

Control de nivel de un tanque mediante lazo abierto y lazo cerrado

Caracterización mediante diagramas de bloques y respuesta temporal

Autor	Rodrigo Ignacio Núñez Huaiquir
Correo	r.nunez04@ufromail.cl
Fecha	24 de septiembre de 2026
Sistema	Control automático del nivel de agua en un tanque

Resumen

Este informe caracteriza un sistema de control de nivel de agua en un tanque mediante diagramas de lazo abierto y lazo cerrado y una respuesta temporal a escalón. El sistema utiliza una bomba accionada por variador de frecuencia, un sensor de nivel y un controlador proporcional integral. En lazo abierto, el caudal se establece mediante una orden programada sin utilizar la medición del nivel, por lo que los cambios del caudal de salida no se corrigen automáticamente. En lazo cerrado, la referencia se compara con el nivel medido y el controlador ajusta la bomba. Para el caso hipotético se empleó un modelo lineal de primer orden con una constante de tiempo de planta de 100 s. La configuración propuesta produce una respuesta cerrada equivalente a un sistema de primer orden con constante de tiempo de 50 s. Ante un cambio de referencia desde 0,50 hasta 0,60 m, el nivel alcanza 0,563 m en 50 s, cerca del 95 % del cambio en 150 s y no presenta sobreimpulso en el modelo ideal. Los diagramas y la gráfica permiten comunicar con precisión las señales, componentes, supuestos y límites del análisis.

Palabras clave: control de nivel, tanque, lazo abierto, lazo cerrado, controlador PI, respuesta a escalón.

1 Introducción

El control de nivel se utiliza en estanques de almacenamiento, procesos de mezcla, sistemas de agua y plantas de tratamiento. Su propósito es mantener el volumen disponible dentro de un rango seguro a pesar de cambios en la entrada o en el consumo. Una explicación solo verbal puede dejar dudas sobre qué señal modifica la bomba, dónde se mide el nivel o cómo interviene una perturbación. Los diagramas de bloques permiten representar ese flujo de información con una notación compartida por quienes diseñan, operan y mantienen sistemas de automatización.

El mismo proceso puede operar en lazo abierto o en lazo cerrado. En la primera configuración, el mando de la bomba se fija sin utilizar la salida medida. En la segunda, un sensor devuelve información del nivel y el controlador corrige la diferencia respecto de la referencia. De acuerdo con Ogata (2010), la realimentación permite comparar la salida con la entrada de referencia y actuar a partir del error. El presente informe aplica esa idea a un tanque hipotético y relaciona su estructura con una respuesta temporal verificable.

2 Objetivo

Caracterizar un sistema de control de nivel de agua en un tanque mediante diagramas de lazo abierto y lazo cerrado y una respuesta a escalón, identificando sus variables, componentes, perturbaciones, comportamiento temporal y aporte a la comunicación técnica en automatización.

3 Metodología

Se definió un caso hipotético de un tanque alimentado por una bomba centrífuga con variador de frecuencia. La variable controlada es el nivel de agua; la variable manipulada es el caudal de entrada; el sensor es un transmisor de nivel; y la principal perturbación es el caudal de salida. Se construyó primero una configuración de lazo abierto, basada en un mando horario de la bomba, y luego una configuración de lazo cerrado con realimentación negativa y controlador proporcional integral. La notación $r(t)$, $e(t)$, $u(t)$, $y(t)$, $C(s)$, $G_p(s)$, $H(s)$ y $d(t)$ sigue las convenciones sugeridas en la pauta.

El comportamiento se obtuvo a partir de un balance de volumen y una aproximación lineal de primer orden usada habitualmente en el análisis de procesos (Seborg et al., 2011). Se adoptaron parámetros ilustrativos y no medidos: área transversal $A = 1,00 \text{ m}^2$, resistencia hidráulica $R_h = 100 \text{ s/m}^2$, nivel inicial $h_0 = 0,50 \text{ m}$ y caudal de equilibrio $q_0 = 0,005 \text{ m}^3/\text{s}$. Se supuso un sensor ideal de ganancia unitaria, ausencia de retardo, bomba lineal dentro del rango analizado y propiedades constantes. Para la respuesta temporal se aplicó una referencia escalón de 0,50 a 0,60 m y se calcularon los valores mediante la ecuación del modelo cerrado.

