

Sistema inteligente de captación y gestión de agua lluvia para usos no potables

Informe Semana 06 - Automatización

Autor: Vicente Rojas Fecha de entrega: 2 de octubre de 2026

Correo de entrega: v.rojas06@ufromail.cl

Afiliación académica: Universidad de La Frontera.

Resumen

Este informe propone una solución de automatización para captación, almacenamiento y gestión de agua lluvia orientada a viviendas, pequeños alojamientos y establecimientos que dispongan de superficie de captación y consumos no potables. La propuesta integra medición de nivel, caudal y lluvia, actuación mediante bomba o válvula, lógica de control y monitoreo remoto. Se comparan configuraciones de lazo abierto y lazo cerrado y se presenta una respuesta simulada de primer orden para ilustrar el comportamiento del nivel. La revisión bibliográfica confirma que existen sistemas IoT para monitoreo y control de estanques y soluciones de control en tiempo real para agua lluvia; por ello, la oportunidad no se fundamenta en afirmar que cada componente sea nuevo, sino en integrar diagnóstico, control, visualización y operación para un segmento definido. Se concluye que la factibilidad técnica es plausible con tecnologías disponibles, mientras que la viabilidad económica y la diferenciación comercial deben validarse mediante prototipo, pruebas de campo y entrevistas a potenciales clientes.

1. Introducción

La automatización permite transformar una instalación hidráulica pasiva en un sistema capaz de medir su estado, ejecutar acciones y corregir desviaciones. En un sistema de captación de agua lluvia, el problema no consiste únicamente en almacenar agua: también es necesario conocer cuánto volumen está disponible, evitar rebalses o funcionamiento en seco, decidir cuándo bombear o derivar agua y entregar información útil al usuario. Estas funciones son especialmente relevantes cuando el agua captada se destina a riego, limpieza, descarga de sanitarios u otros usos no potables.

La literatura muestra que el monitoreo IoT de estanques, el control automático de bombas y el uso de sensores ultrasónicos ya son tecnologías desarrolladas. También se han estudiado estanques de lluvia con control en tiempo real y estrategias de descarga anticipada asociadas a pronósticos. Por tanto, este informe evita presentar como novedosos componentes que ya existen y plantea como hipótesis de emprendimiento una integración modular enfocada en captación de lluvia, control operativo, indicadores de desempeño y servicio de implementación para usuarios de pequeña y mediana escala (Jan et al., 2022; Di Matteo et al., 2019; Altobelli et al., 2024).

El objetivo es definir técnicamente la propuesta, identificar sus variables de automatización, representar sus lazos de control, analizar una respuesta dinámica simulada y distinguir con claridad entre lo técnicamente realizable y aquello que todavía necesita validación experimental o comercial.

2. Metodología

Se utilizó un enfoque de diseño conceptual. Primero se delimitó el problema y el usuario objetivo. Luego se revisaron publicaciones y ejemplos técnicos sobre monitoreo de nivel, bombas automáticas, estanques inteligentes y control de sistemas de agua lluvia. La búsqueda se realizó mediante términos relacionados con “IoT water tank”, “smart rainwater tank”, “rainwater harvesting automation”, “water level control” y “real-time control”. Esta búsqueda no constituye una revisión sistemática de todo el mercado chileno ni internacional; por ello, no permite afirmar inexistencia comercial absoluta de soluciones equivalentes.

A partir de esa revisión se definieron las variables de entrada, salida, medición, actuación y perturbación. Los diagramas fueron construidos específicamente para este informe como representaciones conceptuales. La gráfica dinámica fue simulada a partir del modelo de primer orden

$$H(s)/Q_i(s)=1/(2s+0,01), (1)$$

ante un escalón de caudal de 0,02 m³/s, utilizado como ejemplo de comportamiento de nivel. El modelo predice una ganancia estática de 100, una constante de tiempo de 200 s y un nivel final equivalente de 2 m. Se aplicó el criterio de estabilización

$$e^{-5} \approx 0, (2)$$

equivalente a cinco constantes de tiempo.

