

Caracterización de un sistema automatizado de captación y almacenamiento de agua lluvia

Autor: Vicente Rojas Fecha: 26 de septiembre de 2026

Correo de entrega: v.rojas06@ufromail.cl

Resumen.

Este informe caracteriza un sistema automatizado de captación de agua lluvia destinado al almacenamiento y uso no potable. Se analiza el nivel de agua del estanque como variable controlada, utilizando medición de nivel y caudal, una bomba o válvula como elemento final de control y la precipitación y el consumo como perturbaciones. Se comparan las configuraciones de lazo abierto y lazo cerrado mediante diagramas de bloques y se presenta una respuesta temporal conceptual de primer orden. El análisis muestra que la realimentación permite corregir desviaciones respecto de un nivel de referencia, mejorar la supervisión operacional y comunicar de manera inequívoca las relaciones entre sensores, actuadores, señales y proceso.

1. Introducción

La captación de agua lluvia permite interceptar precipitación desde una superficie de recolección, conducirla, filtrarla y almacenarla para usos compatibles con la calidad disponible. En el sistema considerado, el agua captada desde una cubierta pasa por conducción y prefiltrado hacia un estanque. La cantidad potencial captada se representa mediante

$$V = P \cdot A \cdot C, (1)$$

donde V es el volumen recolectable, P la precipitación, A el área efectiva de captación y C un coeficiente global de captación. Para una implementación automatizada, la información de lluvia, nivel y caudal puede incorporarse a un sistema de monitoreo que permita decidir cuándo habilitar o detener el suministro desde el estanque.

La automatización es especialmente útil porque la disponibilidad de agua lluvia y la demanda no son constantes. Un sistema sin realimentación ejecuta una orden sin comprobar el efecto real sobre el estanque; en cambio, un sistema en lazo cerrado utiliza la medición del proceso para modificar su acción. NIST distingue precisamente los sistemas de lazo cerrado por su capacidad de alterar el comportamiento a partir de realimentación sensorial, mientras que el lazo abierto carece de esa corrección en tiempo real (Quintero y Barbera, 1992).

2. Objetivo

Objetivo general. Caracterizar un sistema automatizado de captación y almacenamiento de agua lluvia mediante representaciones de control en lazo abierto y lazo cerrado y una respuesta temporal conceptual, con el propósito de identificar sus principales señales, componentes, perturbaciones y comportamiento dinámico y establecer una representación técnica comprensible para el área de control y automatización.

3. Metodología

Se definió como caso de estudio un sistema simplificado de captación de lluvia compuesto por superficie captadora, conducción, prefiltrado, estanque de almacenamiento, sensor de nivel, medición de caudal y una bomba o válvula de salida. El análisis se centra en el nivel del estanque. Se adoptó la notación $r(t)$ para la referencia de nivel, $e(t)$ para el error, $u(t)$ para la señal de control, $y(t)$ para la salida medida, $C(s)$ para el controlador, $G(s)$ para la planta, $H(s)$ para el sensor o realimentación y $d(t)$ para perturbaciones.

El diagrama de lazo abierto se construyó suponiendo una orden programada de accionamiento sin usar el nivel medido para corregirla. El diagrama de lazo cerrado se construyó incorporando un sensor de nivel, un comparador y un controlador. Para representar la dinámica se empleó una aproximación conceptual de primer orden:

$$y(t)=y_0+(y_f-y_0)(1-e^{-(t/\tau)}), (2)$$

con $y_0=25\%$, $y_f=75\%$ y $\tau=2,1$ min. Esta curva no corresponde a una medición de campo; es una simulación conceptual destinada a mostrar una respuesta estable, sin sobreimpulso, coherente con un estanque cuyo nivel cambia gradualmente.

3.1. Uso de IA

Vicente Rojas (Humano): selección del tema y conceptualización del sistema de captación de lluvia; aporte de antecedentes técnicos previamente definidos para el sistema; definición del propósito del informe; revisión y responsabilidad sobre las decisiones técnicas, interpretación y versión final. GPT-5.6 Sol de OpenAI (IA): apoyo en organización metodológica, análisis formal del caso simplificado, generación de las representaciones y visualización conceptual, redacción del borrador original y apoyo de revisión y edición. La metodología y la validación final requieren participación humana efectiva: los supuestos, diagramas, ecuaciones, interpretación y referencias deben ser revisados por el autor antes de la entrega. La distribución de roles fue evaluada a partir de la interacción realizada y ajustada para distinguir el aporte humano del apoyo generativo, siguiendo el marco solicitado de Ciencia Generativa (Alarcón, 2026).

