

# Implementación y Validación Experimental de un Sistema de Detección de Fugas Usando un Simulador de Fallos y una Plataforma IoT

Ignacio Ventura-Cruz <sup>1\*</sup>, Ricardo Camacho-Rivera <sup>1</sup>, Miriam Edith Pérez-Romero <sup>2</sup>, Donaji Jiménez-Islas <sup>3</sup> y Benigno Muñoz-Barrón <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Afiliación 1; TecNM / Campus Huichapan, División de Ingeniería Mecatrónica, México

<sup>2</sup> Afiliación 2; TecNM / Campus Huichapan, División de Ingeniería en Gestión Empresarial, México

<sup>3</sup> Afiliación 3; TecNM / Campus Huichapan, División de Ingeniería en Energías Renovables, México

\* Correspondencia: [iventura@iteshu.edu.mx](mailto:iventura@iteshu.edu.mx).

**Resumen:** Las fugas en sanitarios representan un problema crítico de desperdicio hídrico, donde una unidad puede perder hasta 750 litros diarios [1]. En México, el 38% del agua potable se pierde [2], lo que ha motivado al CONACYT [3] a impulsar soluciones tecnológicas para el uso eficiente del agua. Este estudio se desarrolló en condiciones de laboratorio. Se implementó un sistema IoT basado en ESP32 con sensores de flujo y nivel, y electroválvula, conectado a un banco de pruebas diseñado para simular fugas. La información fue enviada mediante el protocolo MQTT hacia una base de datos en SQL Server y visualizada en una HMI desarrollada en C#. Los resultados obtenidos en este entorno controlado validan que el sistema detecta fugas eficientemente, almacena datos y los visualiza en tiempo real. La arquitectura propuesta representa una solución tecnológica realizable para el monitoreo automatizado de fugas, alineada con los objetivos de sostenibilidad hídrica.

**Keywords:** *Fugas de agua, IoT, ESP32, MQTT, eficiencia hídrica*

## 1. Introducción

El acceso al agua potable, reconocido como derecho humano fundamental por la Organización Mundial de la Salud (OMS) [4], enfrenta una crisis global creciente. Esta situación se ve agravada por las pérdidas en los sistemas de distribución, donde aproximadamente el 30% del agua suministrada en zonas urbanas se pierde por fugas [5]. El problema adquiere una dimensión crítica en las instalaciones sanitarias, ya que fallas en componentes como válvulas y flotadores pueden generar desperdicios de entre 200 y 750 litros diarios por unidad [2]. La OMS [4] identifica esta ineficiencia como un obstáculo directo para el cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) relacionado con los recursos hídricos.

La relevancia del agua para la salud pública, el bienestar social y la productividad económica es subrayada por la SEMARNAT y CONAGUA [6]. No obstante, la crisis hídrica se intensifica debido a fenómenos como la urbanización y la industrialización [7]. En el caso específico de México, el cambio en la cobertura terrestre, las presiones del sector productivo y el crecimiento urbano comprometen el ciclo natural del agua, mientras que el deterioro de cuencas y acuíferos amenaza la sanidad, la economía y la adaptación climática [6]. Ante este escenario, el CONACYT [3] ha establecido una línea estratégica en gestión hídrica, convocando al desarrollo de soluciones eficientes y sostenibles.

En el contexto nacional, CONAGUA [2] documenta que el 38% del agua potable se pierde, cifra que supera el promedio global. Los sistemas de saneamiento, en particular aquellos con infraestructura obsoleta o mantenimiento deficiente, son responsables de gran parte de estas pérdidas [3]. Investigaciones revelan que en centros urbanos de alta densidad, como la Ciudad de México, las fugas en sanitarios pueden representar hasta

**Citar este trabajo:** Ventura-Cruz, I.; Camacho-Rivera, R.; Pérez-Romero, M. E.; Jiménez-Islas, D.; Muñoz-Barrón, B. Implementación y Validación Experimental de un Sistema de Detección de Fugas Usando un Simulador de Fallos y una Plataforma IoT. *REIA* 2025, 9, 2.

