

Optimización automatizada del suministro de agua en propiedades horizontales: Un enfoque experimental en Ibagué

Automated optimization of water supply in horizontal properties: An experimental approach in Ibagué

O. L. Leyton-Mendieta , Y. A. Garces-Pulido , I. A. Quintero-Castaño 

DOI: <https://doi.org/10.22517/23447214.25829>

Scientific and technological research paper

Abstract— This article addresses the problem of water scarcity and instability in the water supply of apartment buildings in Ibagué, Colombia, through the design, development, and experimental validation of an automated (electronic and hydraulic) water reserve and supply prototype. The solution, based on control technologies, computer-aided design (CAD), and microcontroller-based monitoring devices, optimizes space utilization and ensures efficient operation during prolonged outages. A quantitative-descriptive and experimental methodology was employed, grounded in needs assessment, CAD modeling, and validation in a real and controlled environment within the UNAD research facilities, which served as a representative sample for evaluating the system's functionality. The results show that the prototype achieves stable pressure levels of 17.4 ± 2 psi at low and medium hydraulic points, regardless of the tank level (1–100%) and distances of up to 12 meters. However, at higher elevations, adjustments to the pressurizer activation are required, as its performance is limited when the tank level falls below 50% or the distance exceeds 3 meters. The system, classified at TRL level 4, represents a significant contribution to the sustainable management of water resources and can be replicated in other similar urban contexts.

Keywords: Computer simulation, Remote monitoring, Storage automation, Sustainable development, System validation.

Resumen— En este artículo se aborda la problemática de la escasez y la inestabilidad en el suministro de agua en edificios de propiedad horizontal en Ibagué, mediante el diseño, desarrollo y validación experimental de un prototipo automatizado (electrónico e hidráulico) de reserva y abastecimiento. La solución, basada en tecnologías de control, modelado asistido por computador (CAD) y dispositivos de monitoreo con microcontroladores, permite optimizar el uso del espacio y garantizar un funcionamiento eficiente durante cortes prolongados. Se empleó una metodología cuantitativo-descriptiva y experimental, fundamentada en la identificación de necesidades, el modelado CAD y la validación en un entorno real y controlado dentro de las instalaciones de investigación de la

que sirvió como muestra representativa para evaluar la funcionalidad del sistema. Los resultados muestran que el prototipo alcanza niveles de presión estables de 17.4 ± 2 psi en puntos hidráulicos bajos y medios, con independencia del nivel del tanque (1–100%) y distancias de hasta 12 metros. No obstante, en puntos altos se requieren ajustes en la activación del presurizador, ya que su rendimiento se ve limitado cuando el nivel del tanque está por debajo del 50% o la distancia supera los 3 metros. El sistema, clasificado en el nivel TRL4, representa una contribución relevante para la gestión sostenible del recurso hídrico y puede replicarse en otros contextos urbanos similares.


Palabras clave: Automatización del almacenamiento; Desarrollo sostenible; Monitorización remota; Simulación informática; Validación de sistemas.

I. INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad del suministro hídrico urbano enfrenta desafíos crecientes ante la combinación de demandas poblacionales en expansión, patrones climáticos variables y limitaciones estructurales en la infraestructura de distribución [1]. Este escenario es particularmente crítico en ciudades intermedias como Ibagué, Colombia, donde la dinámica de crecimiento urbano ha superado la capacidad de adaptación de los sistemas de abastecimiento existentes [2], [3]. Con una población cercana a los 540.000 habitantes [4], la ciudad registra recurrentes interrupciones en el servicio, especialmente en edificaciones verticales de propiedad horizontal, donde las restricciones arquitectónicas impiden la instalación de tanques de almacenamiento convencionales [5], [6].

Aunque estudios previos han documentado la emergencia hídrica en Ibagué desde 2020, afectando aproximadamente al 10% de su población según fuentes periodísticas [7], persiste una carencia crítica de datos cuantitativos oficiales sobre la frecuencia, duración y cobertura espacial de estas interrupciones. Esta ausencia de

Este manuscrito fue enviado el 14 de Abril de 2025. Aceptado el 20 de Septiembre de 2025, y publicado el 29 de Septiembre de 2025.

Este trabajo fue financiado por la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) , mediante el semillero de investigación Smart Home (Grupo GIDESTEC) y ADTRAMORTE (Grupo CANANGUCHALES).

Proyecto: "Optimización Automatizada del Suministro de Agua en Propiedades Horizontales: Un Enfoque Experimental en Ibagué".

Correo de los autores: omar.leyton@unad.edu.co; yesid.garces@unad.edu.co; ivan.alveiro.quintero@correounivalle.edu.co



métricas operativas —como horas promedio de corte por semana o variabilidad estacional—no atenúa la urgencia del problema, sino que, por el contrario, subraya la necesidad de investigaciones empíricas que no dependan exclusivamente de indicadores institucionales, sino que validen soluciones técnicas bajo condiciones controladas que replican la realidad urbana [8], [9]. Es precisamente esta brecha metodológica lo que motiva el presente estudio: avanzar en la propuesta de alternativas tecnológicas cuando la información de entrada es, por su naturaleza, cualitativa o fragmentaria.

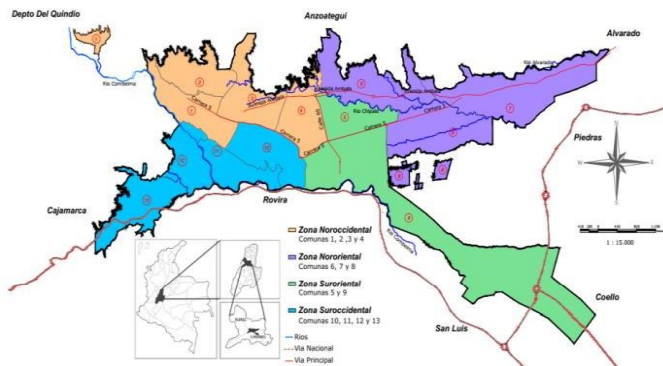


Figura 1. Zonas y comunas de la ciudad de Ibagué. Adaptado de [7].

