

Modelado y automatización del control de nivel de un tanque de agua mediante sistemas de lazo abierto y lazo cerrado

Sebastian Cid

Ingeniería Civil Industrial, Universidad de La Frontera, Temuco, Chile.

s.cid07@ufromail.cl

Fecha: 2026-09-24

Resumen

El control del nivel de agua es una tarea habitual en los procesos industriales que requiere mantener condiciones de operación estables frente a variaciones en los caudales de entrada y salida. El presente informe tuvo como objetivo caracterizar y comparar un sistema de control de nivel de un tanque mediante configuraciones de lazo abierto y lazo cerrado con un controlador proporcional. Para ello, se desarrolló un modelo lineal de primer orden a partir del balance de volumen, se aplicó la transformada de Laplace y se calcularon las respuestas temporales utilizando parámetros normalizados. Los resultados mostraron que, con una ganancia proporcional $K_p = 2$, la constante de tiempo disminuyó de 1 a 0,333 y, ante una perturbación de 0,3 unidades normalizadas en el caudal de salida, el error estacionario se redujo de 0,3 a 0,1. La comparación permitió identificar que la realimentación proporcional mejora la rapidez de respuesta y reduce las desviaciones del nivel, aunque no elimina completamente el error estacionario. Se concluye que el modelo desarrollado facilita el análisis de ambas configuraciones y constituye una base para estudios posteriores, siendo necesaria su validación experimental antes de aplicarlo a un sistema industrial real.

1. Introducción

El control del nivel de líquidos es una tarea frecuente en distintos procesos industriales, donde resulta necesario mantener una cantidad determinada de fluido dentro de estanques o depósitos. El nivel puede variar debido a cambios en los caudales de entrada y salida, por lo que una operación basada únicamente en ajustes manuales puede presentar dificultades cuando las condiciones del proceso cambian. La automatización permite incorporar elementos de medición y actuación capaces de responder frente a estas variaciones y mantener el sistema próximo a una condición deseada (Vásquez et al., 2015).

El comportamiento de un tanque puede representarse mediante la relación entre el caudal de entrada, el caudal de salida y la altura alcanzada por el líquido. A partir de estas variables es posible construir un modelo dinámico que permita estudiar cómo evoluciona el nivel en el tiempo y cómo responde el sistema ante modificaciones en su entrada. Para facilitar inicialmente el análisis, puede considerarse un solo tanque, cuya dinámica constituye una

base sencilla para posteriormente extender el modelo hacia configuraciones con múltiples tanques o procesos de mayor complejidad.

La representación mediante diagramas de lazo abierto y lazo cerrado permite distinguir entre un sistema que opera sin corregir automáticamente sus desviaciones y otro que utiliza la medición del nivel para modificar su comportamiento. Junto con el análisis de la respuesta temporal, estas representaciones permiten describir de manera común la estructura, las señales y la dinámica del sistema, facilitando su comprensión y posterior aplicación en sistemas automatizados de mayor complejidad (Ogata, 2010).

2. Objetivo

Caracterizar un sistema automatizado de control de nivel de agua mediante el modelado dinámico de un tanque, su representación en lazo abierto y lazo cerrado y el análisis de su respuesta temporal, considerando una posterior extensión del modelo hacia sistemas de mayor complejidad.

3. Metodología

Para caracterizar el sistema se consideró inicialmente un único tanque de agua de sección transversal constante, con un caudal de entrada regulable y un caudal de salida. Esta simplificación permitió representar la relación entre las variables principales del proceso antes de extender el análisis hacia configuraciones de mayor complejidad. Se definió la altura del agua $h(t)$ como variable de salida y el caudal de entrada $q_i(t)$ como variable manipulada.

El modelo dinámico se construyó a partir de un balance de volumen, considerando que la variación del volumen almacenado corresponde a la diferencia entre los caudales de entrada y salida. Para obtener una representación lineal de primer orden, se consideró una relación proporcional entre la altura del agua y el caudal de descarga. A partir de esta aproximación se formuló una ecuación diferencial y posteriormente se aplicó la transformada de Laplace, considerando una condición inicial nula, para obtener la función de transferencia del tanque (Zill, 2018).