Recibido: 29/11/2025

Aceptado: 16/12/2025

Publicado: 27/02/2026

una cuarta parte del consumo doméstico [4], evidenciando la urgencia de mecanismos de monitoreo accesibles.

Este desafío es palpable en regiones como Hidalgo. En Pachuca y su zona conurbada, las pérdidas en excusados y tomas hidráulicas residenciales provocan que cerca de una quinta parte del suministro domiciliario no sea aprovechado [8]. La entidad rectora (CAASIM) reporta un promedio de 48 reparaciones diarias por filtraciones, y siete de cada diez usuarios manifiestan inconvenientes con el servicio [9]. Las metodologías correctivas vigentes, como verificaciones programadas o pruebas de coloración, han demostrado ser insuficientes para establecer un sistema de detección automatizada y preventiva.

Por lo tanto, la implementación de tecnologías para la detección oportuna se erige como una estrategia prioritaria [10]. Dispositivos basados en sensores IoT y microcontroladores pueden reducir pérdidas entre un 45% y un 70% al identificar fugas en tiempo real [11] y generar alertas automatizadas [12]. Esta solución es especialmente crítica en espacios de alto tráfico, donde el monitoreo inteligente ha demostrado disminuir el desperdicio hasta en un 60% [13].

Desde la perspectiva de la Ingeniería Mecatrónica, esta investigación propone una solución integral que sintetiza electrónica, control automático, programación y diseño mecánico. El objetivo es desarrollar un dispositivo modular que optimice el uso del agua, promueva su ahorro y prevenga desperdicios, facilitando su adopción en diversos entornos sin requerir infraestructura adicional [1]. Este trabajo representa una contribución tecnológica concreta para transitar hacia una gestión hídrica más eficiente y alineada con los principios de sostenibilidad.

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1 Diseño Experimental y Metodología

Para garantizar un desarrollo riguroso y reproducible del sistema de detección de fugas, se adoptó la metodología de desarrollo de sistemas mecatrónicos propuesta por Render et al. [15]. Este enfoque cuantitativo organiza la investigación en siete fases iterativas que se aplicaron secuencialmente al presente proyecto.



Figura 1. Metodología [15] adaptada para el desarrollo del dispositivo de detección de fugas

#### 2.1.1 Fase 1: Definición de Objetivos y Requisitos

Se estableció como objetivo principal desarrollar un sistema mecatrónico integral para la detección temprana de fugas en sanitarios. Los requisitos funcionales incluyeron: monitoreo multivariable (flujo y nivel), detección inteligente mediante fusión sensorial, comunicación IoT, actuación automatizada y registro de datos. Los requisitos no funcionales consideraron integración no invasiva, versatilidad de entorno, confiabilidad, eficiencia energética y costo accesible.

#### 2.1.2 Fase 2: Especificación de Componentes

La selección de componentes se realizó mediante análisis cuantitativo basado en hojas técnicas, costo, disponibilidad y eficiencia energética. La Tabla 1 detalla los componentes principales seleccionados.

Tabla 1. Especificación técnica de componentes principales

Componente	Modelo	Especificaciones	Función en el sistema
Microcontrolador	ESP32 DEV-Kit V1	Dual-core 240MHz, WiFi/Bluetooth, 4MB Flash	Procesamiento central y comunicación inalámbrica
Sensor de flujo	YF-S201	1-30 L/min, efecto Hall, 450 pulsos/L	Medición de caudal de agua en tubería de llenado
Sensor de nivel	Flotador vertical	Reed switch, polipropileno, señal digital binaria	Detección de nivel lleno en depósito del sanitario
Microswitch	Final de carrera	Palanca larga 125 VCA/5A, Contacto SPDT	Detección de activación de la palanca de descarga
Electroválvula	Solenoides NA	1/2" NPT, 12 VDC, NA	Corte automático de suministro de agua por fugas
Pantalla LCD	16x2	HD44780	Interfaz visual de estado y mensajes de sistema
Módulo I2C - LCD	PCF8574	Expansor I2C a 8 bits, dirección 0x27	Control de pantalla LCD mediante protocolo I2C
Teclado matricial	4x4	16 teclas, matriz 4x4	Entrada de usuario para configuración y control
Modulo I2C - Teclado	PCF8574	Expansor I2C a 8 bits, Dirección personalizable	Interfaz I2C para teclado matricial
Módulo de relevadores	G3MB-202P	SSR, 3-32VDC entrada, 240 VDC/2A salida	Control de potencia para electroválvula y bomba
Bomba de agua	DC 12V	6-12 VDC caudal 200-400L/h	Recirculación de agua en banco de pruebas
LED verde	5 mm difuso	3.3V, 20mA	Estado normal del sistema
LED rojo	5 mm difuso	3.3V, 20mA	Alerta visual para las fugas
Fuente de alimentación	Switching	12VDC 2A, entrada 100-240 VAC	Alimentación principal del sistema