2.1. Uso de IA

Declaración de contribuciones según el marco Ciencia Generativa (Alarcón, 2026): Vicente Rojas (Humano): Conceptualización del problema y selección del contexto de aplicación; definición del enfoque general; validación de la coherencia con los contenidos del curso; revisión y edición final; decisión sobre la propuesta presentada. GPT-5.6 Sol de OpenAI (IA): Investigación asistida de antecedentes públicos; apoyo en análisis formal del modelo dinámico; redacción del borrador original; estructuración del informe; elaboración de diagramas conceptuales y gráfica simulada; revisión de coherencia y edición.

Evaluación de la distribución de contribuciones: la IA tuvo una participación alta en la preparación del borrador, organización, búsqueda y visualización, mientras que la responsabilidad académica sobre la elección del problema, aceptación de supuestos, revisión de resultados y entrega corresponde al estudiante. Esta distribución debe contrastarse con el trabajo efectivamente realizado antes de entregar el documento; si el estudiante modifica, elimina o agrega tareas, la declaración debe actualizarse para no atribuir contribuciones inexistentes.

3. Resultados

3.1. Problema y solución propuesta

La propuesta aborda instalaciones en las que el agua lluvia se capta desde cubiertas y se almacena para usos no potables, pero donde la operación depende de inspección manual o reglas simples. El usuario puede desconocer el volumen disponible, detectar tarde un rebalse, activar una bomba sin suficiente agua o no disponer de registros que permitan evaluar ahorro y desempeño.

Se propone un sistema modular compuesto por: captación y filtrado inicial; estanque de almacenamiento; sensor de nivel; medición de caudal en la línea de consumo; sensor o dato de precipitación; controlador local; bomba y/o válvula eléctrica; protección por nivel mínimo y máximo; y plataforma de visualización. La lógica puede comenzar con umbrales simples y evolucionar a control proporcional o estrategias predictivas una vez que exista información suficiente.

El valor económico potencial proviene de reducir inspecciones manuales, aprovechar mejor el agua almacenada, disminuir pérdidas por rebalse o decisiones incorrectas y entregar trazabilidad del desempeño. Sin datos de instalación, consumo, tarifa de agua, precipitación efectiva y costo de equipos no corresponde afirmar un periodo de retorno específico. Ese cálculo debe realizarse por caso.

3.2. Variables y supuestos de funcionamiento

Las variables y sus funciones se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Variables relevantes de la solución propuesta.

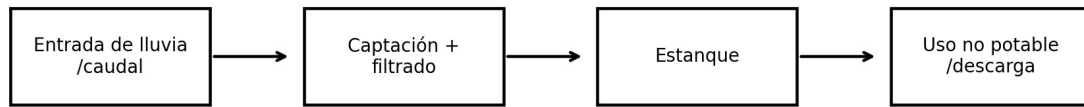
Elemento	Variable propuesta	Función
Entrada	Precipitación $P(t)$ y caudal captado $Q_i(t)$	Aporte de agua al sistema.
Salida / variable controlada	Nivel $h(t)$ o volumen $V(t)$	Estado principal que se desea mantener dentro de límites.
Variable manipulada	Caudal de bomba o apertura de válvula $u(t)$	Modifica la extracción, transferencia o descarga.
Sensor	Nivel ultrasónico o presión hidrostática; caudalímetro	Entrega la medición para supervisión y realimentación.
Actuador	Bomba, relé/variador y electroválvula	Ejecuta la orden del controlador.
Perturbaciones	Variación de lluvia, demanda, pérdidas, obstrucciones y cortes eléctricos	Alteran el nivel o la disponibilidad sin ser órdenes del controlador.

Supuestos: el agua se destina a usos no potables; el estanque posee geometría conocida para convertir nivel en volumen; los sensores están calibrados; existe protección contra funcionamiento en seco y rebalse; la bomba y válvulas están dimensionadas hidráulicamente; el sistema puede operar localmente aun cuando se pierda la conexión a Internet; y cualquier uso que implique requisitos sanitarios adicionales queda fuera del alcance de este diseño conceptual.

