumo activo, esta estrategia permite minimizar la ocurrencia de falsas alarmas y mejorar la confiabilidad del diagnóstico, garantizando que la activación de la alarma corresponda efectivamente a una condición de fuga persistente en la red de distribución domiciliaria.

**Figura 65**

Tiempo de detección de fugas con ramales cerrados



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.8.4 Resultados del Tiempo de Detección de Fugas con Consumo Activo

Se realizaron veinte pruebas experimentales para determinar el tiempo requerido por el sistema para detectar una fuga, definido como el intervalo comprendido entre la aparición de una condición de desequilibrio hidráulico y la activación de la alarma. Las pruebas se efectuaron bajo condiciones de consumo activo en la red y con los parámetros actuales del algoritmo de detección. En estas condiciones, el sistema presenta tiempos de detección cercanos a un minuto, manteniendo un adecuado equilibrio entre rapidez de respuesta y confiabilidad en la identificación de fugas reales.

**Tabla 24**

Resultados de las pruebas de tiempo de detección de fugas.

| Prueba              | Tiempo (min:seg) | Tiempo (s) | Descripción |
|---------------------|------------------|------------|-------------|
| 1                   | 0:52             | 52         | Prueba 1    |
| 2                   | 0:55             | 55         | Prueba 2    |
| 3                   | 1:02             | 62         | Prueba 3    |
| 4                   | 0:58             | 58         | Prueba 4    |
| 5                   | 1:04             | 64         | Prueba 5    |
| 6                   | 0:57             | 57         | Prueba 6    |
| 7                   | 0:35             | 35         | Prueba 7    |
| 8                   | 0:40             | 40         | Prueba 8    |
| 9                   | 0:37             | 37         | Prueba 9    |
| 10                  | 0:50             | 50         | Prueba 10   |
| 11                  | 0:53             | 53         | Prueba 11   |
| 12                  | 0:56             | 56         | Prueba 12   |
| 13                  | 0:48             | 48         | Prueba 13   |
| 14                  | 0:45             | 45         | Prueba 14   |
| 15                  | 0:59             | 59         | Prueba 15   |
| 16                  | 0:54             | 54         | Prueba 16   |
| 17                  | 0:47             | 47         | Prueba 17   |
| 18                  | 0:51             | 51         | Prueba 18   |
| 19                  | 0:44             | 44         | Prueba 19   |
| 20                  | 0:52             | 52         | Prueba 20   |
| Promedio            | 0:52             | 51.45      | —           |
| Varianza muestral   | —                | 67.73      | —           |
| Desviación estándar | —                | 8.23       | —           |

Fuente: Elaboración propia

#### 4.8.5 Análisis y discusión del tiempo de detección

Se realizaron veinte mediciones del tiempo requerido para la detección de una fuga bajo condiciones de consumo activo, cuyos resultados se presentan en la Tabla 24. Denotando por  $N$  el número de mediciones y por  $t_i$  cada tiempo expresado en segundos, se tiene  $N = 20$ .

La media aritmética muestral se calcula mediante:

$$\bar{t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i \quad (40)$$

Reemplazando los valores experimentales obtenidos se obtiene:

$$\bar{t} \approx 51,45 \text{ s} \quad (41)$$

lo que equivale aproximadamente a:

$$\bar{t} \approx 0,86 \text{ min} \quad (42)$$

Este resultado indica que, cuando existe consumo activo en la red, el sistema es capaz de identificar una condición de fuga en menos de un minuto en promedio, permitiendo una respuesta más rápida que la observada en condiciones de reposo hidráulico.

La varianza muestral, aplicando la corrección de Bessel, se determina mediante:

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2 \quad (43)$$

obteniéndose:

$$s^2 \approx 67,73 \text{ s}^2 \quad (44)$$

La desviación estándar muestral corresponde a la raíz cuadrada de la varianza calculada, por lo que:

$$s = \sqrt{67,73} \approx 8,23 \text{ s} \quad (45)$$

La desviación estándar obtenida representa aproximadamente el 16% del valor medio, evidenciando una dispersión moderada entre las diferentes pruebas realizadas. Esta variabilidad se encuentra asociada a las condiciones dinámicas del flujo durante el consumo activo y a las características propias del proceso de validación temporal implementado por el algoritmo.

Los tiempos de detección registrados se encuentran comprendidos entre 35 s y 64 s, mostrando una respuesta consistente del sistema en la identificación de fugas bajo condiciones reales de operación. La menor duración observada en comparación con las pruebas realizadas con todos los ramales cerrados se debe a que la presencia de flujo facilita la detección del desequilibrio hidráulico generado por una fuga.

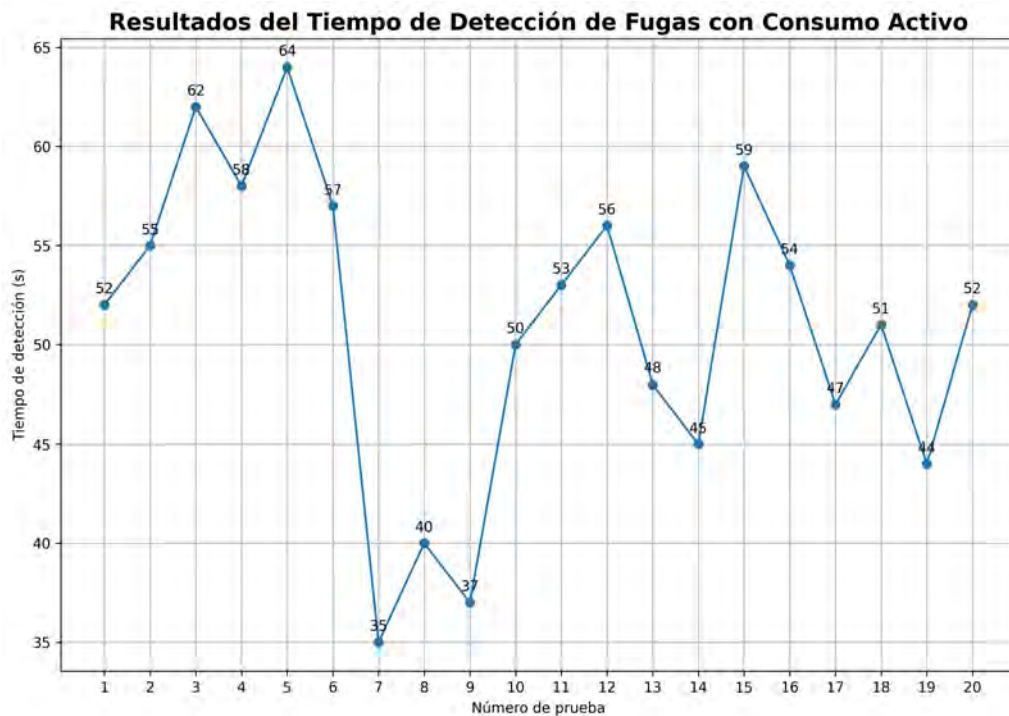
#### **4.8.6 Interpretación de resultados**

El tiempo promedio de detección obtenido, de aproximadamente 51.45 s, demuestra que el sistema es capaz de identificar una condición de fuga en menos de un minuto cuando existe consumo activo en la red de distribución. Este comportamiento se debe a que la circulación de agua facilita la detección del desequilibrio hidráulico generado por una fuga, permitiendo que el algoritmo reconozca con mayor rapidez las diferencias entre el caudal registrado en la línea principal y la suma de los caudales medidos en los ramales monitoreados.