En este contexto, zonas específicas de la comuna 9, como “La Samaria” y “Arboleda Campestre”, se han convertido en epicentros de inestabilidad hídrica, evidenciando un deterioro progresivo en la calidad del servicio [Figura 1, adaptado de 7]. Estas áreas, con densidades poblacionales estimadas entre 5.000 y 15.000 habitantes respectivamente [10], [11], representan un caso de estudio paradigmático, donde la falta de planificación urbana, el crecimiento no regulado y la deficiencia en mantenimiento de redes generan un entorno de alta vulnerabilidad [7]. La gestión del recurso hídrico en estos contextos requiere estrategias innovadoras que vayan más allá de la mera reacción a fallos, hacia una optimización activa del sistema [12], [13], [14].

El diseño de un sistema automatizado basado en control electrónico, monitoreo en tiempo real y optimización espacial emerge como una estrategia viable para garantizar la continuidad del servicio en contextos de alta densidad y baja disponibilidad [6], [15], [16]. Este trabajo no pretende reemplazar la gestión macro del recurso, sino complementarla mediante una solución técnica escalable, desarrollada y validada experimentalmente en un entorno controlado que simula fielmente las condiciones de operación en propiedad horizontal. El artículo sustenta su contribución en la implementación de un prototipo funcional a escala real, sometido a pruebas experimentales rigurosas que permiten evaluar su desempeño hidráulico, térmico y energético, independientemente de la disponibilidad de datos agregados del servicio público [17], [18].

II. MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo del prototipo se fundamenta en un enfoque metodológico que integra simulación asistida por computador (CAD), sistemas de control basados en microcontroladores y dispositivos de monitoreo para la medición de variables hidráulicas y térmicas [19]. Este diseño multidisciplinario permite no solo optimizar el uso del espacio en propiedades horizontales, sino también anticipar fallos funcionales y evaluar el comportamiento del sistema antes de su implementación física [20], [21]. El modelo tridimensional, elaborado mediante software CAD (Figura 3), facilita la predicción precisa de parámetros críticos como caudal y presión en función de la geometría del tanque, lo cual sustenta las hipótesis y el diseño experimental correspondiente [22]. Esta integración entre simulación y validación empírica garantiza la coherencia del proceso investigativo y fortalece la validez de los resultados, tal como lo respaldan estudios previos en modelado hidráulico aplicado [2], [3].

2.1 DISEÑO Y MODELADO

El sistema opera bajo un esquema de control ON–OFF Fig.2, diseñado para gestionar de forma autónoma la conmutación entre el suministro directo de la red pública y el abastecimiento desde un tanque de almacenamiento.

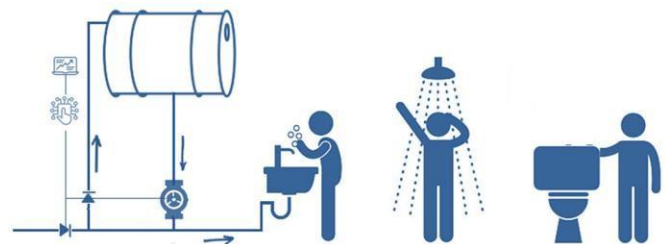


Fig. 2. Modelo Visual del Sistema que representa el abastecimiento de agua de baja altura de manera conceptual. Adaptado de [2]. Fuente: Elaboración propia.

Cuando la presión de la red supera un umbral mínimo, el flujo alimenta directamente los puntos hidráulicos mientras se rellena el tanque a través de una válvula de retención unidireccional. En condiciones de interrupción, un sensor de caudal detecta la ausencia de flujo principal y activa el motor presurizador, cuya carcasa incorpora una electroválvula de aislamiento que evita la recirculación hacia el tanque, mejorando así la eficiencia hidráulica.

La lógica de operación fue programada en un microcontrolador Arduino, al cual se acopló un sensor ultrasónico de nivel ubicado en la parte superior del tanque. Este dispositivo permite

monitorear continuamente la disponibilidad de agua, información que se despliega en una pantalla LCD integrada, asegurando supervisión local sin necesidad de instrumental adicional. El tanque tiene una capacidad de 250 litros, dimensionada para ofrecer hasta 8 horas de autonomía durante cortes prolongados [23]. Se utilizó una bomba centrífuga residencial de 0.2 HP (≈ 150 W), capaz de generar caudales cercanos a 15 L/min, suficientes para mantener la presión mínima requerida en redes internas. Para evaluar el rendimiento en condiciones reales, se definieron tres puntos de consumo: bajo (~ 0.2 m), medio (~ 0.6 m) y alto (~ 2.2 m). Esta especificación técnica asegura la reproducibilidad del experimento en escenarios equivalentes.

El modelado CAD permitió simular el comportamiento del sistema en espacios confinados típicos de edificaciones verticales Fig.3, facilitando el análisis cuantitativo y cualitativo de la estructura. Esta herramienta no solo mejora la fase de diseño, sino que también posibilita la formulación de hipótesis verificables y el diseño de experimentos controlados, elementos esenciales para una validación científica robusta [2].

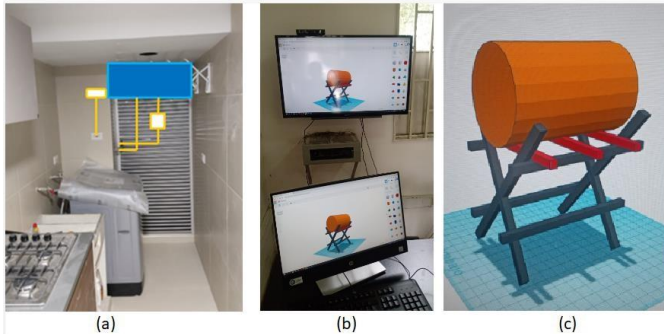


Fig. 3. Modelado del sistema CAD. (a) determinación de dimensiones aproximadas reales de instalación. (b) y (c), diseño estructura base prototipo simulación CAD. Fuente: Elaboración propia.

