

Caracterización de un Sistema de Control de Nivel: Diagramas de Lazo Abierto, Lazo Cerrado y Respuesta a Escalón

Diego Ignacio Poveda Crisosto

2026-09-23

Resumen

Este informe caracteriza un sistema de control de nivel de un estanque mediante diagramas de bloques en lazo abierto y en lazo cerrado, y mediante una gráfica de respuesta a escalón, con el propósito de practicar un lenguaje técnico común para describir sistemas de control. El sistema analizado corresponde a un estanque con entrada de caudal regulada por una válvula proporcional y salida por gravedad, sometido a una perturbación de consumo aguas abajo. Para obtener la respuesta temporal se construyó un modelo simplificado de balance de masa, de primer orden, y se simuló numéricamente mediante integración de Euler explícita, comparando el caso sin control frente al caso con un controlador proporcional integral. Los resultados muestran que, en lazo abierto, la perturbación introducida modifica el nivel de forma permanente porque no existe ningún mecanismo que la detecte ni la corrija, mientras que en lazo cerrado el mismo estanque recupera su nivel de referencia con un error de estado estacionario menor al uno por ciento tras la perturbación. Se contrastó además esa sintonía frente a una alternativa más agresiva, que reduce el tiempo de asentamiento de 47,97 a 3,92 minutos a costa de exigir un caudal máximo de válvula dieciséis veces mayor al caudal de régimen, y se verificó la sensibilidad de la constante de tiempo de planta ante un error de veinticinco por ciento en los parámetros asumidos. La discusión interpreta esta diferencia como consecuencia directa de la realimentación y del controlador, relaciona la elección de sintonía con la capacidad real de un actuador industrial, y relaciona la caracterización obtenida con una definición de la literatura de control para fundamentar los conceptos utilizados. Se concluye que los diagramas, la gráfica de respuesta y el contraste cuantitativo de alternativas, en conjunto, permiten comunicar de forma precisa el comportamiento de un sistema de control sin ambigüedad, aportando un lenguaje técnico común útil más allá del caso particular analizado. Este informe se distribuye bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

1. Introducción

La automatización de procesos productivos requiere describir un sistema de control con un lenguaje técnico preciso y compartido, de modo que distintas personas puedan entender de la misma forma qué variable se controla, cómo se actúa sobre el sistema y qué diferencia existe entre operar sin corrección y operar con realimentación. Los diagramas de bloques y las gráficas de respuesta temporal son las herramientas estándar para lograr esa comunicación, porque resumen en una representación visual la relación entre entrada, planta, controlador, sensor y salida.

El presente informe busca ampliar, desde una postura personal y fundamentada, los contenidos entregados en la clase teórica correspondiente a la Semana 05 del curso de Automatización, cuya pauta permite seleccionar libremente un sistema técnico de interés para caracterizarlo mediante diagramas de lazo abierto, lazo cerrado y una gráfica de respuesta a escalón o impulso. El sistema seleccionado es un estanque de nivel con entrada de caudal regulada por una válvula proporcional, descrito como una simplificación razonada de un proceso de control de nivel habitual en plantas industriales, con sus supuestos declarados explícitamente en la metodología. Para ello se abordan cuatro preguntas: cómo se caracteriza el sistema y sus variables, qué información falta en un esquema de lazo abierto, qué cambia al incorporar realimentación en lazo cerrado, y qué aporta una gráfica de respuesta temporal a la comunicación técnica del comportamiento del sistema.

2. Objetivo

Caracterizar un sistema de control de nivel de un estanque mediante diagramas de bloques en lazo abierto y en lazo cerrado y mediante una gráfica de respuesta a escalón, con el propósito de practicar un lenguaje técnico común que permita describir sin ambigüedad la diferencia entre operar sin corrección y operar con realimentación. El informe se limita a un modelo simplificado de balance de masa de primer orden, obtenido mediante simulación numérica con parámetros declarados como supuestos razonados, sin considerar mediciones de un sistema físico real ni un diseño optimizado del controlador.