3.3. Configuración de lazo abierto

La Figura 1 representa una operación en lazo abierto. La acción sobre el sistema se define sin utilizar el nivel medido para corregir automáticamente la orden. Por ejemplo, una bomba podría activarse durante un tiempo prefijado después de una condición programada. La principal limitación es que una perturbación -como una lluvia menor a la prevista o una demanda mayor- no genera por sí sola una corrección basada en el error de nivel.

Figura 1. Diagrama conceptual de operación en lazo abierto. Elaboración propia con apoyo de IA.



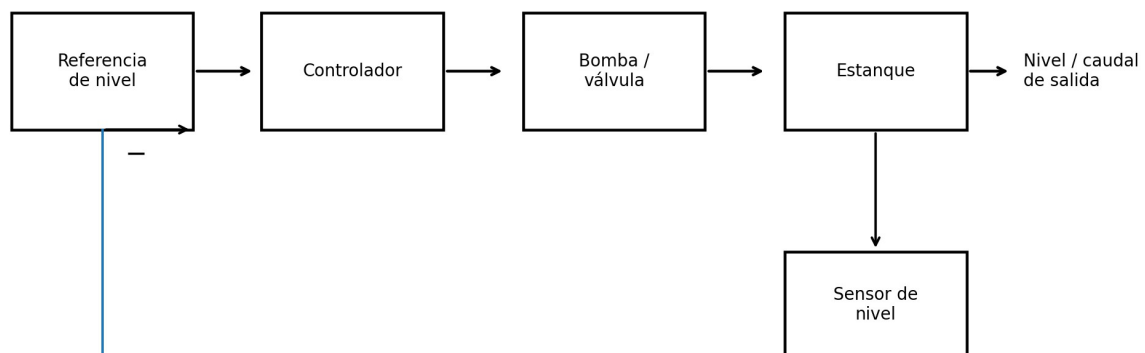
Lazo abierto: no se usa la medición del nivel para corregir la acción

3.4. Configuración de lazo cerrado

En lazo cerrado, el sensor mide el nivel y la medición vuelve al controlador. El controlador compara el valor medido con una referencia o banda permitida y modifica la acción de la bomba o válvula. Si el nivel se aleja de la referencia, la orden se ajusta para reducir esa desviación. Esta configuración permite responder a perturbaciones y es coherente con aplicaciones de control automático de nivel descritas en la literatura.

El esquema de realimentación se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Diagrama conceptual de operación en lazo cerrado. Elaboración propia con apoyo de IA.



Lazo cerrado: la medición del sensor se realimenta para reducir la desviación respecto de la referencia