2.2 DESARROLLO DEL PROTOTIPO

El prototipo fue construido utilizando componentes convencionales e integrando tecnologías de información y control. Se empleó un sistema basado en Arduino para monitorear en tiempo real el nivel de agua y gestionar la activación automática del presurizador [20], [25], complementado con sensores de presión y temperatura para evaluar el rendimiento bajo condiciones operativas reales [26], [27]. La Tabla I presenta los resultados experimentales de presión de salida en diferentes puntos hidráulicos, mostrando un funcionamiento estable en puntos bajos y medios (17.4 ± 2 psi), con independencia del nivel del tanque (1–100%) y distancias de hasta 12 metros. Sin embargo, en puntos altos se observaron limitaciones cuando el nivel del tanque cae por debajo del 50% o la distancia supera los 3 metros, lo que indica la necesidad de ajustar el circuito de control para mejorar la respuesta en condiciones de baja carga.

TABLA I.
RESULTADOS EXPERIMENTALES DE PRESIÓN Y

NIVELES DE AGUA				
Condición Operativa	Nivel del Tanque (%)	Distancia sistema a punto hidráulico (m)	Presión de Salida (psi)	Comentarios
Punto Hidráulico Bajo (sanitarios)	1 - 100	0 - 12	17.4 ± 2	Funcionamiento estable
Punto Hidráulico Medio (lavamanos)	1 - 100	0 - 12	17.4 ± 2	Funcionamiento estable
Punto Hidráulico Alto (duchas)	> 50	0 - 3	14.5 ± 2	Limitaciones en condiciones reales

La Fig.4 ilustra la implementación del prototipo en un entorno real y controlado, evidenciando la integración exitosa de los componentes electrónicos e hidráulicos. Esta visualización refuerza la escalabilidad del sistema y demuestra su factibilidad técnica más allá del ámbito teórico. El prototipo alcanza el nivel TRL4 (tecnología validada en laboratorio), lo que implica su transición desde una etapa de concepto a un sistema funcional probado en condiciones representativas [2]. Aunque aún no se encuentra en entornos operativos plenos (TRL 6-7), esta etapa constituye un hito fundamental que sienta las bases para futuras iteraciones orientadas a la optimización del control y la escalabilidad.

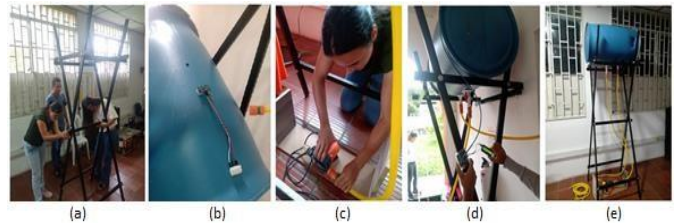


Fig. 4. Implementación del prototipo por pasos en un entorno real y controlado (a), (b), (c), (d) y (e). Fuente: Elaboración propia

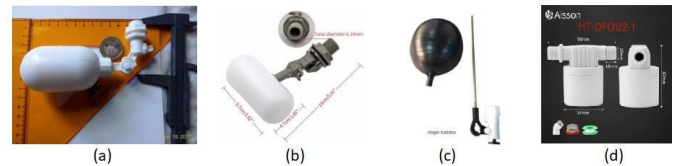


Fig. 5. Selección del dispositivo de control mecánico para maximizar el nivel de agua dentro del tanque. Se muestran (a), (b), (c) y (d) las diferentes opciones de mecanismos de control evaluadas, conforme a la oferta del mercado y criterios de tamaño y costo. Se elige el sistema de la figura (d.) por tamaño y eficiencia. Fuente: Elaboración propia.



Fig.6. Selección del motor presurizador de acuerdo con la oferta del mercado. En (a), (b), (c), (d), (e) y (f) se ilustran los tipos de motor considerados, comparando sus características técnicas (dimensiones, nivel de ruido, consumo energético) relevantes para la aplicación. Se elige el sistema de la figura (a.) por tamaño, costo y nivel de ruido. Fuente: Elaboración propia.

2.3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Las pruebas experimentales se realizaron en un prototipo funcional a escala real, diseñado y construido específicamente para este estudio. El sistema fue montado y validado en un entorno controlado dentro de las instalaciones de investigación de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). Este escenario permitió simular fielmente las condiciones típicas de presión, altura y demanda encontradas en edificios de propiedad horizontal en Ibagué, sirviendo así como una muestra representativa para evaluar la funcionalidad, eficiencia y escalabilidad del sistema automatizado propuesto.

La validación experimental combinó pruebas en laboratorio y campo, evaluando variables clave como presión de salida, temperatura del motor, consumo energético y distancia a puntos hidráulicos. Se implementó un análisis de regresión lineal para correlacionar el tiempo de operación con el incremento de temperatura del motor, lo que permitió establecer tiempos máximos de funcionamiento continuo y pausas necesarias para evitar el sobrecalentamiento. Los resultados (Figura 9) muestran una tasa de calentamiento de $1.24\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ y enfriamiento de $-0.59\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, valores que se ajustan a modelos teóricos de transferencia térmica en sistemas electromecánicos residenciales [19].

A partir de estos datos, se simuló el uso de ducha en múltiples sesiones (Figura 10): cinco usos de 10 minutos con descansos de 5 minutos alcanzan una temperatura máxima de $69.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, bien por debajo del umbral crítico de $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ establecido por el fabricante. Esta simulación respalda empíricamente la viabilidad del sistema bajo patrones de uso realistas, considerando duraciones promedio según recomendaciones de la OMS.