3. Metodología

Para elaborar este informe se siguieron cinco pasos secuenciales: selección libre de un estanque de nivel con entrada regulada por válvula proporcional como sistema de interés, de acuerdo con el ejemplo sugerido en la propia pauta de la actividad, y declaración explícita de que se trata de una simplificación razonada y no de la medición de un equipo físico específico, definición del modelo de balance de masa de primer orden que describe la dinámica del nivel, con los parámetros de área transversal del estanque y de resistencia hidráulica de la válvula de salida declarados como supuestos, construcción de los diagramas de bloques en lazo abierto y en lazo cerrado, identificando en cada uno la variable controlada, la variable manipulada, el actuador, el sensor y la perturbación, con la notación $r(t)$, $e(t)$, $u(t)$, $y(t)$, $d(t)$, $C(s)$, $G(s)$ y $H(s)$ sugerida en la pauta de la actividad, obtención de la respuesta a escalón mediante simulación numérica del modelo, integrando la ecuación diferencial con el método de Euler explícito y un paso de tiempo de 0,01 minutos, comparando el caso en lazo abierto sin control frente al caso en lazo cerrado con un controlador proporcional integral, ambos sometidos a la misma perturbación de consumo aguas abajo, y redacción y revisión final del contenido, incluyendo la verificación de que las cifras reportadas en el texto correspondieran exactamente a la salida numérica de la simulación. Para transparentar qué parte de este proceso corresponde a mi aporte y cuál al apoyo de un sistema de IA generativa, se utilizó como método de declaración el marco Ciencia Generativa (Alarcón, 2026), según se detalla en la siguiente subsección.

3.1. Uso de IA

Se utilizó IA generativa durante la elaboración de este informe. El marco Ciencia Generativa (Alarcón, 2026) distingue entre roles centrales (Conceptualización, Metodología y Validación), que deben mantenerse bajo responsabilidad exclusivamente humana, y roles de apoyo (como Investigación, Análisis formal, Redacción del borrador original, Revisión y edición o Visualización), que pueden desarrollarse en colaboración con un sistema de IA. Siguiendo este marco, se delimitó desde el inicio que la selección del sistema a caracterizar, la definición de los parámetros del modelo y la validación final del contenido permanecerían bajo mi responsabilidad exclusiva, mientras que la IA apoyaría la construcción de los diagramas, la programación de la simulación numérica y el formato del documento.

El modelo utilizado fue Claude Sonnet 5, a través de la plataforma Claude (Cwork).

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

Diego Ignacio Poveda Crisosto (Humano): Conceptualización, Metodología, Validación.

Claude Sonnet 5 (IA), plataforma Claude (Cwork): Investigación, Análisis formal, Redacción del borrador original, Revisión y edición, Visualización.

Evaluación de la IA sobre la distribución de roles: se le pidió a Claude Sonnet 5 evaluar, en base al registro completo de la interacción sostenida durante la elaboración del informe, si la distribución de roles descrita correspondía al aporte real de cada parte. La IA confirmó que la elección del estanque de nivel como sistema a caracterizar, la definición de los valores de área transversal, resistencia hidráulica y ganancias del controlador, y la validación final del contenido fueron definidas y aprobadas por mí en cada etapa, mientras que su propia participación se limitó a construir los diagramas de bloques, programar la simulación numérica y las figuras, y dar formato al documento en Word, sin haber intervenido en la elección del sistema ni en la postura personal expresada en la discusión. La IA no reportó discrepancias entre esta descripción y el proceso efectivamente seguido, por lo que la distribución de roles indicada no se basa únicamente en mi propio criterio, sino que fue contrastada con la evaluación del sistema con el que interactué.