4. Resultados

4.1. Caracterización del sistema

Los elementos del sistema se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Caracterización del sistema de captación y almacenamiento de agua lluvia.

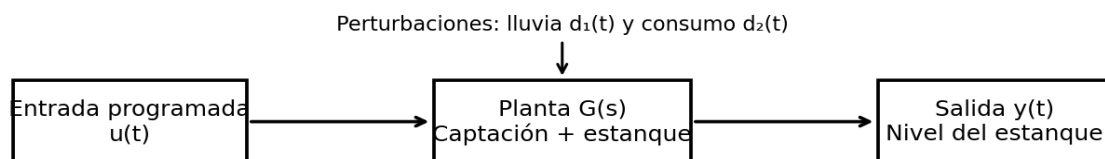
Elemento	Definición en el sistema
Variable controlada $y(t)$	Nivel de agua almacenada en el estanque [% o m].
Referencia $r(t)$	Nivel objetivo de operación del estanque.
Variable manipulada $u(t)$	Orden de apertura/cierre o velocidad aplicada a bomba/válvula.
Actuador	Bomba hidráulica o válvula solenoide/motorizada.
Sensor / medición	Sensor de nivel; caudalímetro y pluviómetro como mediciones complementarias.
Perturbaciones $d(t)$	Precipitación variable, consumo de agua, pérdidas y variación del caudal de entrada.
Planta $G(s)$	Captación, conducción, estanque y dinámica hidráulica asociada.

La variable principal es el nivel del estanque porque permite relacionar directamente disponibilidad, seguridad frente a vaciado y riesgo de rebalse. Como respaldo técnico, la EPA describe sistemas reales de captación que utilizan interruptores de nivel para accionar válvulas y controlar condiciones de nivel bajo, además de sensores de presión y bombas para la distribución (Vita Nuova LLC, 2009).

4.2. Configuración en lazo abierto

La configuración en lazo abierto se representa en la Figura 1.

Figura 1. Diagrama de bloques del sistema de captación en lazo abierto. Elaboración propia.

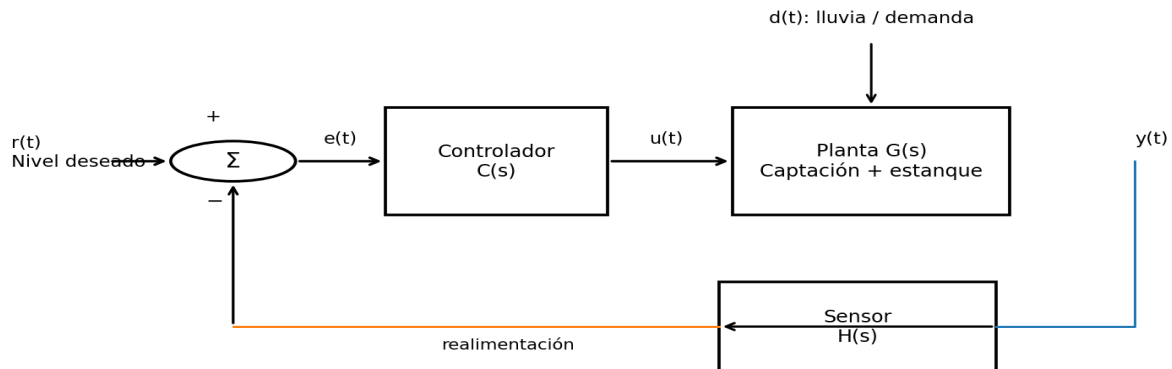


En esta configuración, la entrada $u(t)$ se fija mediante una programación previa; por ejemplo, hacer funcionar una bomba durante un intervalo determinado. La planta transforma esa acción en una variación del nivel $y(t)$. La lluvia y el consumo modifican el resultado, pero no existe una trayectoria de retorno desde la salida hacia la decisión de control. Por ello, el sistema no sabe si el nivel real alcanzó el valor deseado, si una lluvia intensa está llenando el estanque más rápido de lo previsto o si una demanda extraordinaria lo está vaciando. La principal información ausente es la medición utilizada para corregir automáticamente la acción.