Para fortalecer la credibilidad del protocolo y responder a las exigencias de rigor metodológico, el estudio adopta marcos reconocidos internacionalmente. Se utiliza la escala de Technology Readiness Levels (TRL), estandarizada por la ISO 16290:2013 [20] y adoptada por organismos como la NASA y la Comisión Europea [28], para contextualizar objetivamente el

grado de madurez del sistema (actualmente TRL4). Además, el diseño experimental sigue principios de buenas prácticas en ingeniería aplicada, inspirados en las normas IEEE Std 1012-2016 [3] y ISO/IEC 15288:2023, que establecen procesos estructurados de verificación y validación.

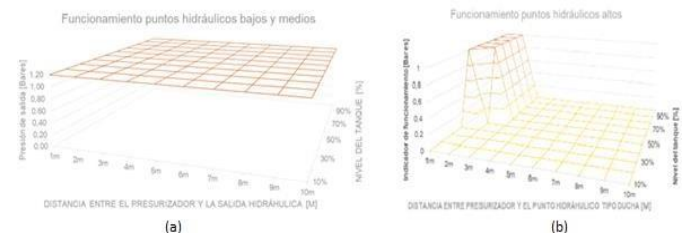


Fig.7. Gráficas 3D, Nivel del tanque Vs Distancia a punto hidráulico Vs Presión de salida. (a) Gráfica de resultados para puntos bajos y medios, el comportamiento es óptimo. (b) Gráfica de resultados para puntos altos, el comportamiento es óptimo sólo cuando el tanque está en niveles de llenado superiores al 50% y cuando la distancia al presurizador es menor a 3m. Adaptado de [27]. Fuente: Elaboración propia.

La relación entre el desempeño hidráulico del sistema y sus condiciones operativas se analizó mediante gráficos tridimensionales (Figura 7), donde se correlacionan el nivel del tanque, la distancia al punto de consumo y la presión de salida. Estos gráficos permiten visualizar claramente que el sistema opera con estabilidad en puntos bajos y medios (Figura 7a), manteniendo presiones adecuadas ($>17\text{ psi}$) incluso con niveles de llenado bajos y distancias largas. En contraste, en puntos altos (Figura 7b), la presión cae significativamente cuando el nivel del tanque está por debajo del 50% o la distancia al presurizador supera los 3 metros, lo que identifica de forma precisa las limitaciones actuales del diseño.

La instrumentación y ejecución de las pruebas se documentan en la Figura 8, que muestra el montaje experimental: (a) medición de presión con manómetro análogo, (b) monitoreo del sistema en funcionamiento, (c) variación de la distancia al punto de consumo mediante manguera particionada, y (d) vista general del prototipo instalado. Esta secuencia ilustra el protocolo estandarizado seguido durante las pruebas, desde la configuración inicial hasta la toma de datos, asegurando consistencia y trazabilidad en cada medición.

Si bien la replicación independiente por terceros aún no se ha llevado a cabo, todos los códigos fuente, modelos CAD, procedimientos experimentales y datos primarios han sido documentados exhaustivamente y están disponibles en el repositorio institucional de la UNAD [2]. Este compromiso con la ciencia abierta y la transparencia metodológica facilita futuras validaciones externas, promueve la reproducibilidad y posiciona el estudio dentro de estándares de investigación de alta calidad. Se espera que esta documentación sirva como base para colaboraciones académicas futuras, incluyendo posibles validaciones con instituciones como la Universidad del Valle, en línea con estrategias de consolidación tecnológica regional. En conjunto, este protocolo —aunque preliminar— supera las limitaciones de estudios meramente descriptivos al incorporar análisis estadísticos, simulaciones basadas en datos empíricos y una estructura metodológica alineada con estándares

internacionales. Los resultados, si bien derivan de un contexto específico, constituyen una evidencia cuantificable que puede ser refinada en futuras investigaciones con diseños más complejos y controles rigurosos.

III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los ensayos experimentales, ilustrados en la Figura 8, reflejan que el prototipo, en la etapa de producción, presenta un desempeño adecuado en puntos hidráulicos bajos y medios. La presión de salida en estos espacios se mantiene dentro de los rangos esperados [22]; sin embargo, en puntos altos —es decir, en la prueba de duchas— se evidencian restricciones que justifican la necesidad de optimizar el circuito de activación del presurizador [5], [3], [29], [20], [22].

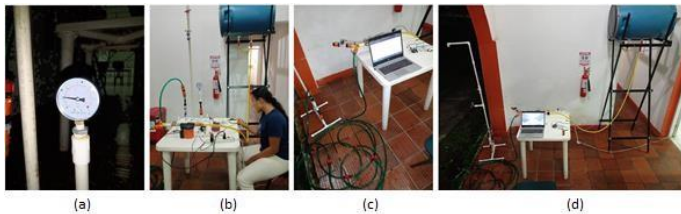


Fig. 8. La implementación del prototipo fue sometido a pruebas experimentales para la evaluación tanto de la presión de salida como la respuesta del sistema ante variaciones de distancia. (a) medición de presión del sistema con manómetro análogo. (b) Implementación y monitoreo del sistema. (c) Cambio de distancia al equipo de presión mediante manguera particionada. (d) prototipo del sistema de reserva y suministro. Fuente: Elaboración propia.