4. Resultados

4.1. Caracterización del sistema

El sistema analizado es un estanque de nivel de sección transversal constante, alimentado por una válvula proporcional que regula el caudal de entrada y con una salida por gravedad hacia un proceso aguas abajo. La variable controlada es el nivel del estanque, $h(t)$, medido en metros. La variable manipulada es el caudal de entrada, $q_{in}(t)$, medido en metros cúbicos por minuto, cuyo valor lo determina la apertura de la válvula. El actuador es la propia válvula proporcional, que convierte una señal de consigna en un caudal de entrada. El sensor es un medidor de nivel continuo que entrega la medición realimentada del estanque. La perturbación relevante, $d(t)$, es un aumento del consumo de un proceso aguas abajo, que incrementa la salida de caudal del estanque sin que la

válvula de entrada lo anticipe. Como simplificación razonada, se modeló la dinámica del nivel mediante un balance de masa de primer orden, $A \frac{dh}{dt} = q_{in}(t) - h(t)/R - q_{pert}(t)$, donde A es la sección transversal del estanque y R es la resistencia hidráulica linealizada de la salida por gravedad. Se asumieron los valores $A = 4$ metros cuadrados y $R = 2$ minutos por metro cuadrado, lo que da una constante de tiempo de planta de $\tau = A \cdot R = 8,0$ minutos. Estos valores no provienen de un equipo físico medido, sino que se declaran como supuestos razonados para obtener una dinámica de primer orden con un tiempo de respuesta comparable al de un estanque industrial de tamaño medio.

4.2. Diagrama de lazo abierto

La Figura 1 presenta el diagrama de bloques del sistema en lazo abierto. La consigna $u(t)$ fija directamente la apertura de la válvula, que actúa como actuador y entrega el caudal de entrada $q_{in}(t)$ a la planta $G(s)$, el estanque de nivel, cuya salida es $y(t) = h(t)$. La perturbación $d(t)$, el consumo aguas abajo, ingresa directamente a la planta.

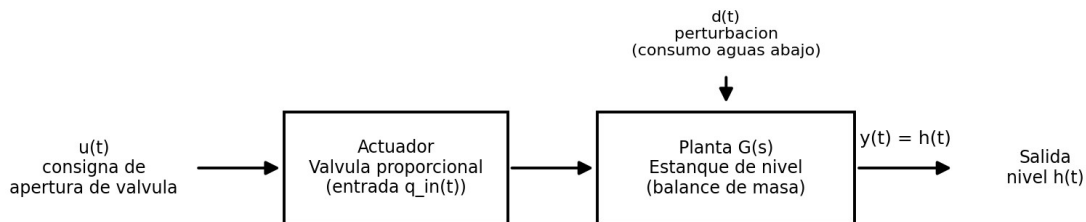


Figura 1. Diagrama de bloques del sistema en lazo abierto.

En este esquema no existe ninguna medición del nivel real del estanque ni una comparación entre lo que ocurre y lo que se desea que ocurra. En consecuencia, si se produce la perturbación $d(t)$, la válvula sigue entregando el mismo caudal de entrada que antes, porque no recibe ninguna información sobre el efecto de la perturbación en la salida, y el sistema carece de cualquier posibilidad de corrección automática.

4.3. Diagrama de lazo cerrado

La Figura 2 presenta el diagrama de control del mismo estanque en lazo cerrado. El nivel de referencia $r(t)$ se compara en un sumador con la medición realimentada del nivel,

generando la señal de error $e(t)$. El controlador $C(s)$, de tipo proporcional integral, procesa el error y genera la señal de control $u(t)$, que ingresa al actuador, la válvula proporcional, para producir el caudal de entrada $q_{in}(t)$ que recibe la planta $G(s)$. La salida $y(t) = h(t)$ se mide mediante el sensor de nivel $H(s)$, cuya medición se realimenta al sumador de comparación. La perturbación $d(t)$ ingresa directamente a la planta, igual que en el caso de lazo abierto.