3.5. Respuesta dinámica simulada

Para ilustrar el comportamiento del nivel se considera el modelo

$$H(s)/Q_i(s)=1/(2s+0,01). \quad (1)$$

Al factorizar el denominador se obtiene

$$100/(200s+1), \quad (3)$$

por lo que

$$K=100 \text{ y } \tau=200 \text{ s.} \quad (4)$$

Ante un escalón

$$Q_i = 0,02 \text{ m}^3/\text{s}, (5)$$

la respuesta es

$$h(t) = 2(1 - e^{-(t/200)}). (6)$$

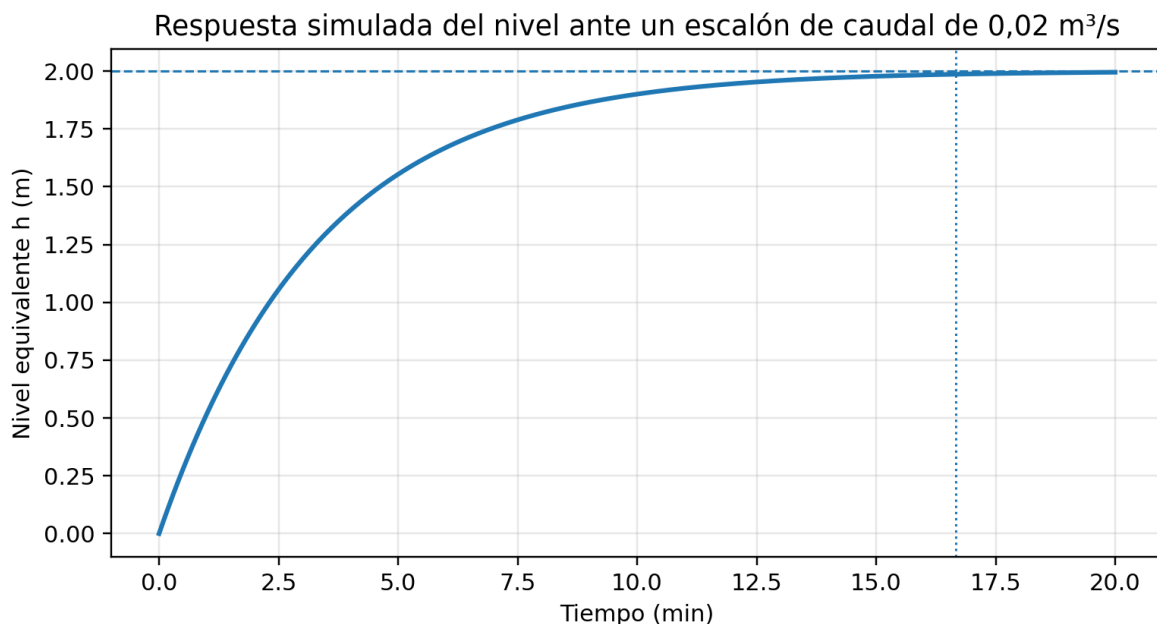
La condición inicial es

$$h(0) = 0 \text{ m} (7)$$

y el valor final del modelo es 2 m.

La respuesta simulada del nivel se presenta en la Figura 3.

Figura 3. Respuesta simulada de primer orden ante un escalón de caudal de $0,02 \text{ m}^3/\text{s}$. Modelo conceptual empleado en el análisis; no corresponde a mediciones experimentales.



Con el criterio

$$e^{-5} \approx 0, (2)$$

el sistema se considera prácticamente estabilizado a

$$t \approx 5\tau = 1000 \text{ s}, (8)$$

es decir, aproximadamente 16,7 min. En ese instante

$$h \approx 1,987 \text{ m}, (9)$$

valor que se aproxima al nivel final de 2 m. Esta gráfica sirve para relacionar los conceptos de ganancia, constante de tiempo y estabilización con la aplicación propuesta; no demuestra el desempeño de un prototipo real.

3.6. Decisiones para convertir la idea en una solución operativa

La implementación requeriría seleccionar el método de medición de nivel según geometría y ambiente; dimensionar bomba, tuberías y válvulas; definir límites de seguridad; diseñar alimentación y respaldo; calibrar sensores; establecer una lógica local independiente de la nube; registrar datos; y proteger la instalación frente a humedad, fallas eléctricas y pérdida de comunicaciones. La conectividad IoT debe utilizarse como capa de supervisión y registro, no como único mecanismo de seguridad.

Antes de emprender comercialmente deben validarse: precisión del nivel y caudal en condiciones reales; respuesta ante lluvia intensa y demanda variable; confiabilidad de comunicaciones; mantenimiento del sistema de captación y filtros; costo total instalado; ahorro o beneficio medible; disposición a pagar; y existencia de competidores directos en el segmento y territorio objetivo. La búsqueda realizada confirma antecedentes tecnológicos cercanos, por lo que la diferenciación debe comprobarse comercialmente y no asumirse.

4. Discusión

Desde el punto de vista técnico, la propuesta es realizable porque sus componentes fundamentales -sensores de nivel, microcontroladores, bombas, válvulas, telemetría y control- están documentados en aplicaciones de gestión de agua. Jan et al. (2022) revisan soluciones IoT que combinan monitoreo de nivel, detección de fugas y control de bombas. Otros trabajos demuestran sistemas de dos estanques con control inteligente y monitoreo de calidad, así como soluciones de captación de lluvia con sensores y actuación automática. Estos antecedentes reducen la incertidumbre sobre la factibilidad de los bloques tecnológicos, aunque no validan esta configuración específica ni sus costos.