La desviación estándar de 8.23 s indica una dispersión relativamente baja respecto al valor medio, lo que evidencia una adecuada estabilidad y repetibilidad en los tiempos de detección obtenidos durante las veinte pruebas experimentales. Asimismo, los tiempos registrados se mantuvieron dentro de un intervalo comprendido entre 35 s y 64 s, mostrando un comportamiento consistente del sistema bajo diferentes condiciones de consumo.

**Figura 66**

Tiempo de detección de fugas en pruebas experimentales.



Fuente: Elaboración propia.

## 4.9 Interpretación global de resultados

### 4.9.1 Validación funcional del sistema

Se realizaron 50 pruebas experimentales que incluyeron eventos de fuga real y consumos breves. Los consumos breves corresponden a incrementos momentáneos del caudal asociados al uso normal de la red domiciliaria, los cuales, en condiciones ideales, no deberían activar la alarma del sistema. Sin embargo, activaciones y desactivaciones muy rápidas de la lavandería o del tanque pueden generar transitorios hidráulicos que, de forma temporal, pueden ser interpretados como una fuga.

Gracias a los ajustes realizados en el filtrado temporal y en los criterios de validación del algoritmo, el sistema presenta una mejora significativa en la discriminación entre fugas reales y consumos transitorios, reduciendo la cantidad de falsos positivos sin afectar la detección de fugas reales. Se considera que una fuga es detectada correctamente cuando el sistema identifica de manera precisa eventos que superan el umbral de detección y presentan persistencia temporal

suficiente.

**Tabla 25**

Resumen de detección de fugas y consumos breves.

| <b>Tipo de evento</b> | <b>Cantidad de pruebas</b> | <b>Detectadas correctamente</b> | <b>Errores</b> |
|-----------------------|----------------------------|---------------------------------|----------------|
| Fuga verdadera        | 35                         | 35                              | 0              |
| Consumos breves       | 15                         | 13                              | 2              |
| <b>Total</b>          | 50                         | 48                              | 2              |

Fuente: Elaboración propia

La funcionalidad global del sistema se calcula como la relación entre el número de eventos correctamente clasificados y el total de eventos evaluados, de acuerdo con:

$$\text{Funcionalidad (\%)} = \frac{\text{Eventos correctamente clasificados}}{\text{Total de eventos}} \times 100 = \frac{48}{50} \times 100 = 96\%.$$

El análisis de los datos experimentales evidencia que el sistema presenta una alta fiabilidad en la detección de fugas reales evaluadas, mientras que los consumos breves presentan una baja tasa de falsos positivos. Este comportamiento es consistente con el filtrado temporal y la lógica de decisión implementada, y confirma la robustez del algoritmo para su aplicación en redes de distribución domiciliaria de agua.

## Conclusiones

- Se desarrolló un prototipo de sistema electrónico que permitió detectar fugas de agua en tiempo real mediante el análisis del caudal y una lógica de control implementada en el servidor de monitoreo, basada en el balance entre el flujo principal y el flujo de los ramales de lavandería y tanque. El prototipo, integrado por sensores de caudal, sensor de presión y un microcontrolador ESP32, logró un monitoreo continuo y confiable gracias al uso de filtrado digital y umbrales definidos experimentalmente. Una vez identificada una condición de fuga, el servidor permitió activar mecanismos de respuesta, tales como la emisión de una alarma sonora o el control del corte de flujo de agua, posibilitando una actuación oportuna ante anomalías presentes en la red hidráulica.
- Se diseñó y desarrolló la circuitería electrónica para la integración de los sensores de caudal y presión con la unidad de control ESP32, incluyendo la implementación de la placa de circuito impreso (PCB). La adecuada adaptación eléctrica y el acondicionamiento de las señales permitieron obtener mediciones estables y confiables, contribuyendo a mejorar la precisión del sistema en la detección de fugas bajo condiciones reales de operación.
- Se diseñó e implementó una interfaz gráfica en Python mediante la librería Flet, que permite visualizar en tiempo real el estado del sistema y las lecturas de caudal y presión. La plataforma se conectó al servidor de adquisición de datos y facilitó la supervisión continua y el control del prototipo, mejorando la usabilidad y el seguimiento de eventos por parte del usuario.
- La evaluación y validación experimental del prototipo permitieron verificar su correcto funcionamiento bajo diferentes condiciones de operación, incluyendo escenarios con y sin fuga. Los resultados obtenidos evidenciaron una funcionalidad aproximada del 96 %, detectando de manera correcta la mayoría de eventos de fuga en condiciones reales de operación. Asimismo, se determinaron tiempos promedio de detección de 109.3 segundos cuando la red domiciliaria se encontraba en reposo hidráulico y de

51.45 segundos cuando la red se encontraba en funcionamiento normal con presencia de una fuga. Estos resultados confirman que el sistema es confiable y adecuado para su aplicación en redes de distribución de agua potable domiciliaria.

## Recomendaciones

A partir de los resultados experimentales y del funcionamiento del sistema desarrollado, se presentan las siguientes recomendaciones orientadas a optimizar su desempeño y ampliar su aplicabilidad:

1. **Optimización del servidor TCP:** Se sugiere implementar bibliotecas asíncronas como `asyncio` o `socketserver` para mejorar la gestión de múltiples conexiones al servidor y aumentar la eficiencia en la transmisión de datos.
2. **Integración con bases de datos:** Se recomienda implementar el almacenamiento de los registros de caudal, presión y eventos de fuga en bases de datos locales o en la nube, permitiendo el análisis histórico de la información y facilitando futuras ampliaciones del sistema orientadas al monitoreo remoto.
3. **Mejoras en el algoritmo de detección:** Se plantea incorporar filtros adaptativos o modelos inteligentes que identifiquen microfugas y minimicen los falsos positivos generados por fluctuaciones hidráulicas.
4. **Optimización del sistema de alimentación:** Se recomienda incorporar una etapa de alimentación directamente integrada en la PCB desarrollada, con el propósito de reducir el uso de módulos externos y aumentar el nivel de integración del sistema.

Estas recomendaciones buscan fortalecer el desarrollo del prototipo y promover la continuidad de investigaciones orientadas a la gestión eficiente del recurso hídrico mediante sistemas electrónicos inteligentes.