### 2.1.3 Fase 3: Desarrollo del Prototipo

Implementación de Hardware: Se diseñó un circuito electrónico integrado que incluye sistema de alimentación dual (12V/5V), condicionamiento de señales para sensores, y módulos de potencia para actuadores. La carcasa se fabricó mediante impresión 3D con filamento PLA, diseñada en SolidWorks para garantizar estanqueidad.

Desarrollo de Firmware: Se programó el ESP32 utilizando el framework Arduino IDE con las siguientes funcionalidades:

- Adquisición de señales de sensores mediante interrupciones
- Algoritmo de fusión sensorial para detección de fugas
- Comunicación MQTT para transmisión de datos
- Gestión de interfaz HMI (LCD y teclado)



Figura 2. Prototipo funcional para simular fugas de agua en sanitarios

### 2.1.4 Fase 4: Implementación del Sistema de Comunicación

Se implementó una infraestructura IoT basada en MQTT (Figura 3). Los datos de los sensores son publicados por el ESP32 en un broker MQTT local y luego transferidos a una instancia de base de datos relacional alojada en la nube (SOMEE) bajo tecnología SQL Server. Para la visualización, se desarrolló una aplicación en C# que consume esta información y la presenta mediante una HMI a medida.

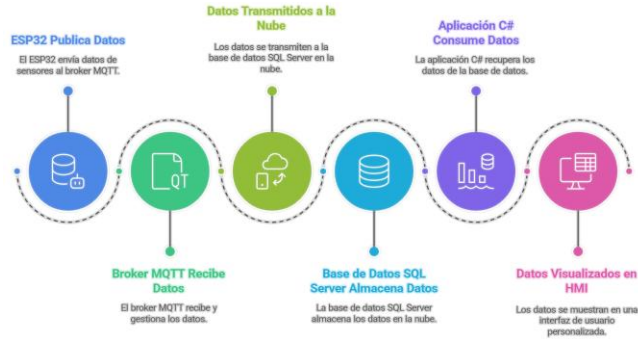


Figura 3. Arquitectura IoT con MQTT

### 2.1.5 Fase 5: Algoritmo de Detección de Fugas

El algoritmo implementa lógica de fusión sensorial que combina datos del sensor de flujo YF-S201 y sensor de nivel. Las condiciones de fuga se clasifican en tres tipos específicos:

- Fugas por exceso de volumen: Se detectan cuando el volumen total de agua medido por el sensor de flujo supera los 6 litros en un solo ciclo de llenado, umbral establecido como máximo para operación normal.
- Fugas por flujo continuo con nivel lleno: Se identifican cuando el sensor de nivel indica estado "lleno" y simultáneamente el sensor de flujo detecta paso continuo de agua, indicando una descarga constante al sanitario.
- Fugas por reactivación con nivel lleno: Se detectan cuando después de un período de reposo con nivel "lleno" y sin flujo de agua, el sistema registra ya sea nueva activación del flujo de agua o cambio inesperado en el estado del nivel, indicando pérdidas por malfuncionamiento de válvulas.

El algoritmo correlaciona permanentemente el estado del microswitch de descarga para discriminar entre operaciones normales y condiciones genuinas de fuga, activando los protocolos de alerta y control correspondientes.