Para facilitar el análisis se utilizaron los parámetros normalizados $A = 1$ y $k = 1$, donde A representa el área transversal del tanque y k relaciona la altura con el caudal de salida. Estos valores se seleccionaron para simplificar los cálculos y comparar el comportamiento de ambas configuraciones de control, sin representar las características físicas de un tanque industrial específico.

A partir del modelo obtenido se construyeron los diagramas de lazo abierto y lazo cerrado. En la primera configuración se consideró un caudal de entrada fijo, mientras que en la segunda se incorporaron una referencia de nivel, un sensor ideal, un comparador y un controlador proporcional con ganancia normalizada $K_p = 2$. Se consideró además una válvula ideal y un caudal base que permite mantener el nivel deseado en condiciones nominales. La ganancia

seleccionada se utilizó para analizar el efecto de la realimentación sobre la respuesta del sistema.

Posteriormente, se calcularon las respuestas temporales de ambas configuraciones ante una entrada escalón, utilizando sus respectivas funciones de transferencia. Se consideraron la rapidez de respuesta, la constante de tiempo y el valor estacionario. Además, se incorporó una perturbación equivalente a un aumento de 0,3 unidades normalizadas en el caudal de salida, aplicada en $t = 5$, para comparar la capacidad de ambas configuraciones de mantener el nivel deseado y determinar sus respectivos errores estacionarios.

Finalmente, se representaron gráficamente las respuestas obtenidas y se compararon sus características dinámicas. Los resultados corresponden a modelos teóricos simplificados, por lo que su aplicación a un sistema industrial requeriría identificar los parámetros reales y validar el comportamiento mediante simulaciones o pruebas experimentales.

Uso de IA

La inteligencia artificial generativa fue utilizada como herramienta de apoyo para organizar la estructura del análisis, desarrollar expresiones matemáticas, obtener las respuestas temporales, elaborar las representaciones gráficas y apoyar la redacción del informe. La conceptualización del sistema, la elección de trabajar inicialmente con un único tanque, la metodología general y la validación del contenido fueron mantenidas bajo responsabilidad humana. Las propuestas generadas mediante inteligencia artificial fueron revisadas antes de incorporarse al documento.

Declaración de contribuciones según el marco Ciencia Generativa (Alarcón, 2026)

Sebastian Cid (Humano): Conceptualización, Metodología, Validación, Investigación, Análisis formal, Visualización , Revisión y edición.

GPT-5.6 Sol (IA): Investigación, Análisis formal, Visualización , Redacción del borrador original y Revisión y edición.

4. Resultados

Modelo dinámico del tanque

Para caracterizar el sistema se consideró inicialmente un único tanque de sección transversal constante. La variable de interés corresponde a la altura del agua $h(t)$, mientras que el caudal de entrada $q_i(t)$ constituye la variable manipulada. El comportamiento del nivel se obtuvo mediante un balance de volumen, considerando que la variación del volumen almacenado depende de la diferencia entre los caudales de entrada y salida (Vásquez et al., 2015):

$$A \frac{dh(t)}{dt} = q_i(t) - q_o(t)$$

donde A corresponde al área transversal del tanque y $q_o(t)$ al caudal de salida. Para obtener un modelo lineal de primer orden se utilizó la aproximación:

$$q_o(t) = kh(t)$$

Por lo tanto, el balance queda expresado como:

$$A \frac{dh(t)}{dt} + kh(t) = q_i(t)$$

Esta aproximación permite establecer una relación directa entre el caudal de entrada y el nivel del tanque. En el modelo físico de descarga mediante un orificio, el caudal depende normalmente de $\sqrt{h}$; por ello, la expresión $q_o = kh$ corresponde a una simplificación lineal utilizada para facilitar el análisis del sistema.