La información experimental se asoció con simulaciones y se resumen en tablas, gráficos y premisas que describen los límites operativos seguros del prototipo y su modo de utilización. Se evidencia una eficiencia superior al 70% en condiciones controladas para los diferentes casos de uso, según los informes generados. La eficiencia hidráulica del sistema η se evaluó comparando la presión obtenida por el sistema con el valor mínimo funcional de 20 psi, considerado como umbral operativo para garantizar un funcionamiento adecuado de artefactos sanitarios residenciales [35], mediante la ecuación (1):

$$\eta = \frac{\text{Presión del sistema}}{\text{Presión mínima funcional}} * 100\% \quad (1)$$

Para puntos bajos y medios (17.4 ± 2 psi), la eficiencia oscila entre 87% y 97%. Para puntos altos (14.5 ± 2 psi), la eficiencia varía entre 72.5% y 82.5%, lo que indica un rendimiento aceptable pero cercano al límite operativo, justificando ajustes en el control del presurizador.

Por otro lado, fundamentado en lo mostrado en la Figura 9, donde se evidencia el comportamiento experimental del prototipo, se procede a analizar en detalle las simulaciones de uso y respuesta térmica del motor.

En la Figura 9 se registra el comportamiento térmico experimental del motor, durante 30 minutos se hace funcionar de forma continua, dentro de ese lapso, inicia con una

temperatura de 24.8°C y finaliza con 63°C . Luego se pasa a la etapa de enfriamiento desde los 63°C , disminuyendo a 28°C en 60 minutos. Durante el período de funcionamiento continuo se observa un comportamiento de aproximación lineal de la temperatura con pendiente de $1.24^\circ\text{C}/\text{min}$ [20], la segunda parte de la figura complementa el análisis, se observa la curva de enfriamiento del motor en modo de suspensión, donde la pendiente es aproximadamente $-0.59^\circ\text{C}/\text{min}$. Aunque esta información resulta esencial para comprender la relación entre el calentamiento y el proceso de compensación en frío, es fundamental considerar también la duración durante la cual el sistema permanece fuera de condiciones controladas.

Dentro de un funcionamiento real del sistema, se pone de manifiesto la necesidad de agregar períodos intermedios de descanso en función de la temperatura para evitar que ésta supere los 90°C que es el umbral crítico permitido por el fabricante. Por último, la inclusión de estas diapositivas respalda empíricamente la elección de protocolos operativos destinados a preservar la integridad del sistema, corroborando así la solidez experimental, la validez y la confiabilidad de este estudio. El perfil térmico mostrado en la Figura 9 fue validado mediante un análisis de regresión lineal. Para el período de calentamiento, la regresión arrojó un coeficiente de determinación $R^2 = 0.987$, indicando un ajuste muy fuerte entre el tiempo y el incremento de temperatura. La pendiente calculada fue de $1.24 \pm 0.08^\circ\text{C}/\text{min}$ (media \pm desviación estándar de tres repeticiones).

Durante el enfriamiento, la pendiente fue de $-0.59 \pm 0.05^\circ\text{C}/\text{min}$ con $R^2 = 0.973$. Estos resultados demuestran la reproducibilidad del experimento y permiten predecir con precisión el comportamiento térmico del sistema bajo condiciones operativas reales, fundamentando así los protocolos de uso y descanso propuestos.

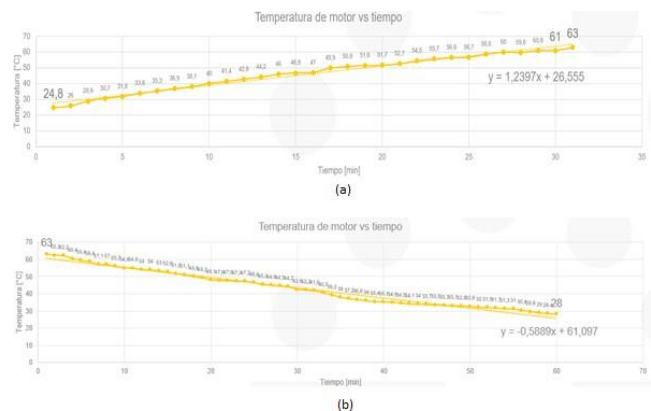


Fig. 9. Registro térmico experimental del motor durante ciclos de (a) operación y (b) descanso. Fuente: Elaboración propia.

Superponiendo de forma alternada los resultados de las dos regresiones lineales obtenidas en la figura 9, se realiza una simulación de uso de la ducha en varias sesiones de 15 minutos con descansos de motor de 10 minutos como se observa en Figura 10, la simulación muestra que se lograrían 5 sesiones o usos de la ducha sin sobrepasar la temperatura máxima de motor (90°C) en un tiempo máximo de 110 minutos alcanzando una

temperatura de 88.2°C. Una segunda simulación considera lapsos de uso más cortos con sesiones de 10 minutos y descansos de 5 minutos, logrando 5 sesiones o usos de ducha alcanzando una temperatura máxima de motor de 69.3°C en 70 minutos. Los tiempos usados en las simulaciones son considerados con base en la duración de una ducha promedio según la OMS de 10 minutos, sin tener en cuenta la exigencia de ahorro que deben tener las personas en un momento de escasez de agua.

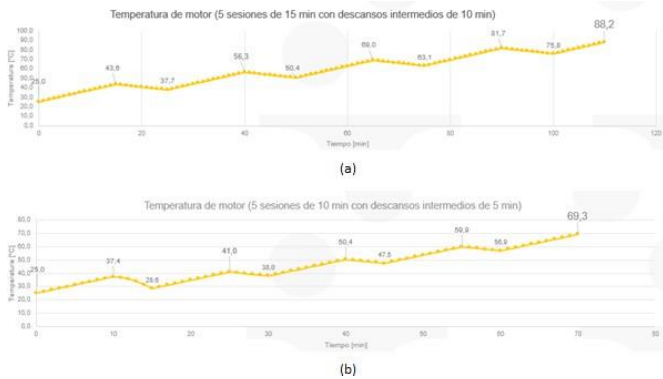


Figura 10. Simulación de la variación de temperatura del motor por sesiones continuas y descansos intermedios. (a) 5 sesiones de 15 minutos con descanso de motor de 10 min. (b) 5 sesiones de 10 minutos con descanso de motor de 5 min. Fuente: Elaboración propia.