4.3. Configuración en lazo cerrado

La configuración en lazo cerrado se representa en la Figura 2.

Figura 2. Diagrama de control en lazo cerrado con realimentación del nivel. Elaboración propia.



En lazo cerrado se compara el nivel deseado $r(t)$ con el nivel medido. La diferencia genera

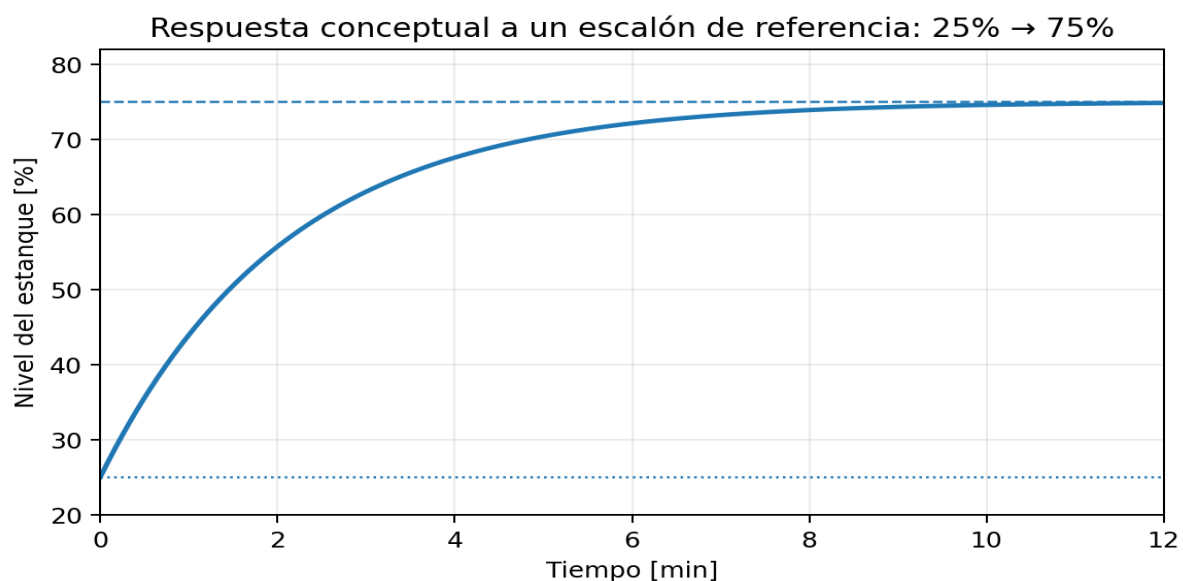
$$e(t)=r(t)-y_m(t). \quad (3)$$

El controlador $C(s)$ transforma el error en $u(t)$, que gobierna el actuador asociado a la planta $G(s)$. El sensor $H(s)$ devuelve una medición del nivel para cerrar el ciclo. Si el nivel cae bajo el objetivo, el controlador puede limitar la extracción, activar una fuente de respaldo cuando el diseño lo contemple o generar una alarma; si el nivel se aproxima al máximo seguro, puede detener una alimentación auxiliar o gestionar el desvío de excedentes. La EPA documenta cisternas con interruptores de nivel alto, bajo y alarma que accionan válvulas y protegen la operación, lo que respalda el uso de nivel como señal de automatización.

4.4. Respuesta temporal

La respuesta temporal se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Respuesta conceptual a un escalón de referencia de nivel desde 25 % hasta 75 %. Simulación propia mediante modelo de primer orden.