Aplicando la transformada de Laplace y considerando una condición inicial nula, $h(0) = 0$, se obtiene (Zill, 2018):

$$AsH(s) + kH(s) = Q_i(s)$$

Agrupando los términos:

$$(As + k)H(s) = Q_i(s)$$

De esta forma, la función de transferencia entre el caudal de entrada y la altura del agua corresponde a:

$$G(s) = \frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{1}{As+k}$$

El resultado corresponde a un sistema de primer orden y permite analizar cómo cambia la altura ante modificaciones del caudal de entrada. Este mismo desarrollo del balance, la aproximación lineal y la función de transferencia fue utilizado previamente para caracterizar el tanque (Ogata, 2010).

Sistema de control en lazo abierto

En la configuración de lazo abierto, la válvula de entrada se ajusta para proporcionar un determinado caudal y posteriormente se deja operar el sistema sin utilizar la medición de altura para realizar correcciones automáticas (Ogata, 2010). La Figura 1 presenta el diagrama de bloques correspondiente a esta configuración.

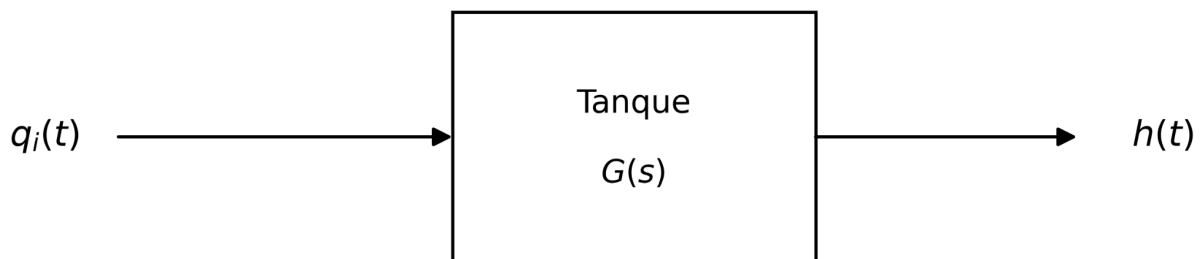


Figura 1. Diagrama de bloques del sistema de control de nivel en lazo abierto. Fuente: elaboración propia.

En esta configuración, $q_i(t)$ representa la entrada al proceso y $h(t)$ la salida. La principal característica es la ausencia de realimentación. Por esta razón, si ocurre una perturbación, como una variación del caudal de salida o de la presión que alimenta la válvula, el nivel puede desviarse del valor esperado sin que el sistema modifique automáticamente su funcionamiento.

Una apertura fija de la válvula no constituye un sistema en lazo cerrado, ya que no utiliza la medición del nivel para corregir automáticamente el caudal de entrada.

Sistema de control en lazo cerrado

Para automatizar el control del nivel se incorpora una medición de la altura del agua. Se establece una referencia $r(t)$, correspondiente al nivel deseado, que se compara con el nivel medido $y(t)$. La diferencia entre ambas señales constituye el error:

$$e(t) = r(t) - y(t)$$

Este error es utilizado por un controlador $C(s)$, que genera una acción sobre el actuador encargado de modificar la apertura de la válvula y, por consiguiente, el caudal de entrada. La Figura 2 presenta la configuración del sistema con realimentación.

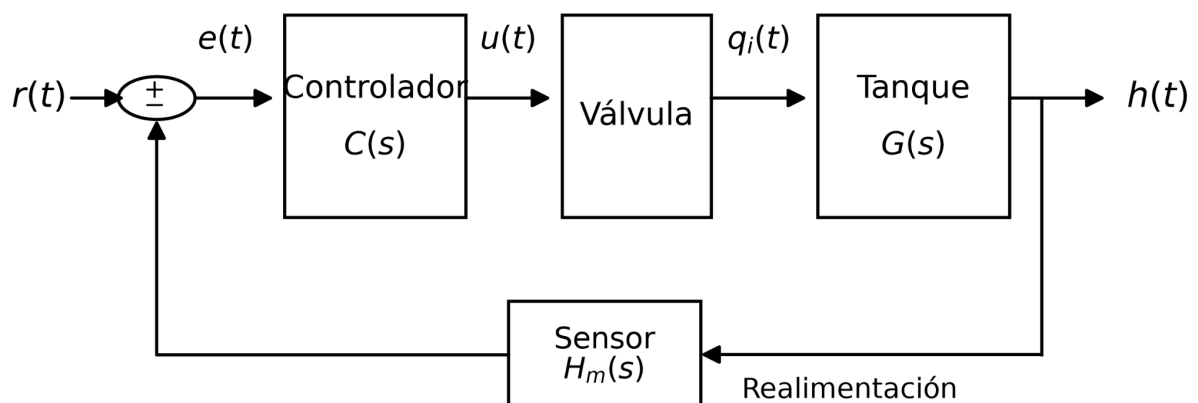


Figura 2. Diagrama de bloques del sistema de control de nivel en lazo cerrado. Fuente: elaboración propia.