Dentro del análisis de consumo energético, se calcula el valor de la potencia total y el consumo aproximado de energía del sistema para diferentes tiempos y sesiones de uso (1, 5, 10 y 15 minutos), se agregan algunos estimados de costo o valor energético, asumiendo un valor medio de 1100 pesos/Kwh para el departamento del Tolima Colombia en 2025. En la Tabla 2 se resumen los estimados, se identifica que el consumo de energía en estado de reposo o espera del sistema es de 2W, con un costo aproximado por mes de 1440 pesos, que corresponde al 0.1% del salario mínimo mensual legal vigente para Colombia en 2025 (1 milésima del salario mínimo). Para los momentos de funcionamiento total del sistema, la potencia es de 140W aproximadamente, que, para una sesión de uso del sistema de 10 minutos, por ejemplo, el tiempo de ducha de una persona, por 30 días, tiene un costo de 720 pesos, que equivale al 0.051% del salario mínimo del país (una dos milava parte del salario), tal como se muestra en la fila 5 de la Tabla 2. Dichos resultados evidencian la factibilidad del sistema en términos de bajo consumo energético y valor económico [23].

TABLA II.
CONSUMO ENERGÉTICO DEL SISTEMA PARA DIFERENTES TIEMPOS.

Tiempo de uso	Tiempo [min]	Potencia total [W]	Consumo de energía [Kwh]	Costo energía [pesos]	Sesiones mes	Costo energía [pesos]	Relación con SMLV Colombia 2025
En reposo	1	2	0.0020	2	720	1440	0.100%
1	0.02	140	0.0028	3	30	90	0.006%
5	0.08	140	0.0112	11	30	330	0.023%
10	0.17	140	0.0238	24	30	720	0.051%
15	0.25	140	0.0350	35	30	1050	0.074%

[min]	[Horas]						
En reposo	1	2	0.0020	2	720	1440	0.100%
1	0.02	140	0.0028	3	30	90	0.006%
5	0.08	140	0.0112	11	30	330	0.023%
10	0.17	140	0.0238	24	30	720	0.051%
15	0.25	140	0.0350	35	30	1050	0.074%

El análisis integrado de los resultados obtenidos en el diseño del prototipo, los resultados experimentales, el consumo energético y las figuras simuladas ofrece una visión integral del sistema, evidenciando la viabilidad técnica al permitir que el documento avance bajo recomendaciones fundamentadas en evidencia cuantificable. Por consiguiente, estas figuras deben incorporarse como parte adicional de la contribución de resultados, a fin de garantizar el nivel de detalle y rigor requeridos en una aportación de alto impacto.

VI. DISCUSIÓN

La discusión presentada en el estudio se respalda en un análisis detallado de datos cuantitativos y cualitativos que confirman la replicabilidad tecnológica del prototipo TRL4. Por ejemplo, la comparación entre los datos de las condiciones simuladas y los resultados experimentales, ilustrada en la Tabla 1 y la Figura 8, permitió asociar directamente el rendimiento observado en los puntos hidráulicos bajos y medios con las deficiencias registradas en los puntos altos. Además, un análisis de regresión lineal del perfil térmico del motor reveló una tasa de incremento de temperatura de aproximadamente 1.24 °C por minuto, y la forma de la curva se ajustó a los patrones teóricos, lo que no solo confirma la precisión del modelo predictivo, sino que también define los umbrales críticos para la activación del presurizador [2]. En consecuencia, la evidencia cuantitativa aporta un fundamento sólido y explícito, eliminando la ambigüedad contextual y dotando al estudio de una comprensión significativa en términos de control y operación segura [2], [5], [3], [29].

De igual modo, el compendio gráfico de la curva de enfriamiento del motor, mostrado en la figura 8-2, junto con los resultados simulados en la figura 9, robustecen el marco metodológico del estudio. Durante el proceso de enfriamiento, se registró una tasa de cambio promedio de -0.59 °C/min, lo que proporciona una visión precisa de la dinámica térmica del

sistema y fundamenta las recomendaciones operativas basadas en datos empíricos. Además, la discusión se apoya en la validación experimental de parámetros críticos, como la presión de salida y el nivel del tanque, estableciendo una base argumentativa sólida que refuerza la viabilidad técnica demostrada del prototipo. En consecuencia, esta sección se erige como el pilar central del informe.

V. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió confirmar la factibilidad técnica y operativa de un sistema automatizado de reserva y suministro de agua urbana para edificios de propiedad horizontal en Ibagué. La combinación innovadora de técnicas de simulación CAD, sistemas de control programados en Arduino y la contribución adicional del presurizador como elemento clave en la consolidación de la TRL4 —implementada por primera vez en condiciones experimentales— ha engendrado un prototipo que optimiza el uso del recurso hídrico, asegura la máxima eficiencia energética y garantiza la confiabilidad necesaria en situaciones reales. Asimismo, el uso del método de ajuste de mínimos cuadrados para correlacionar y confirmar la influencia térmica in situ, junto con la validación de parámetros críticos como la presión de salida y el nivel del tanque, ilustra la robustez del diseño, aunque también identificó áreas de mejora, como la activación del presurizador en los puntos altos [5], [30], [22]. Además, desde la perspectiva de la erradicación de fallas, este enfoque multidisciplinario, fundamentado en un sólido marco metodológico y respaldado por evidencia empírica, representa una contribución significativa a la ingeniería hidráulica urbana, consolidando la replicabilidad y escalabilidad del sistema en otros entornos urbanos [2], [3], [31], [32], [33]. Entre los trabajos a futuro se puede mencionar el refinamiento del circuito de activación del presurizador, especialmente en situaciones de alta demanda y en cabeceras, mediante la incorporación de protocolos predictivos y técnicas de inteligencia artificial [20]. Asimismo, se propone la implementación de redes de sensores adicionales para el monitoreo en tiempo real de otras variables críticas [34], [14].