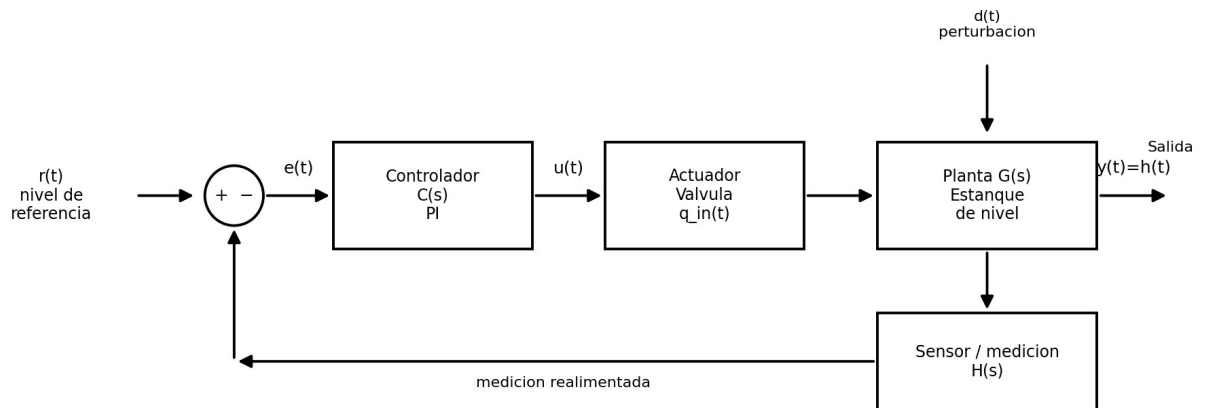


Figura 2. Diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado, con controlador PI y realimentación.

A diferencia del lazo abierto, en este esquema la medición realimentada permite que el controlador detecte cualquier desviación entre el nivel real y la referencia, incluida la generada por la perturbación, y ajuste continuamente la señal de control para corregirla.

4.4. Respuesta a escalón

La gráfica de respuesta a escalón de la Figura 3 proviene de una simulación numérica del modelo descrito en la sección 4.1, integrado mediante el método de Euler explícito con un paso de tiempo de 0,01 minutos. El eje horizontal representa el tiempo t en minutos, entre 0 y 140 minutos, y el eje vertical representa el nivel del estanque $h(t)$ en metros. La condición inicial es un estanque vacío, $h(0) = 0$ metros. En el caso de lazo abierto, se aplicó como entrada un escalón de caudal fijo en $q_{in} = 1,0$ metro cúbico por minuto desde $t = 0$, sin ningún control. En el caso de lazo cerrado, se fijó una referencia constante $r = 2,0$ metros desde $t = 0$, con un controlador proporcional integral de

ganancias $K_p = 3,0$ y $K_i = 0,12$, y con la señal de control saturada para que la válvula no entregue un caudal negativo. En ambos casos se aplicó la misma perturbación, un incremento del consumo aguas abajo de $0,3$ metros cúbicos por minuto, introducido como escalón en $t = 70$ minutos.