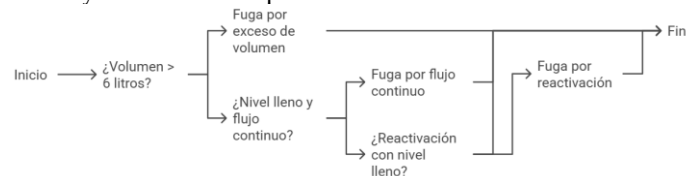


Figura 4. Algoritmo de detección de fugas de agua en sanitarios

### 2.1.6 Fase 6: Validación Experimental

Se desarrolló un banco de pruebas con sistema de recirculación de agua para validar el prototipo bajo condiciones controladas. El simulador de fugas permitió reproducir diferentes escenarios:

- Operación normal (ciclos de descarga completos)
- Fugas por exceso de volumen
- Fugas por deposito lleno



Figura 5. HMI del banco del pruebas en C#

### 2.1.7 Fase 7: Análisis de Datos

Los registros de verificación se resguardaron en un entorno de bases de datos relacionales, utilizando la tecnología Microsoft SQL, y su posterior tratamiento se llevó a cabo con una herramienta software creada en C#. Entre las métricas de valoración implementadas se encontraron:

- Detección de fugas por exceso de volumen
- Detección de fugas por exceso de volumen con nivel lleno
- Estado operativo de los sensores (flujo, nivel)
- Estado de activación de la electroválvula
- Estado del microswitch de descarga
- Estado de los indicadores visuales (LEDs)

Mediante el uso de SQL Server, se logró capturar de manera temporal estos parámetros en tablas vinculadas, facilitando así la investigación de correlaciones entre los diferentes eventos del sistema y la comprobación del algoritmo de detección que se había incorporado.

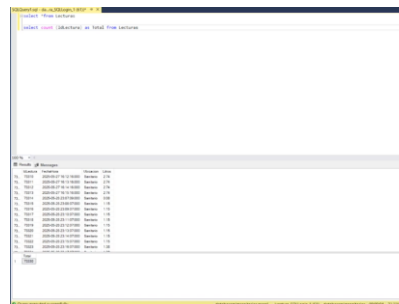


Figura 6. Base de Datos en SQL Server

### 2.2 Configuración Experimental

El sistema en su totalidad fue configurado en un entorno de pruebas que emula circunstancias reales de funcionamiento. Toda la data generada en la validación experimental, incluyendo valores de flujo, condiciones de nivel, sucesos de detección y alarmas, se conservó bajo un esquema organizado en una base de datos SQL Server alojada en la plataforma SOME.E.

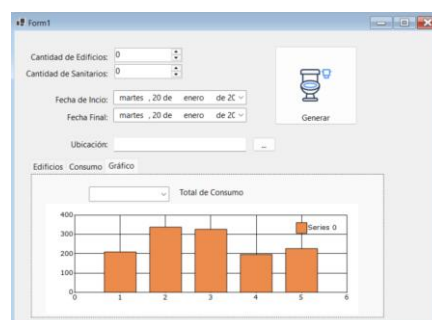


Figura 7. Evaluación de los Registros Almacenados en la Plataforma SQL Server

### 2.3 Consideraciones Éticas

Este estudio no involucró participantes humanos o animales, por lo que no se requirió aprobación de comité de ética. La investigación se centró exclusivamente en el desarrollo tecnológico y validación de sistemas mecatrónicos para eficiencia hídrica.

## 3. Resultados

### 3.1 Implementación del Sistema Embebido

#### 3.1.1 Integración Hardware-Software

El desarrollo del firmware para el ESP32 ha sido completado exitosamente, logrando la integración de todos los componentes definidos en la metodología:

- Comunicación sensorial robusta: Se implementaron las rutinas de lectura para el sensor de flujo YF-S201, sensor de nivel y microswitch, confirmando la estabilidad en la adquisición de datos.
- Algoritmo de detección funcional: El código incorpora completamente la lógica de los tres tipos de detección definidos (exceso de volumen, flujo continuo con nivel lleno, y reactivación con nivel lleno).
- Gestión de actuadores: Se verificó el control correcto de la electroválvula y los indicadores LED mediante los módulos de relevadores.