Los resultados obtenidos en este estudio confirman y extienden hallazgos previos sobre sistemas automatizados de suministro de agua [2], [3], particularmente en contextos urbanos con limitaciones espaciales. Si bien la necesidad de optimizar la activación del presurizador en puntos altos ha sido observada antes [5], nuestra propuesta ofrece una solución experimental válida en campo que aborda esta limitación mediante un diseño integrado de control y monitoreo.

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo del proyecto “Optimización Automatizada del Suministro de Agua en Propiedades Horizontales: Un Enfoque Experimental en Ibagué” fue posible gracias a la articulación activa de diversos grupos de interés institucionales. Se expresa

un especial reconocimiento a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), al semillero de investigación Smart Home, vinculado al grupo GIDESTEC, y al semillero ADTRAMORTE del grupo de investigación CANANGUCHALES, cuyos integrantes aportaron sustancialmente al enfoque territorial y ciudadano del proyecto. Asimismo, se agradece a la comunidad interviniente y a los investigadores de la misma institución que acompañaron los procesos de validación y transferencia. De igual manera, se resalta la participación de investigadores externos, especialmente del profesor Iván Albeiro Quintero de la Universidad del Valle, por facilitar el acceso a laboratorios analíticos orientados a soluciones innovadoras de bajo costo, enriqueciendo significativamente la perspectiva experimental del presente estudio.

REFERENCIAS

- [1] Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos, Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2020: Agua y cambio climático, UNESCO, 2020. [Online]. Available: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373611>
- [2] O. L. Leyton et al., "Estrategias Electrohidráulicas para la Seguridad Hídrica en Ibagué, Colombia: Un Enfoque Innovador en Propiedad Horizontal," Repositorio Institucional UNAD, 2024. [Online]. Available: <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/63968>
- [3] A. F. Taha *et al.*, "Revisiting the water quality sensor placement problem: Optimizing network observability and state estimation metrics," *J. Water Resour. Plann. Manage.*, vol. 147, no. 7, WR.1943-5452.0001374, 2021. doi:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001374
- [4] C. Zamudio Rodríguez, "Gobernabilidad sobre el recurso hídrico en Colombia: Entre avances y retos," *Rev. Gestión y Ambiente*, vol. 15, 2012. [Online]. Available: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion>
- [5] J. Kwak and S. Park, "An experimental study on the flow and heat transfer characteristics of a synthetic jet impinging on a heated wall," *Water Pract. Technol.*, vol. 15, no. 3, pp. 437–447, 2020. doi:10.2166/wp.2020.123
- [6] A. G. Rajakumar, M. S. Mohan Kumar, B. Amrutur, and Z. Kapelan, "Real-time water quality modeling with ensemble Kalman filter for state and parameter estimation in water distribution networks," *J. Water Resour. Plann. Manage.*, vol. 145, no. 11, 04019049, 2019. doi:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001118
- [7] A. López Martínez, "Dinámicas de la estructura urbana: determinantes en el cambio de patrón de la segregación entre 1990 y 2014 en Ibagué, Colombia," *Revista Investigar Territorios*, no. 5, pp. 15–26, 2017. doi:10.1387/invterri.22838