En el diagrama, $h(t)$ representa la altura real del agua, mientras que $y(t)$ corresponde a la señal medida por el sensor, que se devuelve al comparador para calcular el error respecto de la referencia. Esta realimentación permite al controlador ajustar la apertura de la válvula y corregir las desviaciones del nivel deseado.

Cuando la altura medida es menor que la referencia, se genera un error que permite al controlador aumentar la acción sobre la entrada. A medida que el tanque se aproxima al nivel deseado, el error disminuye. Del mismo modo, una variación del caudal de salida puede producir inicialmente una desviación del nivel, que posteriormente puede ser detectada y corregida mediante la realimentación. La estructura utilizada coincide con los elementos solicitados para la representación de un lazo cerrado: referencia, comparador, error, controlador, planta, medición y salida.

Análisis del sistema con controlador proporcional

Para analizar cuantitativamente el comportamiento del tanque en lazo cerrado, se incorporó un controlador proporcional de ganancia K_p . Su función consiste en modificar el caudal de entrada en función del error entre la referencia y el nivel medido:

$$\begin{aligned}e(t) &= r(t) - y(t) \\ u(t) &= K_p e(t)\end{aligned}$$

Se consideró un sensor ideal, de modo que $y(t) = h(t)$, y una válvula capaz de ajustar el caudal de entrada sin retardos ni limitaciones. Además, se estableció un caudal base q_b , al que se suma la corrección realizada por el controlador:

$$q_i(t) = q_b + K_p[r(t) - h(t)]$$

Al sustituir esta expresión en el balance de volumen del tanque, se obtiene:

$$A \frac{dh(t)}{dt} + (k + K_p)h(t) = q_b + K_p r(t)$$

Aplicando la transformada de Laplace, con condición inicial nula, y considerando un caudal base constante, la función de transferencia entre las variaciones de la referencia y la altura corresponde a:

$$G_{LC}(s) = \frac{K_p}{As + k + K_p}$$

Esta expresión permite identificar cómo la ganancia proporcional modifica la dinámica del sistema. Sin embargo, para calcular la respuesta completa también debe considerarse el aporte del caudal base.

Cálculo de la respuesta temporal

Para el análisis se utilizaron los parámetros normalizados establecidos en la metodología:

$$A = 1, \quad k = 1, \quad K_p = 2$$

Se definió una referencia de nivel $r(t) = 1$ y un caudal base $q_b = 1$. Con estos valores, la acción de control corresponde a:

$$q_i(t) = 1 + 2[1 - h(t)]$$

Sustituyendo en el balance de volumen:

$$\frac{dh(t)}{dt} + h(t) = 1 + 2[1 - h(t)]$$

Agrupando los términos:

$$\frac{dh(t)}{dt} + 3h(t) = 3$$

Aplicando la transformada de Laplace, considerando $h(0) = 0$:

$$(s + 3)H(s) = \frac{3}{s}$$

$$H(s) = \frac{3}{s(s+3)}$$

Mediante fracciones parciales:

$$H(s) = \frac{1}{s} - \frac{1}{s+3}$$

Finalmente, al aplicar la transformada inversa de Laplace, se obtiene:

$$h_{LC}(t) = 1 - e^{-3t}$$

La respuesta presenta un aumento progresivo del nivel hasta aproximarse a la referencia establecida. Su constante de tiempo normalizada es:

$$\tau_{LC} = \frac{A}{k+K_p} = \frac{1}{3}$$

En comparación, el sistema en lazo abierto presenta una constante de tiempo normalizada igual a 1. Por tanto, bajo los supuestos seleccionados, el sistema con controlador proporcional presenta una respuesta más rápida.