## Referencias

- Alvarez, R. B., Irazábal, W. C., y Calienes, R. I. G. (2024). Implementación de la fft para la detección de fugas de agua. *Electrónica-UNMSM*.
- Apesteagua Infantes, J. A., y Huarcaya Gonzales, E. (2018). Redes neuronales artificiales aplicadas a la detección de fugas no visibles en las redes de agua potable de la ciudad de lima.
- Bailey, T., y Biessek, A. (2023). *Flutter for beginners: Cross-platform mobile development from hello, world! to app release with flutter 3.10+ and dart 3.x*. Packt Publishing.
- Banzi, M., y Shiloh, M. (2022). *Getting started with arduino* (4.<sup>a</sup> ed.). Maker Media.
- Carrión, P. (2019). *Análisis del comportamiento hidráulico de la línea de aducción y red primaria del sistema de distribución de agua potable en la zona xii de la ciudad del cusco* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
- Castillo, J. I. B. (2009). Detección de fugas en tuberías usando redes neuronales artificiales-edición única.
- CNA. (2007). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. México.
- Espressif Systems. (2023). Esp-idf programming guide [Manual de software informático]. Descargado de <https://docs.espressif.com>
- Espressif Systems. (2024). Esp8266ex datasheet [Manual de software informático].
- Farley, M., y Trow, S. (2003). *Losses in water distribution networks: A practitioner's guide to assessment, monitoring and control*. London: IWA Publishing.
- Forouzan, B. A. (2013). *Tcp/ip protocol suite* (4.<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill.
- Gárate Morales, B. A. (2021). Detección y localización de fugas en parte de la red de distribución a aguas de santiago, utilizando una máquina de vector de apoyo (svm).
- Gast, M. S. (2013). *802.11 wireless networks: The definitive guide* (2.<sup>a</sup> ed.). O'Reilly Media.
- Gutiérrez Baca, E. F. (2016). *Análisis y determinación de agua no facturada (anf) en el sistema de abastecimiento de agua potable en la sub zona larapa en la e.p.s. sedacusco s.a.* (Tesis de pregrado). Universidad Andina del Cusco.
- Halvorsen, H. P. (2024). *Python for control engineering*. University of South-Eastern Norway.

- Jivani, M. (2014). Esp8266: A breakthrough in wireless sensor networks and internet of things. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 13(5), 216–219.
- Kolban, N. (2019). *Kolban's book on esp8266*. Leanpub.
- Liemberger, R., y Wyatt, A. (2019). Quantifying the global non-revenue water problem. *Water Supply*.
- Mays, L. W. (2011). *Water resources engineering* (2.<sup>a</sup> ed.). John Wiley & Sons.
- Naciones Unidas. (2021). *Informe mundial de las naciones unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2021: El valor del agua*. París: UNESCO. Descargado de <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2021>
- Puust, R., Kapelan, Z., Savic, D. A., y Koppel, T. (2010). A review of methods for leakage management in pipe networks. *Urban Water Journal*.
- Sulca Quinto, J. N. (2024). *Diseño e implementación de prototipo de un sistema automatizado para la detección de fugas y control de aniegos en sistemas domiciliarios* (Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica del Perú). Descargado de <https://hdl.handle.net/20.500.12867/10164>
- SUNASS. (2024). *Portal de noticias de la sunass*. Descargado de <https://www.gob.pe/institucion/sunass/noticias> (Accedido: 22-Sep-2024)
- Valvano, J. W. (2017). *Embedded systems: Real-time interfacing to arm cortex-m microcontrollers* (3.<sup>a</sup> ed.). Scotts Valley, CA: CreateSpace Independent Publishing Platform.
- Yelve, S., Pawar, S. S., y Mulaveesala, M. (2017). A real-time water leakage detection system using iot. En *Proceedings of the international conference on smart technologies*.
- Yto Montenegro, J. (2017). Análisis y detección de rupturas en tuberías hidráulicas.

## Anexos

## Anexo 1: Código del nodo principal de adquisición de datos basado en ESP32

Listing 1: Código del nodo principal basado en ESP32 para adquisición y transmisión de datos

```
// =====  
// NODO PRINCIPAL - ESP32  
// Sistema de detección de fugas de agua  
// =====  
  
#include <WiFi.h>  
#include <Ticker.h>  
  
// Credenciales de red WiFi  
  
const char *ssid = "TCPSERVIDOR";  
const char *password = "123456TCP";  
  
// Dirección del servidor  
  
const char *host = "192.168.137.1";  
const int port = 80;  
  
// Variables de control de flujo  
  
bool pulso;  
  
volatile int contador = 0;  
  
int cantidad_pulsos;  
  
bool habilitador = true;  
  
float flujo = 0;  
  
// Temporizador para ejecución periódica  
  
Ticker timer;  
  
// Variables de transmisión  
  
String datos;  
  
String datos1;  
  
// Cliente TCP  
  
WiFiClient client;
```

```

// Variables de tiempo
unsigned long tp = 0;
unsigned long ta = 0;
unsigned long t = 0;
unsigned long contador1 = 0;

// Parámetros del filtro
#define WINDOW_SIZE 11
int readingIndex = 0;
float flujoFiltrado = 0.0;
float flowReadings[WINDOW_SIZE];

// Variables de presión
float Vout = 0;
float presion = 0;

// Función de comparación para ordenamiento (mediana)
int compareFloats(const void *a, const void *b) {
    float fa = *(const float*) a;
    float fb = *(const float*) b;
    return (fa > fb) - (fa < fb);
}

void setup() {
    // Configuración de pines
    pinMode(18, INPUT_PULLUP); // Sensor de flujo
    pinMode(22, OUTPUT); // Control de válvula
    digitalWrite(22, LOW); // Válvula abierta al iniciar
    Serial.begin(115200);

    // Temporizador cada 1 ms
    timer.attach_ms(1, programa_principal);

    // Conexión WiFi
    WiFi.begin(ssid, password);
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {

```

```

    delay(500);
    Serial.print(".");
}
Serial.println("WiFi connected");
Serial.println(WiFi.localIP());
// Conexión TCP
client.connect(host, port);
client.setNoDelay(true);
tp = millis();
// Inicializar buffer de filtrado
for (int i = 0; i < WINDOW_SIZE; i++) {
    flowReadings[i] = 0.0;
}
}
void loop() {
    // Reconexión automática
    if (!client.connected()) {
        client.connect(host, port);
        client.setNoDelay(true);
        delay(50);
    }
    ta = millis();
    t = (ta - tp);
    if (t >= 1000) {
        Vout = analogRead(32) * (3.3/4095);
        if (Vout >= 0.5) {
            presion = ((Vout - 0.5) / 0.8);
        } else {
            presion = 0;
        }
        datos = "S1;" + String(contador1) + ";" + String(presion, 3);
    }
}

```

```

client.print(datos + "\n");

// ===== Cálculo de flujo =====

flujo = (float)contador * 60.0 / 450.0;

cantidad_pulsos = contador;

flowReadings[readingIndex] = flujo;

readingIndex = (readingIndex + 1) % WINDOW_SIZE;

// Filtro mediana

float tempReadings[WINDOW_SIZE];

memcpy(tempReadings, flowReadings, sizeof(flowReadings));

qsort(tempReadings, WINDOW_SIZE, sizeof(float), compareFloats);

flujoFiltrado = tempReadings[WINDOW_SIZE / 2];

contador = 0;

contador1++;

tp = ta;

if (contador1 >= 1000) contador1 = 0;

datos1 = "S2;" + String(contador1) + ";" + String(flujoFiltrado, 3)

+ ";" + String(cantidad_pulsos);

client.print(datos1 + "\n");
}

// ===== Recepción de comandos =====

if (client.available() > 0) {

    String line = client.readStringUntil('\n');

    line.trim();

    // Control de válvula

    if (line == "V0") {

        digitalWrite(22, HIGH); // Cerrar válvula

    }

    else if (line == "V4") {

        digitalWrite(22, LOW); // Abrir válvula

    }

}
}