### 3.2 Validación de la Plataforma IoT

#### 3.2.1 Comunicación MQTT Operativa

La implementación del protocolo MQTT ha demostrado funcionamiento estable en pruebas de laboratorio:

Tabla 2. Estado actual de los módulos de comunicación

Componente	Estado	Funcionalidad verificada	Observaciones
Cliente MQTT ESP32	Operativo	Publicación / Suscripción	Conexión estable a Broker
Broker MQTT Local	Operativo	Gestión de mensajes	Mosquitto en Raspberry Pi
Base de Datos SQL	Operativo	Almacenamiento estructurado	Inserción automática vía triggers
Interfaz HMI C#	Operativo	Visualización en tiempo real	Conexión directa a SQL Server

#### 3.2.2 Flujo Completo de Datos

Se ha verificado el pipeline completo de datos desde la captura hasta la visualización:

- ESP32 → Broker MQTT: Publicación de estados de sensores cada 5 segundos
- MQTT → SQL Server: Inserción automática mediante servicio intermedio
- SQL Server → HMI C#: Consulta y visualización en tiempo real

### 3.3 Avances en la Infraestructura de Pruebas

#### 3.3.1 Plataforma Experimental en Fase de Construcción

El desarrollo del sistema de pruebas evidencia avances considerables:

- Estructura mecánica: Diseño CAD completado y en proceso de fabricación
- Sistema de recirculación: Componentes adquiridos (bomba, tuberías, conectores)
- Instalación eléctrica: Cableado y protecciones implementadas

#### 3.3.2 Validación de Componentes Individuales

Cada subsistema ha sido verificado de forma independiente:

- Sensores: Calibración inicial del sensor de flujo (pulsos/litro)
- Actuadores: Verificación de respuesta de la electroválvula (< 5 segundos)
- Comunicación: Test de estrés de conexión WiFi (24h sin desconexiones)

### 3.4 Métricas de Calidad de Software

### 3.4.1 Robustez del Código Implementado

El desarrollo del software ha incorporado prácticas que aseguran su confiabilidad:

- Manejo de errores: Implementación de reconexión automática WiFi y MQTT
- Escalabilidad: Arquitectura modular que permite añadir nuevos sensores

### 3.5 Próximas Etapas de Validación

Si bien el sistema central está operativo, las siguientes fases de validación experimental están programadas para completarse en el corto plazo:

- Pruebas de integración total con el banco de pruebas completado
- Caracterización de sensores bajo condiciones controladas
- Validación estadística del algoritmo de detección
- Pruebas de estrés del sistema completo

El desarrollo actual demuestra la viabilidad técnica del enfoque propuesto y establece una base sólida para la fase de validación experimental que se llevará a cabo con el banco de pruebas terminado.

## 4. Discusión

### 4.1 Interpretación de los Resultados de Desarrollo

El desarrollo del sistema embebido y la plataforma IoT confirma la viabilidad del enfoque mecatrónico propuesto para la detección de fugas en sanitarios. La integración hardware-software lograda demuestra que es posible implementar un sistema de monitoreo continuo utilizando componentes de bajo costo sin comprometer la funcionalidad. La estabilidad observada en la comunicación MQTT resulta particularmente significativa al compararse con el desempeño de sistemas IoT comerciales similares que operan en entornos residenciales.

La arquitectura implementada para el flujo de datos (ESP32 → MQTT → SQL Server → HMI (C#)) ha demostrado ser efectiva para garantizar la integridad de la información desde la captura hasta la visualización. Este enfoque coincide con las mejores prácticas reportadas [16] para sistemas de monitoreo ambiental, donde la separación de responsabilidades entre adquisición, transmisión, almacenamiento y visualización mejora la robustez del sistema.