3.1 Uso de IA

Se utilizó Codex de OpenAI, modelo GPT-5, para apoyar la formulación del caso, comprobar el modelo matemático, calcular la respuesta temporal, elaborar los diagramas, generar la gráfica y redactar el borrador. Se solicitó desarrollar un informe coherente con la pauta de la Semana 05 sobre un sistema de control de nivel, incluyendo lazo abierto, lazo cerrado, respuesta a escalón, comparación técnica y bibliografía. Se incorporaron los cálculos y representaciones que resultaron consistentes con el balance de volumen y con las fuentes consultadas. El estudiante seleccionó y aprobó el sistema, contrastó la propuesta con la pauta y conserva la responsabilidad sobre la validación técnica y la versión final.

La Tabla 1 presenta la evaluación realizada por la propia IA sobre la distribución de roles, de acuerdo con el marco Ciencia Generativa (Alarcón, 2026a).

Participante	Contribuciones efectivamente realizadas
Rodrigo Ignacio Núñez Huaiquir Humano	Conceptualización, Metodología, Validación, Investigación, Revisión y edición.
Codex de OpenAI GPT-5 IA	Apoyo en conceptualización y metodología; Investigación; Análisis formal; Visualización; Redacción del borrador original; Revisión y edición.

Tabla 1. Distribución de contribuciones evaluada por la IA según la interacción realizada.

La conceptualización, la metodología y la validación se desarrollaron con participación humana efectiva. La IA propuso y comprobó alternativas, pero la selección del caso, la revisión de los resultados y la decisión de entregar el documento corresponden al estudiante.

4 Resultados

4.1 Caracterización del sistema

La Tabla 2 identifica los componentes y señales principales del sistema. El transmisor entrega una medición continua del nivel y el variador regula la velocidad de la bomba, lo que modifica el caudal de entrada. El caudal de salida se considera una perturbación porque puede cambiar por consumo o por la apertura de una válvula sin ser ordenado por el controlador.

Elemento	Símbolo	Definición y unidad
Referencia	$r(t)$	Nivel deseado del tanque, medido en m.
Salida controlada	$y(t) = h(t)$	Nivel real del agua, medido en m.
Error	$e(t)$	Diferencia entre referencia y nivel medido, en m.
Señal de control	$u(t)$	Orden del controlador hacia el variador, expresada como señal normalizada o frecuencia.
Variable manipulada	$q_{in}(t)$	Caudal de entrada generado por la bomba, en m ³ /s.
Actuador	Bomba y variador	Conjunto que transforma la orden de control en caudal.
Medición	$y_m(t)$	Nivel indicado por el sensor y escalado en m.
Perturbación	$d(t) = q_{out}(t)$	Caudal que abandona el tanque, en m ³ /s.

Tabla 2. Componentes, señales y unidades del sistema de control de nivel.

El balance de volumen establece que la acumulación de líquido es igual a la diferencia entre los caudales de entrada y salida:

$$A \frac{dh(t)}{dt} = q_{in}(t) - q_{out}(t) \quad (1)$$

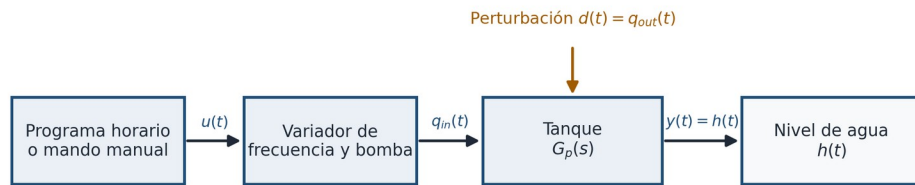
En la ecuación 1, A es el área transversal del tanque en m², h(t) es el nivel en m y los caudales se expresan en m³/s. Para obtener un modelo lineal de primer orden se aproxima el caudal de salida como $q_{out}(t) = h(t)/R_h$, donde R_h es una resistencia hidráulica en s/m². Al trabajar con variaciones respecto del punto de operación y condiciones iniciales nulas en esas variaciones, la función de transferencia de la planta es:

$$G_p(s) = \frac{\Delta H(s)}{\Delta Q_{in}(s)} = \frac{R_h}{AR_h s + 1} = \frac{100}{100s + 1} \quad (2)$$

La ganancia estática del modelo es $R_h = 100$ s/m² y la constante de tiempo de la planta es $A R_h = 100$ s. Estos parámetros son supuestos de cálculo y no corresponden a una identificación experimental.

