

Estrategia de control en cascada para regular el nivel de líquido en una estación de procesos didáctica.

Cascade control strategy to regulate the liquid level in a didactic process station

Diego Fernando Pichoasamin Morales¹, Vicente Paul Astudillo Cortez², William Germánico Yugcha Quinatoa³, Pablo Cesar Catota Ocapana⁴, Byron Daniel Benalcázar Lopez⁵

¹Instituto Tecnológico Universitario Rumiñahui, diego.pichoasamin@ister.edu.ec, Sangolquí, Ecuador.

²Instituto Tecnológico Universitario Rumiñahui, paul.astudillo@ister.edu.ec, Sangolquí, Ecuador.

³Instituto Tecnológico Universitario Rumiñahui, william.yugcha@ister.edu.ec, Sangolquí, Ecuador.

⁴Instituto Tecnológico Universitario Rumiñahui, pablo.catota@ister.edu.ec, Sangolquí, Ecuador.

⁵Instituto Tecnológico Universitario Rumiñahui, byron.benalcazar@ister.edu.ec, Sangolquí, Ecuador.

Autor para correspondencia: diego.pichoasamin@ister.edu.ec

Fecha de recepción: marzo 2023

Fecha de aceptación: julio 2023

RESUMEN

Se analizó información sobre el control en procesos industriales y las técnicas empleadas para lograr la estabilidad en la regulación del nivel de líquido en un reservorio, se examinó la respuesta que presenta la variable de la salida del proceso frente a una perturbación en la planta y las ventajas que brindan el uso de las estrategias de control en procesos industriales. El objetivo es implementar una estrategia de control en cascada para regular el nivel de líquido en un reservorio de un módulo didáctico. Se aplicó el método deductivo para analizar la información de técnicas y estrategias de control de procesos en los artículos citados. Resultó un diseño de una estrategia cascada desarrollada en dominio de la frecuencia e implementación en un módulo didáctico para controlar el nivel de líquido a partir de la variable de flujo del proceso. Se concluyó que la aplicación de una estrategia en cascada para el control de nivel de líquido genera un proceso estable y de corrección rápida frente a perturbaciones, partiendo de las técnicas de control proporcional integral PI.

Palabras clave: perturbación; controlador; proceso; nivel; flujo

ABSTRACT

Information on industrial process control and the techniques used to achieve stability in the regulation of the liquid level in a reservoir was analyzed, the response of the process output variable to a disturbance in the plant was examined, as well as the advantages of using control strategies in industrial processes. The objective is to implement a cascade control strategy to regulate the liquid level in a reservoir of a didactic module. The deductive method was applied to analyze the information on process control techniques and strategies in the cited articles. It resulted in a design of a cascade strategy developed in frequency domain and implemented in a didactic module to control the liquid level from the process flow variable. It was concluded that the application of a cascade strategy for liquid level control generates a stable and fast correction process against disturbances, based on PI integral proportional control techniques.

Key words: disturbances, controller, process, level, flow

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial existe una gran cantidad de plantas industriales de procesamiento de alimentos, sistemas de purificación agua, lácteos, bebidas, entre otros sectores, que manejan diferentes variables de control como nivel, flujo, temperatura, presión entre otras (Gurjar, Chaudhari, and Kurode 2021). El nivel de líquido en un reservorio es un parámetro importante en los procesos industriales, considerando que debe mantenerse el nivel deseado para que el proceso funcione sin problemas y obtener productos de calidad, como en las plantas de energía nuclear y plantas de tratamiento de agua. Un factor predominante que afecta la estabilidad de los procesos de control es el tiempo de retardo que existe en alcanzar la referencia deseada frente al valor real medido, cambios que se presentan debido a perturbaciones o variaciones en el proceso (Urrea and Páez 2021).

El problema radica en los diversos tipos de técnicas y formas existentes para realizar el control de procesos de nivel de líquidos, que generan una variación en el tiempo de estabilidad y respuesta frente a perturbaciones o cambios en el nivel de referencia deseado, siendo necesario desarrollar una estrategia de control que mejore las características de estabilidad del proceso. El objetivo es analizar la información de técnicas y estrategias de control de procesos industriales que permitan diseñar e implementar un control para regular el nivel de líquido del tanque de un módulo didáctico. En aplicaciones de control de nivel industrial, las técnicas de control de la familia Proporcional, Integral y/o Derivativa son ampliamente utilizadas para regular el nivel de líquido, debido a su simplicidad en el diseño e implementación, motivo por el cual mejoras en el rendimiento e implementación de estas técnicas generan un ahorro en costo y tiempo de producción, viéndose un mayor impacto en volúmenes industriales (Kar and Roy 2018).

Se emplea el método deductivo para examinar la información de diversos artículos de revistas y conferencias referente al control de procesos industriales que regulan la magnitud de nivel de líquido y la aplicación de la estrategia en cascada a partir de la relación directa entre el flujo de líquido que circula por las líneas de tuberías y el nivel de líquido deseado en el reservorio.