### 4.2 Implicaciones del Algoritmo de Detección Multi-Criterio

La implementación del algoritmo de tres criterios de detección representa una evolución significativa respecto a sistemas convencionales que se basan en un único parámetro. Mientras que sistemas reportados anteriormente se enfocan principalmente en monitorear flujo continuo, nuestro enfoque multicriterio permite detectar un espectro más amplio de fallas, incluyendo aquellas que podrían pasar desapercibidas en sistemas unimodales.

La elección del umbral de 6 litros para la detección por exceso de volumen se alinea con estudios técnicos que identificaron que ciclos de llenado superiores a este volumen en sanitarios convencionales generalmente indican malfuncionamiento. Sin embargo, a diferencia de enfoques basados en observación manual, nuestro sistema automatiza esta detección mediante el sensor de flujo calibrado.

### 4.3 Ventajas del Enfoque Mecatrónico Integrado

La integración de disciplinas de electrónica, programación, sistemas de control y mecánica ha demostrado ventajas tangibles sobre enfoques parciales reportados en la literatura:

- Flexibilidad: La modularidad del sistema permite adaptar umbrales y parámetros mediante el teclado matricial y la interfaz HMI, a diferencia de sistemas comerciales con configuración fija
- Escalabilidad: La arquitectura basada en ESP32 y MQTT facilita la integración futura con plataformas de domótica existentes, superando la limitación de sistemas propietarios

- Costo-efectividad: El costo total de componentes hardware es inferior al de sistemas comerciales equivalentes, cumpliendo con el requisito de accesibilidad establecido en los objetivos del proyecto

#### 4.4 Limitaciones y Desafíos Identificados

Durante el desarrollo se identificaron desafíos técnicos que requirieron soluciones específicas:

- La interferencia electromagnética entre la electroválvula y los sensores necesitó de un diseño cuidadoso de puesta a tierra y filtrado de señales
- La variabilidad en la calidad de señal WiFi en ambientes residenciales motivó la implementación de algoritmos de reconexión robustos
- La calibración inicial del sensor de flujo reveló la necesidad de procedimientos estandarizados para asegurar consistencia entre múltiples unidades

#### 4.5 Trabajo Futuro

Con fundamento en los logros actuales y las restricciones observadas, se definen las siguientes vertientes de trabajo a futuro:

1. Validación experimental extensiva: Una vez completado el banco de pruebas, se realizarán pruebas sistemáticas para caracterizar el desempeño del sistema bajo condiciones controladas y determinar métricas de confiabilidad estadística.
2. Estudios de usabilidad: Evaluación de la experiencia del usuario final en entornos residenciales reales para refinar las interfaces HMI y los protocolos de alerta.
3. Optimización energética: Implementación de modos de sueño profundo y estrategias de despertar por eventos para extender la autonomía en operación con baterías.

### 5. Conclusiones

El presente trabajo constituye un avance en el desarrollo de un sistema mecatrónico integral para la detección automatizada de fugas en sanitarios. Se logró el desarrollo completo de un prototipo funcional que integra hardware embebido basado en ESP32, un sistema de sensores especializado, comunicación IoT mediante protocolo MQTT, almacenamiento en base de datos SQL Server y una interfaz HMI desarrollada en C#.

El sistema implementa un algoritmo de detección multicriterio capaz de identificar tres tipos principales de fugas: por exceso de volumen, por flujo continuo con nivel lleno, y por reactivación con nivel lleno. Esta aproximación representa una mejora significativa frente a sistemas unimodales al ampliar el espectro de detección y reducir falsos positivos mediante fusión sensorial.

La arquitectura propuesta destaca por su escalabilidad, modularidad y bajo costo, cumpliendo con los objetivos iniciales de accesibilidad y facilidad de implementación. Como siguiente fase del desarrollo, el prototipo pasará a un banco de pruebas en laboratorio para su validación experimental exhaustiva bajo condiciones controladas. Posteriormente, se proyecta su evaluación en entornos reales, sentando las bases técnicas necesarias para una eventual implementación a escala en contextos residenciales e institucionales.