La oportunidad económica es una cuestión distinta. La existencia de tecnologías similares implica que el valor debe estar en la integración, adaptación al usuario, instalación, mantenimiento, visualización de indicadores y capacidad de demostrar beneficios. La revisión también encontró investigaciones sobre estanques inteligentes conectados y control en tiempo real para reducir caudales punta, lo que limita cualquier afirmación de novedad tecnológica absoluta. En consecuencia, la propuesta se entiende como una hipótesis de producto-servicio que requiere validación de mercado.

El modelo dinámico empleado es deliberadamente simple. Supone un sistema lineal de primer orden y no incorpora saturación del estanque, variación del área transversal, límites de bomba, retardo de sensores, infiltración, evaporación ni cambios de demanda. Su utilidad es pedagógica: permite interpretar una constante de tiempo de 200 s y un tiempo de estabilización aproximado de 1000 s. Para diseño real se debería identificar el modelo con datos experimentales del estanque y validar su capacidad predictiva.

Respecto del uso de IA, su aporte fue útil para acelerar la búsqueda de antecedentes, organizar la estructura y generar representaciones. Sin embargo, la IA no sustituye la verificación experimental ni la decisión sobre si el producto posee demanda real. También existe riesgo de formular afirmaciones de novedad demasiado amplias; por eso el informe explicita los límites de la búsqueda y evita concluir que no existe ninguna solución equivalente en el mercado.

5. Conclusiones

La propuesta integra captación de agua lluvia, medición de nivel y caudal, actuación mediante bomba o válvula, control local y monitoreo remoto para administrar usos no potables. Su arquitectura puede operar inicialmente con reglas por umbral y evolucionar hacia estrategias de control más avanzadas.

La comparación entre lazo abierto y lazo cerrado muestra el aporte central de la realimentación: medir el estado del estanque permite corregir desviaciones provocadas por cambios en lluvia o consumo. En el ejemplo dinámico, el modelo de primer orden predice un nivel final de 2 m y una estabilización aproximada a los 16,7 min bajo el criterio de cinco constantes de tiempo.

La revisión de antecedentes indica que sensores, IoT, bombas automáticas y estanques inteligentes ya existen, por lo que la propuesta no debe defenderse como una invención aislada de esos elementos. El aporte planteado es su integración como solución orientada a operación, diagnóstico y seguimiento del desempeño. La factibilidad técnica es razonable a nivel conceptual, pero la oportunidad económica solo puede sostenerse después de validar costos, confiabilidad, ahorro y disposición a pagar mediante un prototipo y pruebas con usuarios reales.

6. Declaración final

Este informe se distribuye bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Bibliografía

- Alarcón, C. (2026). Generative Science as an analytical framework for integrating the full capabilities of generative artificial intelligence into scientific research while preserving scientific recognition. *Generative Science Preprints*, 2026(07), 19055673. <https://doi.org/10.5281/zenodo.19055673>
- Jan, F., Min-Allah, N., Saeed, S., Iqbal, S. Z., y Ahmed, R. (2022). IoT-Based Solutions to Monitor Water Level, Leakage, and Motor Control for Smart Water Tanks. *Water*, 14(3), 309. <https://doi.org/10.3390/w14030309>
- Di Matteo, M., Liang, R., Maier, H. R., Thyer, M. A., Simpson, A. R., Dandy, G. C., y Ernst, B. (2019). Controlling rainwater storage as a system: An opportunity to reduce urban flood peaks for rare, long duration storms. *Environmental Modelling & Software*, 111, 34–41. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.09.020>
- Altobelli, M., Evangelisti, M., y Maglionico, M. (2024). Multi-Objective Performance of Detention Basins and Rainwater Harvesting Systems Using Real-Time Controls with Rainfall Forecasts. *Water*, 16(1), 71. <https://doi.org/10.3390/w16010071>
- Abubeker K. M., y Nuthalapati, A. (2025). Cloud Based LoRaWAN Enabled Water Tank Automation Framework. *Procedia Computer Science*, 252, 768–775. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.01.037>
- Bhookya, J., Vijaya Kumar, M., Ravi Kumar, J., y Seshagiri Rao, A. (2022). Implementation of PID controller for liquid level system using mGWO and integration of IoT application. *Journal of Industrial Information Integration*, 28, 100368. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100368>