- [8] A. Chavarro Velandia, "Claves de una gestión pública del recurso hídrico. Una revisión de bibliografía," *Rev. Gestión y Ambiente*, vol. 14, 2011. [Online]. Available: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion>
- [9] S. Martín Cabo, "La gestión del agua," *Observatorio Medioambiental*, vol. 11, 2008. [Online]. Available: <https://revistas.ucm.es/index.php/OBMD>
- [10] L. Zhang and Y. Wang, "Digital twin-based simulation framework for urban water distribution systems: Application to pressure management and leakage detection," *Water Research*, vol. 241, 120417, 2023. doi:10.1016/j.watres.2023.120417
- [11] T. D. Fletcher *et al.*, "SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage," *Urban Water J.*, vol. 12, no. 7, pp. 525–542, 2015. doi:10.1080/1573062X.2014.916314
- [12] A. Bouabid and G. E. Louis, "Capacity factor analysis for evaluating water and sanitation infrastructure choices for developing communities," *J. Environ. Manage.*, vol. 161, pp. 335–343, 2015. doi:10.1016/j.jenvman.2015.07.012
- [13] J. Qu, C. Qin, J. Chang, Y. Zhao, H. Wang, and F. He, "Impact of water transfer on socioeconomic drought in China: A new approach based on production and consumption," *Agric. Water Manage.*, vol. 308, 109291, 2025. doi:10.1016/j.agwat.2025.109291
- [14] Congreso de Colombia, "Ley 675 de 2001 por la cual se regula el régimen de propiedad horizontal," *Diario Oficial*, no. 44.509, Aug. 4, 2001.
- [15] S. Wang, A. F. Taha, and A. A. Abokifa, "How effective is model predictive control in real-time water quality regulation? State-space modeling and scalable control," *Water Resour. Res.*, vol. 56, e2020WR027771, 2020. doi:10.1029/2020WR027771
- [16] Y. Shastri and U. Diwekar, "Sensor placement in water networks: A stochastic programming approach," *J. Water Resour. Plann. Manage.*, vol. 132, no. 3, pp. 192–203, 2006. doi:10.1061/(ASCE)0733-9496(2006)132:3(192)
- [17] J. Karnon *et al.*, "Modeling using discrete event simulation: A report of the ISPOR-SMDM Modeling Good Research Practices Task Force–4," *Value Health*, vol. 15, no. 6, pp. 821–827, 2012. doi:10.1016/j.jval.2012.04.013
- [18] A. Zanfei, A. Menapace, B. M. Brentan, R. Sitzenfrei, and M. Herrera, "Shall we always use hydraulic models? A graph neural network metamodel for water system calibration and uncertainty assessment," *Water Res.*, vol. 242, 120264, 2023. doi:10.1016/j.watres.2023.120264
- [19] R. Liang *et al.*, "Wireless water consumption sensing system for building energy efficiency: A visual-based approach with self-powered operation," *Energy Build.*, vol. 301, 113584, 2023. doi:10.1016/j.enbuild.2023.113584
- [20] A. M. Al-Smadi, "IoT-based smart water management system for residential buildings using real-time monitoring and predictive analytics," *Sustainable Cities and Society*, vol. 98, 104831, 2023. doi:10.1016/j.scs.2023.104831
- [21] O. Yılmaz and S. Bavi, "Effect of constitutive material model on the finite element simulation of shear localization onset," *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 102, 102105, 2020. doi:10.1016/j.simpat.2020.102105
- [22] M. García-Morales *et al.*, "Energy efficiency assessment of water pumping systems in multifamily buildings: A case study in Latin American cities," *Energy and Buildings*, vol. 285, 112948, 2023. doi:10.1016/j.enbuild.2023.112948
- [23] de Souza, D. F., da Guarda, E. L. A., Sauer, I. L., & Tatizawa, H. (2021). Energy efficiency indicators for water pumping systems in multifamily buildings. *Energies*, 14(21), 7152.
- [24] F. Hooshmand, F. Amerehi, and S. A. MirHassani, "Logic-based benders decomposition algorithm for contamination detection problem in water networks," *Comput. Oper. Res.*, vol. 115, 104840, 2020. doi:10.1016/j.cor.2019.104840
- [25] **R. Liang *et al.*, "Wireless water consumption sensing system for building energy efficiency: A visual-based approach with self-powered operation," *Energy and Buildings*, vol. 301, p. 113584, 2023. doi:10.1016/j.enbuild.2023.113584.**
- [26] J. Temido, J. Sousa, and R. Malheiro, "SCADA and smart metering systems in water companies: A perspective based on the value creation analysis," *Procedia Eng.*, vol. 70, pp. 1629–1638, 2014. doi:10.1016/j.proeng.2014.02.180
- [27] Z. Shu *et al.*, "An interval bilateral regulation framework of water resources supply and demand in irrigation area under water sources uncertainty," *Agric. Water Manage.*, vol. 307, 109266, 2025. doi:10.1016/j.agwat.2024.109266
- [28] M. M. Aral, J. Guan, and M. L. Maslia, "Optimal design of sensor placement in water distribution networks," *J. Water Resour. Plann. Manage.*, vol. 136, no. 1, pp. 5–18, Jan. 2010. doi:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000001
- [29] Q. Zhang, F. Zheng, Z. Kapelan, D. Savic, G. He, and Y. Ma, "Assessing the global resilience of water quality sensor placement strategies within water distribution systems," *Water Res.*, vol. 172, 115527, 2020. doi:10.1016/j.watres.2020.115527
- [30] H. Basha and L. Malaeb, "Eulerian–Lagrangian method for constituent transport in water distribution networks," *J. Hydraul. Eng.*, vol. 133, no. 10, pp. 1155–

1166, Oct. 2007. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:10(1155)

[31] P. F. Martínez-Austria and A. Vargas-Hidalgo, "Modelo dinámico adaptativo para la gestión del agua en el medio urbano," *Tecnol. Cienc. Agua*, vol. 7, no. 4, pp. 139–154, 2016. [Online]. Available:

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000400139

[32] F. J. Aguirre and D. R. Martí Capitanachi, "Taxonomía de modelos de gestión urbana del agua: experiencias de diversas latitudes y conclusiones aplicables al caso mexicano," *Rev. Tecnogestión*, vol. 13, pp. 76–91, 2016. [Online]. Available: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tecges/issue/view/431>

[33] J. Gao, L. Zheng, S. Li, X. Nie, and K. Huang, "Analysis of water supply and usage cooperation strategies and evolutionary game among multiple stakeholders in water network," *J. Hydrol. Reg. Stud.*, vol. 58, 102258, 2025. doi:10.1016/j.ejrh.2025.102258

[34] D. Spuhler, A. Scheidegger, and M. Maurer, "Generation of sanitation system options for urban planning considering novel technologies," *Water Res.*, vol. 145, pp. 611–623, 2018. doi:10.1016/j.watres.2018.08.021

[35] American Water Works Association (AWWA), M1: Manual of Water Supply Practices—Water Distribution System Design, 6th ed. Denver, CO: AWWA, 2020.

BIOGRAFÍAS

Omar Leonardo Leyton Mendieta, es Ingeniero Electrónico, Especialista en Gestión de Redes y Datos de la Universidad Nacional de Colombia, Colombia. Actualmente es docente e investigador en la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), donde lidera proyectos en automatización residencial y seguridad hídrica. Sus líneas de investigación incluyen sistemas embebidos, Internet de las Cosas (IoT) y energías renovables. <https://orcid.org/0000-0003-4438-4643>

Yesid Alexander Garces Pulido, es Administrador de Empresas, Especialista y Magister en Gerencia del Talento Humano, PhD en Administración Gerencial. Actualmente es docente e investigador en la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). Su experiencia se centra en estudios del trabajo y desarrollo endógeno con perspectiva del marxismo analítico. <https://orcid.org/0000-0001-9563-5698>

Iván Alveiro Quintero Castaño, es Licenciado en Física y Magíster en Ciencias de la Educación de la Universidad Distrital, Colombia. Actualmente es docente e investigador adscrito a la Secretaría de Educación. Su labor investigativa se enfoca en estudios del trabajo y pedagogías críticas. <https://orcid.org/0000-0003-4622-0239>