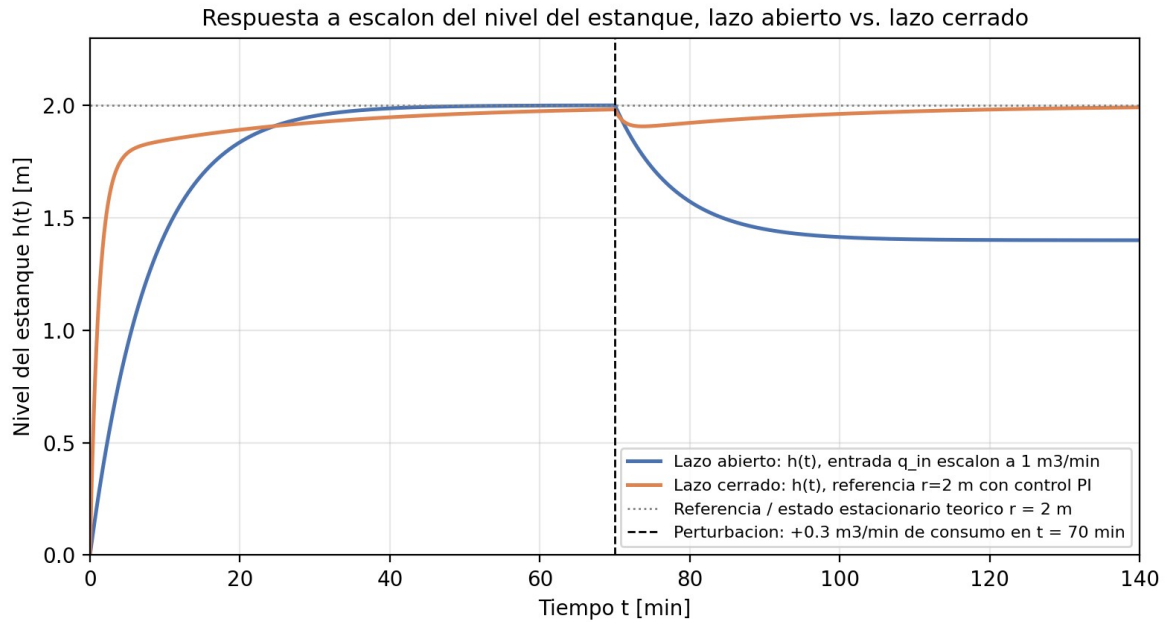


Figura 3. Respuesta a escalón del nivel del estanque, lazo abierto versus lazo cerrado, con perturbación de consumo en $t = 70$ minutos.

En lazo abierto, el nivel converge de forma natural hacia un valor de estado estacionario de $2,000$ metros antes de la perturbación, con un tiempo de asentamiento al dos por ciento de $31,28$ minutos, coherente con la constante de tiempo de planta de $8,0$ minutos. Al introducirse la perturbación en $t = 70$ minutos, el nivel cae de forma permanente hasta $1,400$ metros al final de la simulación, una caída de $0,600$ metros que no se corrige en ningún momento porque no existe realimentación. En lazo cerrado, el nivel alcanza la referencia de $2,0$ metros sin sobreimpulso, con un tiempo de asentamiento al dos por ciento de $47,97$ minutos, un valor mayor que en lazo abierto porque la acción integral del controlador introduce una dinámica adicional respecto de la respuesta natural de la planta. Al introducirse la misma perturbación en $t = 70$ minutos, el controlador la detecta a través de la medición realimentada y ajusta el caudal de entrada, de modo que el nivel

se recupera hasta 1,991 metros al final de la simulación, un error de estado estacionario de solo 0,0091 metros, equivalente a menos de un uno por ciento de la referencia.

4.5. Contraste de sintonías del controlador y verificación de los supuestos

Para no limitar el análisis a una sola sintonía del controlador, se simuló además una segunda configuración PI más agresiva, con $K_p = 8,0$ y $K_i = 0,6$, manteniendo el mismo modelo de planta y la misma perturbación. La Figura 4 y la Tabla 1 comparan ambas sintonías.