4.2 Representación en lazo abierto

La Figura 1 presenta el sistema en lazo abierto. Un programa horario o un operador define el mando del variador; la bomba entrega el caudal de entrada y el tanque produce el nivel como salida.



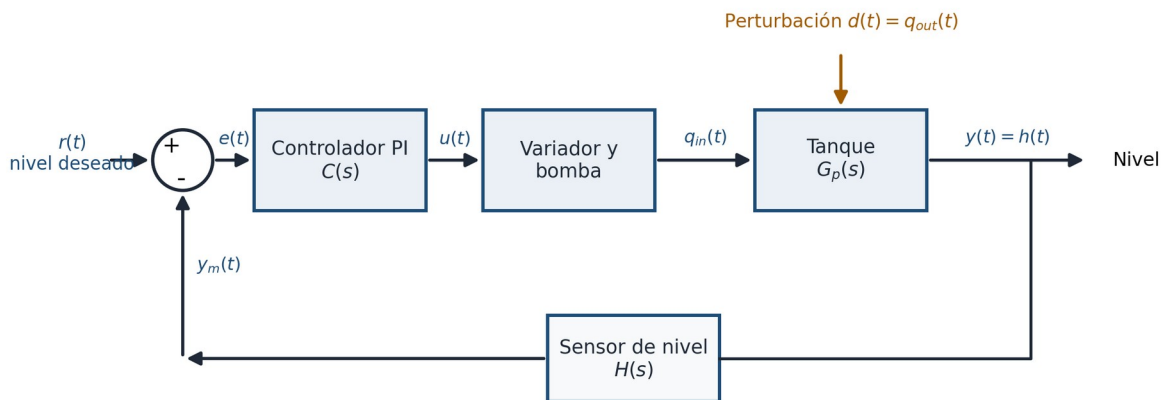
No existe medición del nivel utilizada para corregir el mando

Figura 1. Diagrama de bloques del sistema de nivel en lazo abierto. Elaboración propia con apoyo de IA.

Esta configuración no utiliza la medición de nivel para modificar el mando. Si el caudal de salida aumenta, el nivel puede disminuir aunque la bomba mantenga la misma velocidad. El sistema tampoco detecta por sí mismo un error de calibración, una pérdida de rendimiento de la bomba o una diferencia entre el nivel esperado y el real. La corrección depende de una intervención externa o de volver a programar el tiempo de funcionamiento.

4.3 Representación en lazo cerrado

La Figura 2 incorpora una realimentación negativa. El comparador calcula $e(t) = r(t) - y_m(t)$; el controlador PI genera $u(t)$; el variador y la bomba modifican $q_{in}(t)$; y el sensor devuelve una medición del nivel. El caudal de salida actúa sobre el tanque como perturbación.



La realimentación compara el nivel medido con la referencia y ajusta el caudal de la bomba

Figura 2. Diagrama de bloques del control de nivel en lazo cerrado con controlador PI. Elaboración propia con apoyo de IA.

Para el ejemplo se seleccionó un controlador PI con $K_c = 0,02 \text{ m}^2/\text{s}$ y $T_i = 100 \text{ s}$:

$$C(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right), \quad K_c = 0,02 \text{ m}^2/\text{s}, \quad T_i = 100 \text{ s} \quad (3)$$

La acción proporcional responde al error actual y la acción integral acumula el error para eliminar el desplazamiento permanente en el modelo ideal. Al considerar $H(s) = 1$ y combinar el controlador con la planta, se obtiene la función de transferencia entre la variación de referencia y la variación del nivel:

$$\frac{\Delta H(s)}{\Delta R(s)} = \frac{C(s)G_p(s)}{1 + C(s)G_p(s)} = \frac{1}{50s + 1} \quad (4)$$

La cancelación algebraica entre el cero del PI y el polo de la planta es una simplificación ideal. El resultado equivale a un sistema de primer orden con ganancia estática unitaria y constante de tiempo de 50 s.