```

```
}  
  
// ===== Conteo de pulsos =====  
  
void programa_principal() {  
    pulso = digitalRead(18);  
    if (pulso == LOW) {  
        if (habilitador) {  
            contador++;  
            habilitador = false;  
        }  
    } else {  
        habilitador = true;  
    }  
}
```

## Anexo 2. Código del nodo de adquisición de datos en el ramal de lavandería basado en ESP32

Listing 2: Código del nodo de adquisición de datos en el ramal de lavandería

```
// =====  
  
// NODO LAVANDERÍA - ESP32  
  
// Adquisición y transmisión de caudal  
  
#include <WiFi.h>  
  
#include <Ticker.h>  
  
// Credenciales de red  
  
const char *ssid = "TCPSERVIDOR";  
  
const char *password = "123456TCP";  
  
// Dirección del servidor  
  
const char *host = "192.168.137.1";  
  
const int port = 80;  
  
// Variables de flujo  
  
bool pulso;  
  
int contador = 0;  
  
int cantidad_pulsos;  
  
bool habilitador = 1;  
  
float flujo = 0;  
  
// Temporizador  
  
Ticker timer;  
  
// Variables de transmisión  
  
String datos;  
  
String datos1;  
  
// Cliente TCP  
  
WiFiClient client;  
  
// Variables de tiempo  
  
unsigned long tp = 0;  
  
unsigned long ta = 0;
```

```

unsigned long t = 0;
unsigned long contador1 = 0;
// Parámetros del filtro de mediana
#define WINDOW_SIZE 11
int readingIndex = 0;
float flujoFiltrado = 0.0;
float flowReadings[WINDOW_SIZE];
// Función de comparación para filtro
int compareFloats(const void *a, const void *b) {
    float fa = *(const float*) a;
    float fb = *(const float*) b;
    return (fa > fb) - (fa < fb);
}
void setup() {
    pinMode(18, INPUT); // Sensor de flujo
    pinMode(22, OUTPUT); // Control opcional de válvula
    Serial.begin(115200);
    // Temporizador cada 1 ms
    timer.attach_ms(1, programa_principal);
    // Conexión WiFi
    WiFi.begin(ssid, password);
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        delay(500);
        Serial.print(".");
    }
    Serial.println("WiFi connected");
    Serial.println(WiFi.localIP());
    tp = millis();
    // Inicialización del buffer
    for (int i = 0; i < WINDOW_SIZE; i++) {
        flowReadings[i] = 0.0;
    }
}

```

```

    }
}

void loop() {
    // Conexión al servidor
    if (!client.connect(host, port)) {
        delay(5000);
        return;
    }

    ta = millis();
    t = (ta - tp);
    if (t >= 1000) {
        // Cálculo de caudal
        flujo = (float)contador * 60 / 450;
        cantidad_pulsos = contador;
        // ===== FILTRO DE MEDIANA =====
        flowReadings[readingIndex] = flujo;
        readingIndex = (readingIndex + 1) % WINDOW_SIZE;
        float tempReadings[WINDOW_SIZE];
        memcpy(tempReadings, flowReadings, sizeof(flowReadings));
        qsort(tempReadings, WINDOW_SIZE, sizeof(float), compareFloats);
        flujoFiltrado = tempReadings[WINDOW_SIZE / 2];
        // Factor de calibración experimental
        flujoFiltrado = 1.035 * flujoFiltrado;
        // Reinicio de contador
        contador = 0;
        contador1++;
        tp = ta;
        if (contador1 >= 1000) contador1 = 0;

        // Trama de datos S5 (lavandería)
        datos1 = "S5;" + String(contador1) + ";" + String(flujoFiltrado)

```

```

    + ";" + String(cantidad_pulsos);
    client.print(datos1);
}
// Lectura de respuesta del servidor
if (client.available() > 0) {
    String line = client.readStringUntil('\r');
    Serial.println(line);
}
}
// Conteo de pulsos del sensor
void programa_principal() {
    pulso = digitalRead(18);
    if (pulso) {
        if (habilitador) {
            contador++;
            habilitador = 0;
        }
    } else {
        habilitador = 1;
    }
}
}

```

### Anexo 3. Código del nodo de adquisición de datos en el ramal del tanque basado en ESP32

Listing 3: Código del nodo de adquisición de datos en el ramal del tanque

```
// =====  
  
// NODO TANQUE - ESP32  
  
// Medición y transmisión de caudal  
#include <WiFi.h>  
#include <Ticker.h>  
  
// Credenciales de red  
const char *ssid = "TCPSERVIDOR";  
const char *password = "123456TCP";  
  
// Dirección del servidor  
const char *host = "192.168.137.1";  
const int port = 80;  
  
// Variables de flujo  
bool pulso;  
int contador = 0;  
int cantidad_pulsos;  
bool habilitador = 1;  
float flujo = 0;  
  
// Temporizador  
Ticker timer;  
  
// Variables de transmisión  
String datos1;  
  
// Cliente TCP  
WiFiClient client;  
  
// Variables de tiempo  
unsigned long tp = 0;  
unsigned long ta = 0;  
unsigned long t = 0;  
unsigned long contador1 = 0;
```

```

// Parámetros del filtro
#define WINDOW_SIZE 11
int readingIndex = 0;
float flujoFiltrado = 0.0;
float flowReadings[WINDOW_SIZE];
// Comparador para filtro mediana
int compareFloats(const void *a, const void *b) {
    float fa = *(const float*) a;
    float fb = *(const float*) b;
    return (fa > fb) - (fa < fb);
}

void setup() {
    pinMode(18, INPUT_PULLUP); // Sensor de flujo
    Serial.begin(115200);
    // Temporizador cada 1 ms
    timer.attach_ms(1, programa_principal);
    // Conexión WiFi
    WiFi.begin(ssid, password);
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        delay(500);
        Serial.print(".");
    }
    Serial.println("WiFi connected");
    Serial.println(WiFi.localIP());
    // Conexión inicial al servidor
    client.connect(host, port);
    client.setNoDelay(true);
    tp = millis();
    // Inicialización del buffer
    for (int i = 0; i < WINDOW_SIZE; i++) {
        flowReadings[i] = 0.0;
    }
}

```

```

    }
}

void loop() {
    // Reconexión automática
    if (!client.connected()) {
        client.connect(host, port);
        client.setNoDelay(true);
        delay(50);
    }

    ta = millis();
    t = (ta - tp);
    if (t >= 1000) {
        // Cálculo de caudal
        flujo = (float)contador * 60.0 / 450.0;
        cantidad_pulsos = contador;

        // ===== FILTRO DE MEDIANA =====
        flowReadings[readingIndex] = flujo;
        readingIndex = (readingIndex + 1) % WINDOW_SIZE;
        float tempReadings[WINDOW_SIZE];
        memcpy(tempReadings, flowReadings, sizeof(flowReadings));
        qsort(tempReadings, WINDOW_SIZE, sizeof(float), compareFloats)
        flujoFiltrado = tempReadings[WINDOW_SIZE / 2];

        // Factor de calibración experimental
        flujoFiltrado = 1.026 * flujoFiltrado;

        // Reinicio de contador
        contador = 0;
        contador1++;

        tp = ta;

        if (contador1 >= 1000) contador1 = 0;

        // ===== TRAMA S3 (tanque) =====
        datos1 = "S3;" + String(contador1) + ";" +