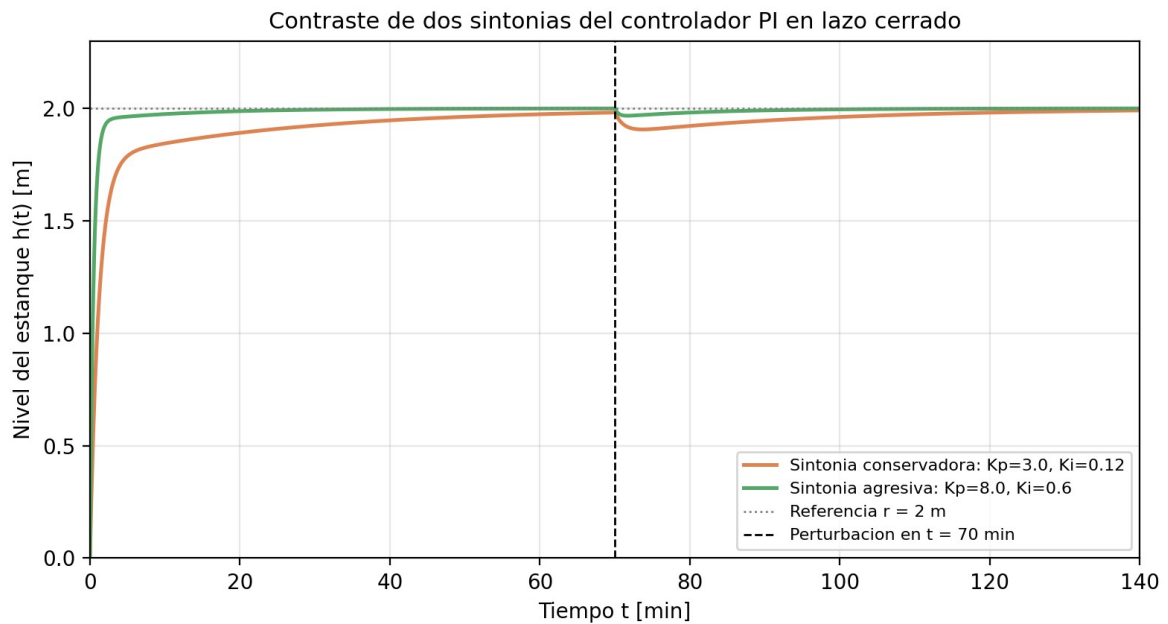


Figura 4. Contraste de dos sintonías del controlador PI en lazo cerrado.

Sintonía	Tiempo de asentamiento (2%)	Error final tras perturbación	Caudal máximo requerido
Conservadora ($K_p=3,0$, $K_i=0,12$)	47,97 min	0,0091 m	6,0 m ³ /min (6,0 veces el caudal de régimen)
Agresiva ($K_p=8,0$, $K_i=0,6$)	3,92 min	0,0002 m	16,0 m ³ /min (16,0 veces el caudal de régimen)

Tabla 1. Comparación cuantitativa de dos sintonías del controlador PI, para un caudal de régimen de 1,0 m³/min.

La sintonía agresiva reduce el tiempo de asentamiento de 47,97 a 3,92 minutos y el error final tras la perturbación de 0,0091 a 0,0002 metros, lo que en principio la haría preferible. Sin embargo, alcanzar esa velocidad exige que la válvula entregue un caudal máximo de 16,0 metros cúbicos por minuto, dieciséis veces el caudal de régimen de 1,0 metro cúbico por minuto, frente a solo seis veces en la sintonía conservadora. Como verificación adicional de los supuestos del modelo, se evaluó también la sensibilidad de la constante de tiempo de planta ante un error de veinticinco por ciento en los parámetros asumidos de área transversal y de resistencia hidráulica, obteniéndose un rango de 6,0 a 10,0 minutos en torno al valor base de 8,0 minutos, lo que indica que la dinámica simulada no depende de forma crítica del valor exacto asumido para esos parámetros.

5. Discusión

5.1. Qué cambia entre lazo abierto y lazo cerrado

La diferencia central entre ambas configuraciones no es la planta, que es idéntica en los dos casos, sino la existencia de una medición realimentada y de un controlador capaz de actuar en función de ella. Esta diferencia tiene una consecuencia técnica directa y verificable en los resultados: en lazo abierto la perturbación de 0,3 metros cúbicos por minuto produce una caída permanente de nivel de 0,600 metros, mientras que en lazo cerrado el mismo estanque, con la misma perturbación, recupera su nivel con un error final de solo 0,0091 metros. Considero que esta diferencia respalda una decisión técnica concreta, que en un estanque cuyo nivel deba mantenerse dentro de un rango angosto, por ejemplo por razones de seguridad de proceso o de calidad de producto ante consumos variables aguas abajo, incorporar un sensor de nivel continuo y un controlador es preferible a operar en lazo abierto, aun cuando la incorporación de realimentación introduzca una dinámica de asentamiento más lenta en la subida inicial, como se observó en los 47,97 minutos de asentamiento en lazo cerrado frente a los 31,28 minutos en lazo abierto.

5.2. Sobre la elección de sintonía del controlador

El contraste de la sección 4.5 respalda una decisión técnica concreta sobre la estrategia de control, no solo sobre la existencia o no de realimentación. Aunque la sintonía agresiva mejora notoriamente el tiempo de asentamiento y el error final, exige una válvula capaz

de entregar dieciséis veces el caudal de régimen, una capacidad de actuador que en muchas instalaciones industriales reales no está disponible, porque las válvulas suelen dimensionarse con un margen de sobrediseño más cercano a dos o tres veces el caudal nominal para evitar sobrecostos de equipo. Por lo tanto, en un caso real la elección de sintonía no puede evaluarse solo por su velocidad de respuesta, sino que debe contrastarse contra la capacidad física del actuador disponible, lo que convierte la selección de K_p y K_i en una decisión de ingeniería con compromisos, no en un simple ajuste numérico para minimizar el tiempo de asentamiento.