4.4 Respuesta temporal

La Figura 3 muestra la respuesta calculada ante una referencia escalón desde 0,50 hasta 0,60 m aplicada en $t = 0$ s. La condición inicial del tanque es $h(0) = 0,50$ m y la ecuación temporal es:

$$h(t) = 0,50 + 0,10(1 - e^{-t/50}) \text{ m}, \quad t \geq 0 \quad (5)$$

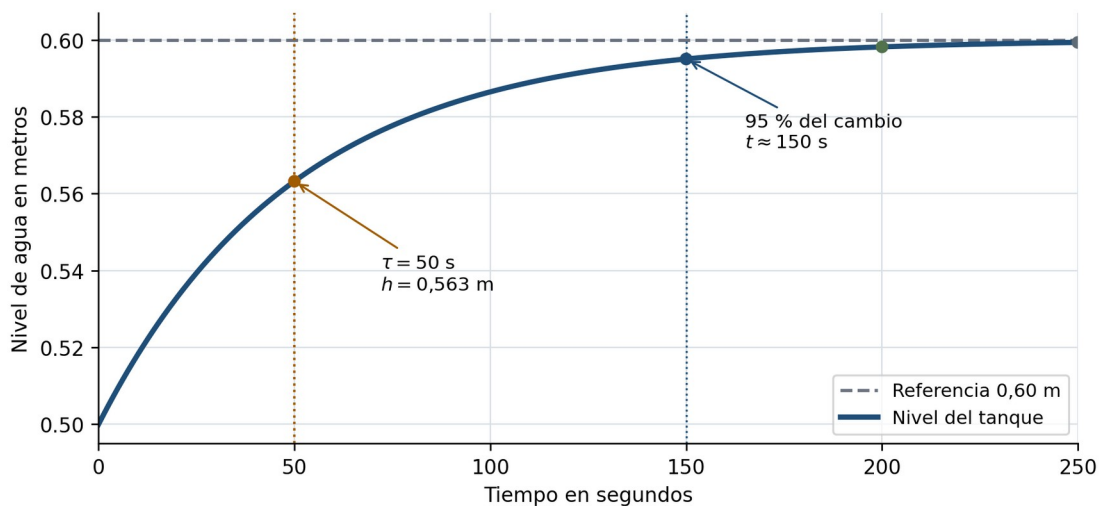


Figura 3. Respuesta teórica del nivel ante una referencia escalón de 0,50 a 0,60 m. Elaboración propia con apoyo de IA; no corresponde a datos experimentales.

El nivel tiende a 0,60 m. Después de una constante de tiempo, $t = 50$ s, alcanza 0,563 m, equivalente al 63,2 % del cambio. A los 150 s alcanza aproximadamente 0,595 m, cerca del 95 %, y a los 200 s entra en la banda de establecimiento del 2 %. La respuesta ideal no presenta sobreimpulso ni oscilación porque el modelo cerrado tiene un solo polo real negativo en $s = -0,02 \text{ s}^{-1}$. La Tabla 3 resume los valores calculados.

Tiempo	Nivel calculado	Porcentaje del cambio	Interpretación
0 s	0,500 m	0 %	Condición inicial y aplicación del escalón.
50 s	0,563 m	63,2 %	Una constante de tiempo.
150 s	0,595 m	95,0 %	Tres constantes de tiempo.
200 s	0,598 m	98,2 %	Entrada aproximada a la banda del 2 %.
250 s	0,599 m	99,3 %	Cinco constantes de tiempo.

Tabla 3. Indicadores de la respuesta temporal del sistema cerrado.

4.5 Diferencias y decisión técnica

La Tabla 4 compara las dos configuraciones. La principal diferencia es que el lazo cerrado utiliza información de la salida para reducir el error y rechazar perturbaciones dentro de sus límites de diseño.

Criterio	Lazo abierto	Lazo cerrado
Información disponible	No utiliza la medición del nivel para corregir el mando.	Compara continuamente el nivel medido con la referencia.
Respuesta a cambios de salida	Mantiene la orden aunque cambie el consumo.	Ajusta el caudal de entrada cuando aparece error.
Complejidad	Menor costo y configuración simple.	Requiere sensor, controlador, ajuste y mantenimiento.
Exactitud	Depende de que la planta conserve las condiciones previstas.	Puede reducir el error permanente y compensar perturbaciones.
Riesgo técnico	Puede producir vaciado o rebalse sin advertencia automática.	Un sensor defectuoso o una mala sintonía pueden generar decisiones incorrectas.

Tabla 4. Comparación técnica entre las configuraciones de lazo abierto y lazo cerrado.

Para un tanque cuyo nivel debe mantenerse mientras cambia el consumo, la decisión técnica es utilizar lazo cerrado. Se recomienda un transmisor continuo de nivel con rango compatible, señal de diagnóstico y una protección independiente de nivel alto. El controlador PI resulta apropiado para el caso modelado porque entrega una respuesta sin error permanente. Sin embargo, la sintonía debe confirmarse con una prueba real y deben incorporarse límites de velocidad, alarmas y estados seguros para evitar rebalse, vaciado o funcionamiento en seco de la bomba.