```

```
        String(flujoFiltrado, 3) + ";" +  
        String(cantidad_pulsos);  
  
    client.print(datos1 + "\n");  
}  
}  
// Conteo de pulsos del sensor  
void programa_principal() {  
    pulso = digitalRead(18);  
    if (pulso == LOW) {  
        if (habilitador) {  
            contador++;  
            habilitador = false;  
        }  
    } else {  
        habilitador = true;  
    }  
}
```

## Anexo 4. Código del módulo de comunicación basado en ESP8266

Listing 4: Código del módulo de comunicación y control de alarma basado en ESP8266

```
// =====  
  
// MÓDULO ESP8266  
  
// Comunicación TCP y control de alarma  
#include <ESP8266WiFi.h>  
  
// Credenciales WiFi  
const char* ssid = "TCPSERVIDOR";  
const char* password = "123456TCP";  
  
// Dirección del servidor (Python)  
const char* host = "192.168.137.1";  
const int port = 80;  
  
// Cliente TCP  
WiFiClient client;  
  
// Pin de salida para sirena o relé  
#define SIRENA D5  
  
void setup() {  
    // Configuración del pin de la sirena  
    pinMode(SIRENA, OUTPUT);  
    digitalWrite(SIRENA, LOW); // Sirena apagada inicialmente  
    Serial.begin(115200);  
  
    // Conexión WiFi  
    WiFi.begin(ssid, password);  
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {  
        delay(500);  
    }  
    Serial.println("WiFi conectado");  
    Serial.println(WiFi.localIP());  
}  
  
void loop() {
```

```
// Reconexión automática al servidor
if (!client.connected()) {
    if (!client.connect(host, port)) {
        delay(1000);
        return;
    }
}

// Recepción de comandos desde el servidor
if (client.available()) {
    String msg = client.readStringUntil('\n');
    msg.trim();
    // Control de la sirena
    if (msg == "ON") {
        digitalWrite(SIRENA, HIGH); // Activar alarma
    }
    else if (msg == "OFF") {
        digitalWrite(SIRENA, LOW); // Desactivar alarma
    }
}
}
```

## Anexo 5. Código del servidor y procesamiento de datos del sistema de detección de fugas

```
# IMPORTACIÓN DE LIBRERÍAS
import socket
import threading
import multiprocessing
import numpy as np
import pandas as pd
import time
from datetime import datetime, timedelta
import os

# COLAS DE DATOS
datos_queue = multiprocessing.Queue() # Presión (S1)
datos_queue1 = multiprocessing.Queue() # Flujo principal (S2)
datos_queue2 = multiprocessing.Queue() # Tanque (S3)
datos_queue3 = multiprocessing.Queue() # Lavandería (S5)
datos_queue4 = multiprocessing.Queue() # Fuga / interfaz

# PARÁMETROS GENERALES
datos = 5
contador = 0

# CONTROL DEL SERVIDOR
servidor_activo = threading.Event()
hilo_servidor = None

# VARIABLES PARA FILTRADO
valoresp = np.zeros(datos)
pesosp = np.array([(0.5)**(n+1) for n in range(datos)])
valoresl = np.zeros(datos)
pesosl = np.array([(0.5)**(n+1) for n in range(datos)])
valorest = np.zeros(datos)
pesost = np.array([(0.5)**(n+1) for n in range(datos)])

# VARIABLES DE FLUJO
```

```

flujop = []
flujol = []
flujot = []

# BUFFERS DE SINCRONIZACIÓN
flujop_sincronizado = []
flujol_sincronizado = []
flujot_sincronizado = []

# VARIABLES DE PROCESAMIENTO
flujo_ponderado_lavanderia = 0
flujo_ponderado_principal = 0
flujo_ponderado_tanque = 0

# CONTADORES DE PULSOS
contador_pulsos1 = 0
contador_pulsos2 = 0
contador_pulsos3 = 0

# VARIABLES PARA ALMACENAMIENTO
col1 = []
col2 = []
col3 = []
col4 = []
col5 = []
col6 = []
col7 = []
col8 = []

datos_fuga = []
datos_fuga1 = []
datos_fuga2 = []
datos_fuga3 = []

# CONTROL DE ARCHIVO
lock = threading.Lock()
archivo = "datos_fugas.xlsx"

```

```

# CONTROL DE TRANSITORIOS
modo_transitorio = False
tiempo_salida_transitorio = 0
# FUNCIÓN PARA ENVIAR FUGA A INTERFAZ
def enviar_fuga_interfaz(fuga):
    try:
        datos_queue4.put((time.time(), float(fuga), 1 if fuga >= 0.14 else 0))
    except:
        pass
    clientes_conectados = []
global flujo_principal
global flujo_lavanderia
global flujo_tanque
flujo_principal=0
# --- Buffers para alfa y fuga suavizada ---
from collections import deque
# Buffers suavizados para alfa y fuga
buffer_alpha = deque(maxlen=13) # ventana para promediar alfa (más estable)
buffer_fuga = deque(maxlen=15) # ventana para promediar fuga (más rápida)
# Contador anti falsos positivos y estado de alarma
contador_fuga = 0
alarma_activa = False
flujo_lavanderia=0
flujo_tanque=0
# VARIABLES LATCH PARA INTERFAZ (VALORES CAPTURADOS)
# Se actualizan SOLO al finalizar el cálculo ponderado en Monitoreo_Fuga()
ui_presion = 0.0
ui_flujo_p = 0.0
ui_flujo_l = 0.0
ui_flujo_t = 0.0
ui_fuga = 0.0

```

```

ui_estado_fuga = 0
ui_timestamp = 0.0
tp=time.time()
def manejar_cliente(conn, addr):
    # print(f" Conexión desde {addr}")

    global flujo_principal
    global flujo_lavanderia
    global flujo_tanque
    global presion_medido
    global count_presion
    global count_principal
    global count_lavanderia
    global count_tanque

    global tp
    global ta
    global t
    global q

    q=1

    with conn:

        while servidor_activo.is_set():

            try:

                data = conn.recv(1024)

                if not data:

                    break # Si no hay datos, el cliente se desconectó

                mensaje = data.decode().strip()

                # COMANDOS DE CONTROL DE VÁLVULA

                if mensaje == "V0":

                    enviar_a_cliente("V0")

                    continue

                if mensaje == "V4":

                    enviar_a_cliente("V4")

```

```

        continue

    if mensaje.startswith("S1;"): # presion
        partes = mensaje.split(";")
        try:
            # Asumimos que S1;x;y significa x e y, y z puede ser 0
            x1 = float(partes[1])
            y1 = float(partes[2])
            z1 = 0.0 # Valor por defecto para z si no se envía
            datos_queue.put((x1, y1, z1))
            presion_medido=y1
            try:
                global ui_presion
                ui_presion = presion_medido
            except:
                pass

        except (IndexError, ValueError):
            print("")

    # Procesar la trama S2 para Flujo Principal (S2;x;z)
    elif mensaje.startswith("S2;"): # flujo principal
        partes = mensaje.split(";")
        try:
            # Asumimos que S2;x;z significa x y z, y y puede ser 0
            x2 = float(partes[1])
            y2 = 0.0 # Valor por defecto para y si no se envía
            z2 = float(partes[2])
            contador_pulsos1= int(partes[3])
            datos_queue1.put((x2, y2, z2))
            # print(f"x={x}")
            # print(f"z={z}")