Respuesta ante una perturbación

Para evaluar la capacidad de corrección del controlador, se consideró una perturbación $d(t)$ equivalente a un aumento del caudal de salida de 0,3 unidades normalizadas, aplicada a partir de $t = 5$.

El balance del sistema realimentado queda expresado como:

$$A \frac{dh(t)}{dt} + (k + K_p)h(t) = q_b + K_p r(t) - d(t)$$

En estado estacionario, la derivada de la altura es igual a cero. Sustituyendo los parámetros definidos:

$$3h(\infty) = 1 + 2 - 0,3$$

$$h_{LC} = 0,9$$

Por lo tanto, el error estacionario respecto de la referencia unitaria corresponde a:

$$e_{LC}(\infty) = 1 - 0,9 = 0,1$$

En el sistema de lazo abierto, con un caudal de entrada fijo de 1, la misma perturbación produce un nivel estacionario de 0,7 y un error de 0,3.

Estos resultados indican que el controlador proporcional reduce la desviación provocada por la perturbación, aunque no elimina completamente el error estacionario. La comparación corresponde a un modelo teórico normalizado y debe validarse antes de trasladar sus resultados a un tanque industrial.

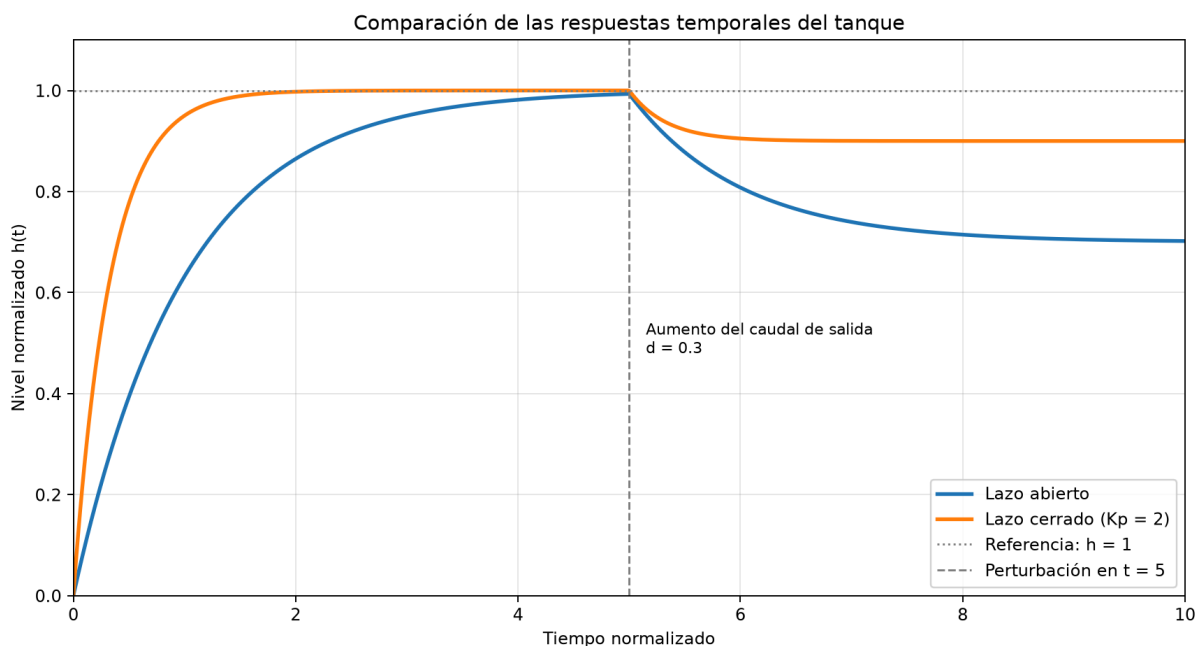


Figura 3. Comparación de las respuestas temporales normalizadas del nivel del tanque en lazo abierto y lazo cerrado con controlador proporcional ($K_p = 2$), ante una perturbación de 0,3 unidades normalizadas en el caudal de salida aplicada en $t = 5$. Fuente: elaboración propia a partir del modelo matemático desarrollado.