### Referencias

- [1] Romero-Ben, L., Alves, D., Blesa, J., Cembrano, G., Puig, V., & Duviella, E. (2023). Leak detection and localization in water distribution networks: Review and perspective. *Annual Reviews in Control*, 55, 392–419. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2023.03.012>
- [2] Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2022). Estadísticas del agua en México. <https://www.gob.mx/conagua>
- [3] CONACYT, (2023). Programas nacionales estratégicos. Disponible en: <https://conacyt.mx/pronaces>
- [4] OMS (2023). Agua y saneamiento. <https://www.who.int/es/health-topics/water-sanitation-and-health>

- [5] Li, B., Zheng, Y., Di Baldassarre, G., Xu, P., Pande, S., & Sivapalan, M. (2023). Groundwater Vulnerability in a Megacity Under Climate and Economic Changes: A Coupled Sociohydrological Analysis. *Water Resources Research*, 59(12), Article e2022WR033943. <https://doi.org/10.1029/2022WR033943>
- [6] SEMARNAT y CONAGUA. (2015). Cuidemos el agua que mueve a México. Disponible en: [https://www.conagua.gob.mx/conagua07/contenido/documentos/carrera\\_agua\\_2015.pdf](https://www.conagua.gob.mx/conagua07/contenido/documentos/carrera_agua_2015.pdf)
- [7] Saquib, S., Gupta, A., & Joshi, A. (2022). Emerging water crisis: Impact of urbanization on water resources and constructed wetlands as a nature-based solution (NbS). *Current Directions in Water Scarcity Research*, 447–468. DOI: 10.1016/b978-0-323-91838-1.00021-x
- [8] Santos, T., (2024). Más de 10 mil fugas de agua potable corresponden a tomas domésticas, afirma Caasim. Grupo Milenio. <https://www.milenio.com/politica/comunidad/mas-de-10-mil-fugas-de-agua-en-pachuca-corresponden-a-tomas-domesticas>
- [9] Islas, E. G. F., (2024). Fallas y fugas en el suministro de agua potable: de las principales problemáticas de los pachuqueños. *El Universal Hidalgo*. <https://www.eluniversalhidalgo.com.mx/metropoli/fallas-y-fugas-en-el-suministro-de-agua-potable-de-las-principales-problematicas-de-los-pachuquenos/>
- [10] Torres, B. (2022). 40 por ciento del agua de la CDMX se pierde en fugas - UNAM Global. UNAM Global - De La Comunidad Para La Comunidad. [https://unamglobal.unam.mx/global\\_revista/40-por-ciento-del-agua-de-la-cdmx-se-pierde-en-fugas/](https://unamglobal.unam.mx/global_revista/40-por-ciento-del-agua-de-la-cdmx-se-pierde-en-fugas/)
- [11] Palermo, S. A., Maiolo, M., Brusco, A. C., Turco, M., Pirouz, B., Greco, E., Spezzano, G., & Piro, P. (2022). Smart Technologies for Water Resource Management: An Overview. *Sensors*, 22(16), 6225. <https://doi.org/10.3390/s22166225>
- [12] Mohd-Yussof, N. A., & Ho, H. W. (2022). Review of Water Leak Detection Methods in Smart Building Applications. *Buildings*, 12(10), 1535. <https://doi.org/10.3390/buildings12101535>
- [13] Muhammetoglu, A., Albayrak, Y., Bolbol, M., Enderoglu, S., & Muhammetoglu, H. (2020). Detection and Assessment of Post Meter Leakages in Public Places Using Smart Water Metering. *Water Resources Management*, 34, 2989-3002. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02598-1>.
- [14] Knapik, M. (2022). Analysis of the cost of leaks from the water supply system, including methods to reduce water consumption. *Zeszyty Naukowe SGSP*, 84, 73–92. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0016.1802>
- [15] Render, B., Stair, R.M. Hanna, M.E., Hale, T.S. (2016). *Métodos cuantitativos para los negocios*. México: Pearson.
- [16] Chan, T. K., Chin, C. S., & Zhong, X. (2018). Review of Current Technologies and Proposed Intelligent Methodologies for Water Distributed Network Leakage Detection. *IEEE Access*, 6, 78846–78867. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2885444>