```

```

    # global flujop
    flujo_principal=z2
    except (IndexError, ValueError):
        print("")
        # error S2
elif mensaje.startswith("S3;"): # tanque
    partes = mensaje.split(";")
    try:
        x3 = float(partes[1])
        y3 = float(partes[2])
        contador_pulsos3=int(partes[3])
        datos_queue2.put((x3, y3))

        flujo_tanque=y3
    except (IndexError, ValueError):
        print("")
        # error S3

elif mensaje.startswith("S4;"): # fuga
    partes = mensaje.split(";")
    try:
        x4 = float(partes[1])
        y4 = float(partes[2])
        datos_queue4.put((x4, y4))

    except (IndexError, ValueError):
        print("")
        # error S4

elif mensaje.startswith("S5;"): # lavanderia
    partes = mensaje.split(";")

```

```

        try:
            x5 = float(partes[1])
            y5 = float(partes[2])
            contador_pulsos2=int(partes[3])
            datos_queue3.put((x5, y5))
            flujo_lavanderia=y5
        except (IndexError, ValueError):
            print("")
            # error S5

# algoritmo
Monitoreo_Fuga()

""" ta = time.time()
if q:
    t=ta-tp
if t>=90:
    Monitoreo_Fuga()
    t=120
    q=0"""
except ConnectionResetError:
    print("")
    # cliente desconectado
    break

except Exception as e:
    print("")
    # error general

# fin cliente
def servidor_tcp(ip, port):

```

```

"""
Servidor TCP principal
"""

with socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM) as s:
    try:
        s.bind((ip, port))
        s.listen()
        servidor_activo.set() # activo
        print(f"Servidor en {ip}:{port}")
        while servidor_activo.is_set():
            try:
                s.settimeout(1.0) # timeout
                conn, addr = s.accept() # nueva conexion
                clientes_conectados.append(conn)

                # hilo cliente
                threading.Thread(
                    target=manejar_cliente,
                    args=(conn, addr),
                    daemon=True
                ).start()

            except socket.timeout:
                continue

            except Exception as e:
                print(f"Error servidor: {e}")
                if not servidor_activo.is_set():
                    break

    except OSError as e:

```

```

        print(f"Error inicio: {e}")

    except Exception as e:
        print(f"Error general: {e}")

print("Servidor detenido")

def iniciar_servidor(ip, port):
    """
    Inicia el servidor TCP en un hilo
    """
    global hilo_servidor
    if hilo_servidor is None or not hilo_servidor.is_alive():
        servidor_activo.set() # activar servidor
        hilo_servidor = threading.Thread(target=servidor_tcp,
            args=(ip, port), daemon=True)
        hilo_servidor.start() # iniciar hilo
        print("Servidor iniciado correctamente.")
    else:
        print("Servidor ya en ejecución.")

def detener_servidor():
    """
    Detiene el servidor TCP
    """
    if servidor_activo.is_set():
        servidor_activo.clear() # detener servidor
        print("Solicitando detener servidor...")
    else:
        print("Servidor no activo.")

def enviar_a_cliente(mensaje):
    print(f"Enviando: {mensaje}")

    for cliente in clientes_conectados[:]: # copia lista

```

```

    try:
        if cliente.fileno() == -1: # cliente cerrado
            print("Eliminando cliente")
            clientes_conectados.remove(cliente)
            continue

        cliente.sendall((mensaje + "\n").encode()) # enviar

    except Exception as e:
        print(f"Error envio: {e}")
        try:
            cliente.close()
        except:
            pass

        if cliente in clientes_conectados:
            clientes_conectados.remove(cliente)
\begin{lstlisting}[language=Python, breaklines=true]
def alarma():
    """
    Activa alarma (envía ON)
    """
    print("Alarma iniciada")
    try:
        enviar_a_cliente("ON")
    except Exception as e:
        print(f"Error alarma: {e}")

def promedio_ponderado(fl):
    dat = len(fl)
    pesos = np.array([(0.5)**(n+1) for n in range(dat)])
    val = np.array(fl)

```

```

    indice_ordenado = np.argsort(val)
    valor_ordenado = val[indice_ordenado]
    flujo_ponderado = round(np.dot(valor_ordenado, pesos), 3)
    return flujo_ponderado

def calcular_alpha_promedio_y_fuga(flujo_p, flujo_l, flujo_t):
    global buffer_alpha, buffer_fuga

    if flujo_p > 0.01:
        alfa = (flujo_l + flujo_t) / flujo_p # coeficiente
    else:
        alfa = 1.0 # sin flujo

    fuga_inst = max(0, flujo_p - (flujo_l + flujo_t)) # fuga
    buffer_alpha.append(alfa)
    buffer_fuga.append(fuga_inst)
    alfa_prom = sum(buffer_alpha) / len(buffer_alpha) # promedio alfa
    fuga_prom = sum(buffer_fuga) / len(buffer_fuga) # promedio fuga
    return alfa, alfa_prom, fuga_inst, fuga_prom

def Monitoreo_Fuga():
    global flujo_principal, flujo_lavanderia, flujo_tanque
    global flujop_sincronizado, flujol_sincronizado, flujot_sincronizado
    global modo_transitorio, tiempo_salida_transitorio
    global lock, archivo
    global buffer_alpha, buffer_fuga,

    contador_fuga, alarma_activa flujol_sincronizado.append(flujo_lavanderia)
    flujot_sincronizado.append(flujo_tanque)

    # procesamiento minimo
    if len(flujop_sincronizado)
    >= 4 and len(flujol_sincronizado) >= 4 and len(flujot_sincronizado) >= 4:
        # flujos ponderados

```

```

flujo_p = promedio_ponderado(flujop_sincronizado)
flujo_l = promedio_ponderado(flujol_sincronizado)
flujo_t = promedio_ponderado(flujot_sincronizado)
print(f"flujo_p={flujo_p:.3f} flujo_l={flujo_l:.3f} flujo_t={flujo_t:.3f}")

# clasificacion
if flujo_p > 0 and flujo_l > 0 and flujo_t > 0:
    print("CASO: 3 consumos")
elif flujo_p > 0 and flujo_l > 0 and flujo_t == 0:
    print("CASO: principal + lavanderia")
elif flujo_p > 0 and flujo_l == 0 and flujo_t > 0:
    print("CASO: principal + tanque")
elif flujo_p > 0 and flujo_l == 0 and flujo_t == 0:
    print("CASO: solo principal")
elif flujo_p == 0 and flujo_l == 0 and flujo_t == 0:
    print("CASO: reposo")
else:
    print("CASO: no clasificado")

# limpiar buffers
flujop_sincronizado.clear()
flujol_sincronizado.clear()
flujot_sincronizado.clear()

# bloqueo por cierre
if flujo_p > 0.05 and flujo_l <= 0.01 and flujo_t <= 0.01:
    if not modo_transitorio:
        modo_transitorio = True
        tiempo_salida_transitorio = time.time() + 4.3
        print("bloqueo temporal")
    if time.time() < tiempo_salida_transitorio:
        return
    else:
        modo_transitorio = False