Análisis comparativo de las respuestas temporales

La Figura 3 muestra que ambas configuraciones parten de una altura inicial nula y se aproximan al nivel de referencia $h = 1$. Sin embargo, el sistema en lazo cerrado presenta una respuesta más rápida debido a la incorporación del controlador proporcional. Su constante de tiempo normalizada es de 0,333, mientras que la del sistema en lazo abierto es de 1.

Al introducir una perturbación equivalente a un aumento de 0,3 unidades normalizadas en el caudal de salida, en $t = 5$, ambas configuraciones experimentan una disminución del nivel.

El sistema en lazo abierto converge a un nuevo nivel estacionario de 0,7, mientras que el sistema en lazo cerrado alcanza 0,9.

De esta manera, los errores estacionarios respecto de la referencia son:

$$e_{LA} = 1 - 0,7 = 0,3$$

$$e_{LC} = 1 - 0,9 = 0,1$$

Los resultados muestran que, bajo los parámetros normalizados seleccionados, el controlador proporcional permite reducir el error estacionario provocado por la perturbación y aumentar la rapidez de respuesta. Sin embargo, no elimina completamente la desviación respecto del nivel deseado. Estos resultados corresponden a un modelo teórico simplificado y requieren validación antes de aplicarse a un sistema real.

Extensión hacia un sistema de múltiples tanques

El modelo desarrollado para un único tanque permite explicar de forma directa la relación entre entrada, salida y nivel antes de aumentar la complejidad del sistema. A partir de esta representación es posible extender el análisis hacia dos tanques conectados en cascada.

En ese caso, el caudal de salida del primer tanque pasa a constituir una entrada para el segundo, por lo que deben formularse balances dinámicos para ambos depósitos. El principio de modelado se mantiene, pero aparecen variables de nivel adicionales y relaciones entre los caudales de ambos tanques (Vásquez et al., 2015).

Por esta razón, el sistema de un tanque constituye una base sencilla para explicar el modelo, la función de transferencia y los conceptos de lazo abierto y cerrado antes de extender la representación a sistemas de mayor complejidad.

5. Discusión

La comparación entre los sistemas de lazo abierto y lazo cerrado permitió analizar el efecto de la realimentación sobre el control del nivel de agua. En la configuración de lazo abierto, el caudal de entrada permanece fijo y no existe un mecanismo para corregir automáticamente las desviaciones. En cambio, el controlador proporcional utiliza la medición del nivel para modificar el caudal de entrada según el error respecto de la referencia, lo que permite compensar parcialmente las perturbaciones del proceso (Bermeo Varon et al., 2021).

Los resultados obtenidos muestran que el sistema en lazo cerrado presenta una respuesta más rápida bajo los parámetros normalizados seleccionados. La constante de tiempo disminuye de 1 en lazo abierto a 0,333 en lazo cerrado, debido a la incorporación del controlador proporcional con $K_p = 2$. Ambas configuraciones se aproximan inicialmente al nivel de referencia unitario, considerando que el sistema realimentado dispone de un caudal base correctamente ajustado.

La selección de la ganancia proporcional también debe considerar la capacidad del actuador. Para el ejemplo desarrollado, cuando el tanque está inicialmente vacío, el controlador con $K_p = 2$ solicita un caudal de entrada normalizado de 3, superior al caudal base de 1. Esto permite aumentar la rapidez de llenado, pero exige que la válvula pueda proporcionar dicho caudal. Si el actuador alcanza su límite de operación, la respuesta real podría diferir de la calculada. Por ello, la elección de la ganancia debe considerar tanto la rapidez deseada como las restricciones físicas del sistema.

Ante una perturbación de 0,3 unidades normalizadas en el caudal de salida, aplicada en $t = 5$, el nivel del sistema en lazo abierto tiende a 0,7, mientras que el sistema en lazo cerrado se estabiliza en 0,9. Esto representa errores estacionarios de 0,3 y 0,1, respectivamente. Por lo tanto, la realimentación proporcional reduce la desviación del nivel provocada por la perturbación, aunque no la elimina completamente. La eliminación del error estacionario ante perturbaciones sostenidas requeriría evaluar otras estrategias, como la incorporación de acción integral.