5.3. Qué aporta la respuesta temporal al análisis y a la comunicación técnica

Los diagramas de bloques por sí solos muestran la estructura del sistema, pero no muestran su comportamiento dinámico. La gráfica de respuesta a escalón es la que permite verificar, con números concretos, afirmaciones que de otro modo quedarían solo como enunciados cualitativos, como decir que un sistema en lazo cerrado corrige una perturbación. Ogata (2010) define la respuesta transitoria de un sistema de control como el comportamiento del sistema desde el estado inicial hasta el estado final, y señala que parámetros como el tiempo de asentamiento y el sobreimpulso máximo son las medidas estándar para caracterizar esa respuesta de forma comparable entre distintos sistemas. En este informe, esos mismos parámetros, el tiempo de asentamiento al dos por ciento y el sobreimpulso máximo, calculados en 31,28 minutos y 47,97 minutos para lazo abierto y lazo cerrado respectivamente, y un sobreimpulso nulo en la respuesta de lazo cerrado, permiten describir de forma precisa y verificable el comportamiento del estanque simulado, sin depender de una descripción únicamente cualitativa del sistema. Considero que esto ilustra bien el objetivo de la actividad: los diagramas y la gráfica, en conjunto, constituyen un lenguaje técnico común porque permiten que otra persona, con solo revisar la figura y sus parámetros, entienda el comportamiento del sistema sin necesidad de reconstruir la simulación completa.

5.4. Sobre el uso real de IA en este informe

Sobre el uso real que hice de la IA en este informe, mi valoración es positiva. Claude fue útil para programar rápidamente la simulación numérica y construir los diagramas de bloques con una presentación clara, tarea que de forma manual me habría tomado

bastante más tiempo de ajuste gráfico. Al mismo tiempo, tuve que revisar con cuidado que los valores de área, resistencia hidráulica y ganancias del controlador declarados como supuestos fueran razonables para un estanque industrial, y decidir yo mismo qué sistema caracterizar y qué perturbación introducir, ya que esas decisiones no pueden delegarse sin perder el criterio propio que se espera de este informe. Esa experiencia confirma, en la práctica, lo que plantea el marco utilizado: la IA acelera bastante el trabajo de apoyo, pero el criterio final necesita revisión humana activa.

6. Conclusiones

Los principales aportes de este informe son cuatro. Primero, que un mismo estanque de nivel, caracterizado mediante los mismos diagramas de bloques, se comporta de forma completamente distinta según exista o no realimentación: en lazo abierto una perturbación de consumo aguas abajo provoca una caída permanente de nivel de 0,600 metros, mientras que en lazo cerrado, con un controlador proporcional integral, el mismo estanque recupera su nivel con un error de estado estacionario de solo 0,0091 metros. Segundo, que esta diferencia tiene un costo dinámico, un tiempo de asentamiento mayor en lazo cerrado, 47,97 minutos frente a 31,28 minutos en lazo abierto, lo que respalda que la decisión de incorporar realimentación es una decisión técnica con compromisos y no una mejora automática y sin costo. Tercero, que la elección de la sintonía del controlador es en sí misma una segunda decisión con compromisos, porque una sintonía agresiva reduce el tiempo de asentamiento de 47,97 a 3,92 minutos, pero exige que la válvula entregue un caudal máximo dieciséis veces mayor al caudal de régimen, una demanda que puede superar la capacidad real de un actuador industrial típico, mientras que la sensibilidad de la constante de tiempo de planta ante un error de veinticinco por ciento en los parámetros asumidos confirma que la dinámica caracterizada no depende críticamente de esos supuestos. Cuarto, que los diagramas de bloques y la gráfica de respuesta a escalón, utilizados en conjunto, contrastados frente a una alternativa de sintonía y fundamentados en una definición de la literatura de control, permiten comunicar el comportamiento de un sistema de control con precisión y sin ambigüedad, constituyendo el lenguaje técnico común que busca practicar esta actividad.

Declaraciones

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

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. (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>

Ogata, K. (2010). Ingeniería de control moderna (5.^a ed.). Pearson Educación.