```

```

# filtro transitorio

if (abs(flujo_principal - flujo_p) >= 1.0 or
    abs(flujo_lavanderia - flujo_l) >= 1.0 or
    abs(flujo_tanque - flujo_t) >= 1.0):
    modo_transitorio = True
    tiempo_salida_transitorio = time.time() + 3.5

if modo_transitorio:
    if time.time() < tiempo_salida_transitorio:
        print('Transitorio: bloqueo')
        return
    else:
        modo_transitorio = False

# calculo alfa y fuga

alfa, alfa_prom, fuga_inst, fuga_prom =
calcular_alpha_promedio_y_fuga(flujo_p, flujo_l, flujo_t)
print(f"_inst={alfa:.3f} _prom=
{alfa_prom:.3f} fuga_inst={fuga_inst:.3f} fuga_prom={fuga_prom:.3f}")

# latch interfaz

try:
    global ui_flujo_p, ui_flujo_l,

    ui_flujo_t, ui_fuga, ui_estado_fuga, ui_timestamp, ui_presion
    ui_flujo_p = float(flujo_p)
    ui_flujo_l = float(flujo_l)
    ui_flujo_t = float(flujo_t)
    ui_fuga = float(fuga_inst)
    ui_estado_fuga = 1 if (alfa_prom < umbral_alpha and
    fuga_prom >= umbral_fuga) else 0
    ui_timestamp = time.time()

```

```

except:
    pass

# umbrales

umbral_alpha = 0.93
umbral_fuga = 0.14
min_muestras_fuga = 15
repeticiones_necesarias = 15

# deteccion fuga

if len(buffer_fuga) >= min_muestras_fuga:
    if alfa_prom < umbral_alpha and fuga_prom >= umbral_fuga:
        contador_fuga += 1
        print(f"posible fuga {contador_fuga}/{repeticiones_necesarias}")

        if contador_fuga >= repeticiones_necesarias and not alarma_activa:
            print("FUGA DETECTADA")
            alarma_activa = True
            hilo_alarma = threading.Thread(target=alarma, daemon=True)
            hilo_alarma.start()
    else:
        if alarma_activa:
            print("normal")
            try:
                enviar_a_cliente("OFF")
            except Exception as e:
                print(f"error OFF: {e}")
            alarma_activa = False
            contador_fuga = 0
        else:
            print(f"esperando muestras {len(buffer_fuga)}/{min_muestras_fuga}")

# envio interfaz

enviar_fuga_interfaz(fuga_inst)

```

```

    # guardar datos

    hora_actual = datetime.now().strftime("%Y-%m-%d %H:%M:%S")

    df = pd.DataFrame([
        'Hora': hora_actual,
        'Fuga L/min': fuga_inst,
        'Flujo principal': flujo_p,
        'Flujo lavanderia': flujo_l,
        'Flujo tanque': flujo_t
    ])

with lock:
    if not os.path.exists(archivo):
        df.to_excel(archivo, index=False, sheet_name="Sheet1")
    else:
        with pd.ExcelWriter(archivo, engine="openpyxl", mode="a", if_sheet_exists=
"overlay") as writer:
            hoja = writer.sheets["Sheet1"]
            inicio = hoja.max_row
            df.to_excel(writer, index=False, header=False, startrow=inicio)

    # reset sistema

    if flujo_p <= 0.01 and flujo_l <= 0.01 and flujo_t <= 0.01:
        buffer_alpha.clear()
        buffer_fuga.clear()
        contador_fuga = 0
        if alarma_activa:
            print("reset")
            try:
                enviar_a_cliente("OFF")
            except Exception as e:
                print(f"error OFF: {e}")
            alarma_activa = False

```

## Anexo 6. Código de generación de gráficas del sistema

```
import flet as ft
import matplotlib
matplotlib.use("Agg")
import matplotlib.pyplot as plt
from flet.matplotlib_chart import MatplotlibChart
import time
import threading
from collections import deque
import statistic

_data = 1000 # limite eje tiempo
# ===== PRESION =====

def ventana_grafica_presion(queue):

    def view(page: ft.Page):
        page.title = "Presion"
        x_data, y_data = [], []
        start_time = time.time()
        fig, ax = plt.subplots()
        line, = ax.plot([], [])
        ax.set_xlim(0, _data)
        ax.set_ylim(0,1)
        ax.set_xlabel("Tiempo (s)")
        ax.set_ylabel("Presion (MPa)")
        ax.set_title("Grafica de Presion")
        chart = MatplotlibChart(fig, expand=True)
        buffer_vis = deque(maxlen=11) # filtro mediana

        def actualizar():
            while True:
                if not queue.empty():
                    _,y,_ = queue.get()
```

```

        buffer_vis.append(y)

        y_vis = statistics.median(buffer_vis)

        t = time.time() - start_time

        x_data.append(t)

        y_data.append(y_vis)

        line.set_data(x_data, y_data)

        chart.update()

        time.sleep(0.1)

    threading.Thread(target=actualizar, daemon=True).start()

    page.add(chart)

ft.app(target=view)

# ===== FLUJO PRINCIPAL =====

def ventana_grafica_flujo_principal(queue):

    def view(page: ft.Page):

        page.title = "Flujo Principal"

        x_data, z_data = [], []

        start_time = time.time()

        fig, ax = plt.subplots()

        line, = ax.plot([], [], 'b-')

        ax.set_xlim(0, _data)

        ax.set_ylim(0, 20)

        ax.set_xlabel("Tiempo (s)")

        ax.set_ylabel("Flujo (L/min)")

        ax.set_title("Flujo Principal")

        chart = MatplotlibChart(fig, expand=True)

        buffer_vis = deque(maxlen=11)

        def actualizar():

            while True:

                if not queue.empty():

                    _, _, z = queue.get()

                    buffer_vis.append(z)

```

```

        z_vis = statistics.median(buffer_vis)

        t = time.time() - start_time

        x_data.append(t)

        z_data.append(z_vis)

        line.set_data(x_data, z_data)

        chart.update()

        time.sleep(0.1)

    threading.Thread(target=actualizar, daemon=True).start()

    page.add(chart)

ft.app(target=view)

# ===== FLUJO FUGA =====

def ventana_grafica_flujo_fuga(queue):

    def view(page: ft.Page):

        page.title = "Flujo Fuga"

        x_data, y_data, estado_data = [], [], []

        start_time = time.time()

        fig, ax = plt.subplots()

        ax.set_xlim(0, _data)

        ax.set_ylim(0, 20)

        ax.set_xlabel("Tiempo (s)")

        ax.set_ylabel("Fuga (L/min)")

        ax.set_title("Flujo de Fuga")

        ax.axhline(0.14, linestyle="--", linewidth=2, label="Umbral")

        ax.legend()

        chart = MatplotlibChart(fig, expand=True)

        buffer_vis = deque(maxlen=11)

        def actualizar():

            while True:

                if not queue.empty():

                    _, fuga, estado = queue.get()

                    buffer_vis.append(fuga)

```

```

fuga_vis = statistics.median(buffer_vis)

t = time.time() - start_time
x_data.append(t)
y_data.append(fuga_vis)
estado_data.append(estado)


ax.cla()
ax.set_xlim(0, _data)
ax.set_ylim(0, 20)
ax.set_xlabel("Tiempo (s)")
ax.set_ylabel("Fuga (L/min)")
ax.set_title("Flujo de Fuga")
ax.axhline(0.14, linestyle="--")


for i in range(1, len(y_data)):
    color = "red" if estado_data[i] == 1 else "green"
    ax.plot([x_data[i-1], x_data[i]],
            [y_data[i-1], y_data[i]],
            color=color)

chart.update()

time.sleep(0.1) threading.Thread(target=actualizar, daemon=True).start()
page.add(chart)


ft.app(target=view)