La condición inicial se fija en 25 % de nivel. En $t=0$ min se aplica un cambio escalón de referencia hasta 75 %. La curva aumenta de forma monótona y se aproxima asintóticamente al valor final. Con $\tau=2,1$ min, a un tiempo de una constante temporal se ha completado aproximadamente el 63 % del cambio total; alrededor de 4τ , la respuesta se encuentra muy próxima al valor final. En este modelo no existe sobreimpulso ni oscilación. La rapidez representada es ilustrativa y no debe interpretarse como desempeño medido de un estanque real: el tiempo efectivo dependerá de capacidad, geometría, caudales, actuador, pérdidas y estrategia de control.

5. Discusión

La diferencia esencial entre ambas configuraciones es el uso de información de salida. En lazo abierto, la acción depende de una programación o decisión previa y no de la diferencia entre el estado deseado y el observado. Esto reduce complejidad y costo, pero deja al sistema expuesto a variaciones de precipitación, consumo y caudal. En lazo cerrado, la medición de nivel permite detectar desviaciones y ajustar la acción del actuador. NIST define los controladores de proceso como dispositivos que usan un lazo de realimentación, un valor de consigna y un sensor asociado a la magnitud controlada (NIST, 2019).

Una decisión técnica derivada de esta comparación es priorizar un sensor de nivel confiable y definir umbrales operacionales. Para un sistema real también resultan pertinentes alarmas de nivel alto y bajo, protección de la bomba y posibilidad de operación manual. La EPA recomienda que los estanques cuenten con medios confiables de medición de nivel y señala que los controles deben considerar alarmas frente a fallas, rebalse y niveles bajos. Así, la realimentación no solo mejora la regulación sino que aporta supervisión y seguridad operacional.

La respuesta temporal complementa los diagramas porque permite observar cómo evoluciona la salida después de una modificación de referencia. Mientras el diagrama identifica relaciones funcionales, la curva muestra rapidez, tendencia, valor final y posibles fenómenos como sobreimpulso u oscilación. En conjunto, las representaciones reducen ambigüedades: términos como referencia, error, señal de control, planta, perturbación y realimentación quedan asociados a señales concretas y pueden ser revisados por distintas personas utilizando el mismo lenguaje técnico.

6. Conclusiones

El sistema de captación de lluvia puede representarse de forma coherente como un proceso de control cuyo estado principal es el nivel de agua almacenada. En lazo abierto, una orden de actuación produce una respuesta sin utilizar la salida para corregir desviaciones, por lo que cambios en lluvia o consumo pueden alejar al sistema de la condición deseada. En lazo cerrado, la medición de nivel se realimenta, se compara con una referencia y permite generar una acción correctiva.

La respuesta a escalón conceptual permitió describir una evolución estable hacia el nivel objetivo y evidenciar parámetros dinámicos que no se observan directamente en un diagrama de bloques. La combinación de diagramas y respuesta temporal entrega una representación compartida de componentes, señales y comportamiento, facilitando la comunicación entre quienes diseñan, implementan, mantienen o evalúan un sistema de automatización hídrica.

7. Declaraciones finales

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

Autorización de edición formal. Se autoriza a coautores editoriales a corregir errores simples de forma, referencias, formato o declaraciones requeridas, preservando el contenido sustantivo y la autoría del informe.

Autorización para publicar. El autor autoriza la publicación y reutilización académica o científica de este informe conforme a la licencia CC BY 4.0, siempre que se mantenga la atribución correspondiente.

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>
- Quintero, R., y Barbera, T. (1992). A Real-Time Control System Methodology for Developing Intelligent Control Systems (NISTIR 4936). National Institute of Standards and Technology. <https://www.nist.gov/publications/real-time-control-system-methodology-developing-intelligent-control-systems>
- National Institute of Standards and Technology (NIST). (2019, 21 de marzo). Process Controllers (Temperature, Pressure, etc.). NCNR NICE Help (actualizado el 6 de marzo de 2023). <https://www.nist.gov/ncnr/nice-help/devices/process-controllers-temperature-pressure-etc>
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2008). Cisterns and Irrigation System at EPA West (EPA 800-R-08-003). <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P1003RB8.TXT>
- Vita Nuova LLC. (2009, 3 de agosto). Rainwater Harvesting System Design — June Key Delta House. Preparado para U.S. Environmental Protection Agency. https://archive.epa.gov/brownfields/sustain_plts/web/pdf/rainwater_harvesting_system_design_8_3_09.pdf