Una limitación del análisis corresponde a la utilización de un modelo lineal que aproxima el caudal de salida mediante $q_o(t) = kh(t)$. En un tanque con descarga por un orificio, el caudal depende de la raíz cuadrada de la altura, por lo que el comportamiento real puede diferir del modelo simplificado (Ogata, 2010; Vásquez et al., 2015). Además, se consideraron un sensor y una válvula ideales, sin retardos ni limitaciones de operación. Por esta razón, los resultados constituyen una comparación teórica y sería necesario identificar los parámetros reales del tanque y validar las respuestas mediante simulaciones más detalladas o pruebas experimentales antes de implementar el sistema.

Los diagramas de bloques y las respuestas temporales también permiten comunicar el funcionamiento del sistema mediante un lenguaje técnico común. La identificación de la referencia, el error, el controlador, el actuador y las señales de medición facilita que diferentes personas interpreten de manera consistente la estrategia de control. Asimismo, la Figura 3 permite comparar cuantitativamente ambas configuraciones y comunicar cómo la realimentación modifica la rapidez de respuesta y el comportamiento ante perturbaciones. Estas representaciones permiten relacionar el análisis matemático con decisiones de diseño y operación.

5.1 Valoración del uso de IA

La inteligencia artificial generativa fue utilizada como apoyo para desarrollar el modelo matemático, incorporar el controlador proporcional, obtener las respuestas temporales y elaborar el código de Python utilizado para representar gráficamente ambas configuraciones. Su utilización permitió comparar las constantes de tiempo y los errores estacionarios ante una perturbación del caudal de salida. Sin embargo, fue necesario revisar las ecuaciones, verificar la coherencia de la gráfica y distinguir entre las simplificaciones matemáticas y el comportamiento físico del tanque. La IA facilitó el desarrollo del análisis, mientras que la

selección de los supuestos, la interpretación de los resultados y la validación del contenido permanecieron bajo responsabilidad humana.

6. Conclusiones

El modelado de un tanque de agua permitió caracterizar la relación entre el caudal de entrada y la altura del líquido mediante una función de transferencia de primer orden. A partir de este modelo se obtuvieron las respuestas temporales de las configuraciones de lazo abierto y lazo cerrado con un controlador proporcional.

La comparación de ambas configuraciones mostró que, bajo los parámetros normalizados seleccionados, el controlador proporcional permite reducir la constante de tiempo de 1 a 0,333. Asimismo, frente a una perturbación de 0,3 unidades normalizadas, el error estacionario disminuyó de 0,3 en lazo abierto a 0,1 en lazo cerrado. Estos resultados permiten identificar el efecto de la realimentación sobre la rapidez de respuesta y la reducción de las desviaciones del nivel.

Finalmente, el desarrollo matemático y la representación gráfica facilitaron la comprensión del funcionamiento de ambas configuraciones. No obstante, los resultados corresponden a un modelo teórico simplificado, por lo que una implementación industrial requeriría identificar los parámetros físicos del tanque y validar el comportamiento del controlador mediante simulaciones o pruebas experimentales.

7. Declaraciones

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.

Responsabilidad de autoría

La persona autora conserva la responsabilidad por las decisiones técnicas, la interpretación y la versión final del informe.

8. 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>
- Berneio Varon, L. A., Alvarez, J. G., & Mantilla Arenas, W. (2021). Comparación del desempeño de un controlador PID sobre el proceso de nivel usando un controlador lógico programable y un sistema embebido. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 29(4), 622-632. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052021000400622>
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna* (5.^a ed.). Pearson Educación.
- Vásquez, R. E., Posada, N. L., & Castrillón, F. (2015). Desarrollo de una estación experimental multipropósito para la enseñanza en control de procesos. *Formación Universitaria*, 8(5), 25-34. <https://doi.org/10.4067/S0718-50062015000500004>
- Zill, D. G. (2018). *Ecuaciones diferenciales con aplicaciones de modelado* (11.^a ed.). Cengage Learning.