5 Discusión

Los resultados muestran que la representación en lazo abierto describe el recorrido de la acción física, pero no contiene información para verificar su efecto. La velocidad de la bomba puede estar correctamente ordenada y aun así el nivel desviarse por un cambio en el caudal de salida. En lazo cerrado, el sensor transforma esa desviación en información utilizable y el comparador la expresa como error. Esta diferencia justifica el uso de realimentación cuando mantener el nivel es más importante que reducir el costo inicial del sistema.

La respuesta a escalón agrega una descripción que el diagrama por sí solo no entrega. El diagrama identifica componentes y señales; la gráfica muestra cuánto tarda el sistema en acercarse a la referencia, si la salida oscila y si existe sobreimpulso. En este caso, la constante de tiempo cerrada de 50 s permite anticipar que una alarma basada en el nivel no debería evaluarse como si la respuesta fuera instantánea. También permite comparar otra sintonía o bomba usando los mismos indicadores.

El modelo tiene límites. La relación entre nivel y caudal de salida puede ser no lineal si la descarga depende de la raíz cuadrada de la altura. La bomba puede saturarse, el sensor puede tener ruido o retardo y el tanque puede no conservar un área transversal constante. La cancelación de polos utilizada para simplificar el sistema es sensible a errores de parámetros. Si estas condiciones son relevantes, la respuesta real puede presentar mayor lentitud, error, sobreimpulso u oscilación. Por eso los valores obtenidos deben entenderse como una caracterización conceptual que requiere identificación y validación experimental antes de implementarse.

Los símbolos $r(t)$, $e(t)$, $u(t)$, $y(t)$, $C(s)$, $G_p(s)$, $H(s)$ y $d(t)$ construyen un lenguaje común porque permiten que una persona de instrumentación identifique el sensor, que una persona de control revise la estrategia y que una persona de operación interprete la respuesta esperada. Esta notación reduce ambigüedades y hace posible discutir una modificación sin depender de una descripción extensa del proceso. En cuanto al uso de IA, fue útil para comprobar el álgebra y producir representaciones claras. La revisión humana fue necesaria para distinguir los supuestos de los datos reales, evitar presentar la simulación como una medición y asegurar que las decisiones técnicas no se apoyaran únicamente en una salida generada.

6 Conclusiones

El sistema analizado controla el nivel de un tanque mediante una bomba con variador, un transmisor de nivel y un controlador PI. La variable controlada es $h(t)$, la variable manipulada es $q_{in}(t)$ y la perturbación principal es $q_{out}(t)$. El balance $A \, dh/dt = q_{in} - q_{out}$ relaciona estas variables y permite obtener un modelo de primer orden.

En lazo abierto, la bomba opera a partir de un mando programado sin utilizar el nivel medido, por lo que una variación del consumo no se corrige automáticamente. En lazo cerrado, la referencia se compara con la medición y el controlador modifica el caudal para reducir el error. Esta estructura es más adecuada cuando se requiere mantener el nivel frente a perturbaciones.

Con los supuestos del caso, el sistema cerrado tiene una constante de tiempo de 50 s. Ante un escalón de 0,50 a 0,60 m, alcanza 0,563 m en 50 s, cerca de 0,595 m en 150 s y no presenta sobreimpulso. Estos valores describen el modelo ideal; la saturación, el retardo, la geometría del tanque, el ruido y los errores de parámetros pueden modificar la respuesta real.

El aporte concreto de los diagramas y la gráfica es comunicar de manera verificable qué se mide, qué se modifica, cómo circula la información y qué comportamiento se espera. Antes de implementar el control deben identificarse los parámetros con datos reales, sintonizarse el controlador y comprobarse las alarmas, los límites del actuador y los estados seguros del proceso.

Licencia. 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.

Bibliografía

- Alarcón, C. (2026a). 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>
- Alarcón, C. (2026b, 22 de septiembre). Requerimientos Informe Semana 05 [Guía de evaluación]. Universidad de La Frontera.
- Ogata, K. (2010). *Modern control engineering* (5th ed.). Prentice Hall.
- Seborg, D. E., Edgar, T. F., Mellichamp, D. A., & Doyle, F. J. (2011). *Process dynamics and control* (3rd ed.). John Wiley & Sons.