```

## Anexo 7. Código de la interfaz gráfica del sistema

```
import flet as interfaz
from wifi_cliente import (
    iniciar_servidor,
    detener_servidor,
    datos_queue,
    datos_queue1,
    datos_queue2,
    datos_queue3,
    datos_queue4,
    enviar_a_cliente,
)
import grafica
import wifi_cliente as wc
import multiprocessing
import threading
import time
from datetime import datetime
def GUIDE(fg: interfaz.Page):
    fg.title = "Interfaz de detección de fugas de agua"
    fg.window.width = 900
    fg.window.height = 600
    titulo = interfaz.Text("INTERFAZ DE DETECCIÓN DE FUGAS")
    txt_estado_fuga = interfaz.Text("SIN FUGA")
    txt_conexion = interfaz.Text("Desconectado")
    txt_estado_valvula = interfaz.Text("Válvula abierta")
    txt_presion = interfaz.Text("Presión: --")
    txt_flujo_p = interfaz.Text("Flujo principal: --")
```

```

txt_flujo_l = interfaz.Text("Flujo lavandería: --")
txt_flujo_t = interfaz.Text("Flujo tanque: --")
txt_fuga = interfaz.Text("Fuga estimada: --")

historial = interfaz.ListView(expand=True)

def clic_btn_presion(e):multiprocessing.Process
(target=grafica.ventana_grafica_presion, args=(datos_queue,)).start()

def clic_btn_flujo_principal(e):multiprocessing.Process
(target=grafica.ventana_grafica_flujo_principal,
args=(datos_queue1,)).start()

def clic_btn_flujo_lavanderia(e):
multiprocessing.Process
(target=grafica.ventana_grafica_flujo_lavanderia,
args=(datos_queue3,)).start()

def clic_btn_flujo_tanque(e):
multiprocessing.Process
(target=grafica.ventana_grafica_flujo_tanque,
args=(datos_queue2,)).start()

def clic_btn_fuga(e):
multiprocessing.Process
(target=grafica.ventana_grafica_flujo_fuga,
args=(datos_queue4,)).start()
\begin{lstlisting}[
language=Python,
breaklines=true,

```

```

breakatwhitespace=true,
columns=fullflexible,
basicstyle=\ttfamily\normalsize
]
def clic_btn_conectar(e):
    if not btn_conectar.data:
        iniciar_servidor(txt_ip.value, int(txt_port.value))
        txt_ip.disabled = True
        txt_port.disabled = True
        btn_conectar.text = "Desconectar"
        btn_conectar.data = True
        txt_conexion.value = "Conectado"
        txt_conexion.color = "green"
        agregar_evento("Servidor conectado.")
    else:
        detener_servidor()
        txt_ip.disabled = False
        txt_port.disabled = False
        btn_conectar.text = "Conectar"
        btn_conectar.data = False
        txt_conexion.value = "Desconectado"
        txt_conexion.color = "red"
        agregar_evento("Servidor desconectado.")
    fg.update()

btn_conectar = interfaz.ElevatedButton("Conectar",
on_click=clic_btn_conectar, data=False, width=120)
def clic_btn_valvula(e):
    boton = e.control

```

```

if not boton.data:
    enviar_a_cliente("V0")
    boton.bgcolor = "red"
    txt_estado_valvula.value = "Válvula cerrada"
    txt_estado_valvula.color = "red"
    boton.data = True
    agregar_evento("Válvula cerrada.")
else:
    enviar_a_cliente("V4")
    boton.bgcolor = "green"
    txt_estado_valvula.value = "Válvula abierta"
    txt_estado_valvula.color = "green"
    boton.data = False
    agregar_evento("Válvula abierta.")

fg.update()

btn_valvula = interfaz.ElevatedButton(
    "Control válvula",
    on_click=clic_btn_valvula,
    width=200,
    height=45,
    data=False,
)

panel_estado = interfaz.Card(
    interfaz.Container(
        content=interfaz.Column(
            [txt_estado_fuga],
            horizontal_alignment="center"

```

```

        )
    )
)

panel_valvula = interfaz.Card(
    interfaz.Container(
        content=interfaz.Column(
            [
                txt_estado_valvula,
                btn_valvula,
            ],
            horizontal_alignment="center",
        )
    )
)

panel_sensores = interfaz.Card(
    interfaz.Container(
        content=interfaz.Column(
            [
                txt_presion,
                txt_flujo_p,
                txt_flujo_l,
                txt_flujo_t,
                txt_fuga,
                btn_presion,
                btn_flujo_principal,
                btn_flujo_lavanderia,
                btn_flujo_tanque,
                btn_fuga,
            ]
        )
    )
)

```

```

        ]
    )
)
panel_conexion = interfaz.Card(
    interfaz.Container(
        content=interfaz.Column(
            [
                interfaz.Row([txt_ip, txt_port]),
                interfaz.Row([btn_conectar, txt_conexion]),
            ]
        )
    )
)
panel_imagen = interfaz.Card(
    interfaz.Container(
        content=interfaz.Column(
            [
                interfaz.Image(
                    src="interfaz2.png",
                    height=350,
                    fit=interfaz.ImageFit.CONTAIN
                ),
            ],
            horizontal_alignment="center",
        )
    )
)

```

```

panel_historial = interfaz.Card(
    interfaz.Container(
        content=interfaz.Column(
            [historial],
            expand=True
        )
    )
)
col_izquierda = interfaz.Column([
    panel_estado,
    panel_valvula,
    panel_sensores,
    panel_conexion
], expand=True)
col_derecha = interfaz.Column([
    panel_imagen,
    panel_historial
], expand=True)
fg.add(
    interfaz.Column([
        titulo,
        interfaz.Row([col_izquierda, col_derecha], expand=True),
    ], expand=True)
)
def actualizar():
    while True:
        try:
            txt_presion.value = f"Presión: {wc.ui_presion:.2f} MPa"
            txt_flujo_p.value = f"Flujo principal: {wc.ui_flujo_p:.2f} "

```

```
txt_flujo_l.value = f"Flujo lavandería: {wc.ui_flujo_l:.2f} "  
txt_flujo_t.value = f"Flujo tanque: {wc.ui_flujo_t:.2f} "  
txt_fuga.value = f"Fuga estimada: {wc.ui_fuga:.2f}"  
  
if wc.ui_estado_fuga == 1:  
    txt_estado_fuga.value = "FUGA DETECTADA"  
    txt_estado_fuga.color = "red"  
else:  
    txt_estado_fuga.value = "SIN FUGA"  
    txt_estado_fuga.color = "green"  
  
    fg.update()  
except:  
    pass  
  
time.sleep(0.2)  
  
threading.Thread(target=actualizar, daemon=True).start()
```

## Anexo 8. Código principal de ejecución del sistema

```
#import wifi_cliente as wf  
import Guide as gf  
import flet as fl  
# ejecución principal del sistema  
if __name__ == "__main__":  
    fl.app(gf.GUIDE)
```



Anexo 10. Diagrama P&ID del Sistema Electrónico de Detección de Fugas de Agua