Las técnicas de control P, PI o PID operan en un solo lazo de control y a partir de ellas se establecen estrategias de control, que ofrecen una mayor rapidez de estabilidad frente a perturbaciones, como es el caso de la estrategia Cascada, que basa su funcionamiento en dos lazos de control, un externo denominado maestro y un interno como esclavo, la interacción entre los lazos se enfoca en un rendimiento óptimo mediante la regulación de variables claves para el control del sistema (Flores García et al. 2021).

La importancia del control cascada radica en las características de robustez y velocidad de respuesta que brinda al proceso, disminuye los efectos de disturbios internos de entrada o salida del proceso, corrige las alinealidades e incertidumbres del lazo interno. En el diseño de control Cascada, se establece a la variable nivel en el lazo externo y al flujo como variable interna, considerando que el flujo responde más rápido frente a una perturbación y tiempos muertos, bajo esa primicia se establece en el diseño que la salida del controlador de nivel es el punto de ajuste para el controlador de flujo (Bequette 2019).

En la implementación se determinó que, ante una perturbación o disminución del flujo que atraviesa la línea de tubería, esta genera una variación en el nivel de agua del reservorio; mediante la estrategia de control Cascada en el instante en que se detecta la variación de flujo, el sistema controla la velocidad de bombeo, haciendo una corrección inmediata y manteniendo el nivel deseado en el reservorio, lo que genera un sistema más robusto frente a perturbaciones; particular que no sucede con las técnicas de control de un solo lazo, que esperan se refleje un cambio en el nivel de líquido del reservorio para actuar, lo que con lleva a un incremento en el tiempo de detección del error e incremento de tiempo en la estabilización del proceso.

Se concluye que es factible diseñar e implementar la estrategia de control en cascada para regular el nivel de líquido en un reservorio, partiendo del modelamiento de la planta desarrollado en el software de Matlab y mediante la interacción entre las técnicas de control de un solo lazo, viéndose reflejada en la acción inmediata del controlador hacia los actuadores y la rápida respuesta del proceso frente a perturbaciones de la planta.

MATERIALES Y MÉTODOS

El módulo didáctico empleado para la implementación del control de nivel mediante la estrategia en Cascada fue la estación PS-2800 del Sistema de entrenamiento en automatización CIM2000,

que se dispone en países de Latinoamérica como Perú y Ecuador. La estación PS2800 a partir de su diseño permite manipular y desarrollar el control de variables de nivel, flujo, temperatura y presión. Para desarrollar el modelamiento matemático de la planta y algoritmo de control se empleó la plataforma de Matlab, que permitió realizar el cálculo para el diseño de controladores de orden fraccionario, ya que brinda las herramientas para sintonizar, aproximar, discretizar e implementar controladores en el dominio de la frecuencia(Dastjerdi et al. 2019).

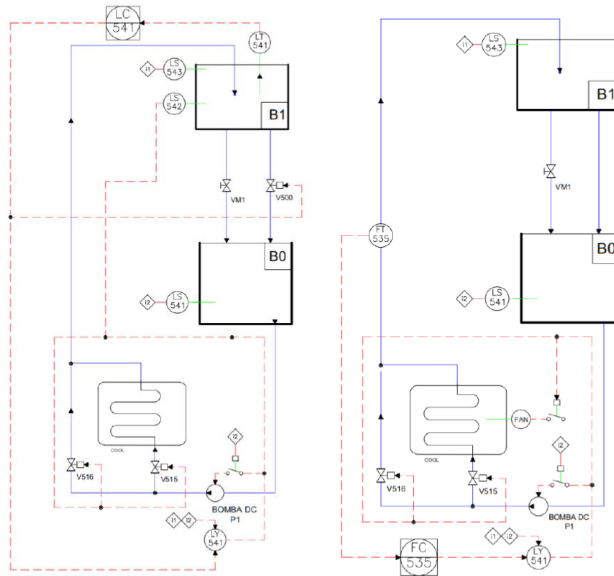
El control de nivel de líquido se lo puede realizar a través de diferentes métodos y técnicas de control, siendo los más usados controladores de la familia PID, donde la acción de control proporcional “P” dada por el error actual entre el valor deseado y el medido, acción integral “I” que funciona en base al error pasado, y, acción derivada predice la tasa de cambio y mitiga el error para que no ocurra en el futuro, al combinar estas acciones se diseñó la estrategia de control en cascada(Ionescu et al. 2020)(Jadhav 2020). El diseño del algoritmo de control se ajusta a manipular la potencia de la bomba de acuerdo con la magnitud del error entre el nivel de referencia(valor deseado) y el nivel real, mientras mayor sea el error, la potencia de la bomba se incrementa, y, viceversa a un error pequeño la potencia de la bomba disminuye, a partir de estas técnicas de control se ha diseñado la estrategia de control en Cascada (YUMURTACI and VERİM 2020).

Primera fase: Descripción de componentes

La planta analizada presenta dos subsistemas de nivel 541 y flujo 535, en la Fig. 1 se detalla el diagrama PI&D que detalla los equipos, tuberías e instrumentos presentes en el proceso. En el lazo de control de nivel 541 el transmisor de nivel LT 541 envía la señal al controlador LC541, quien a su vez maneja la activación o desactivación de la bomba DC P1.

El lazo de control de flujo 535, permite regular el flujo que circula por la línea de tuberías desde el reservorio B0 hasta el reservorio B1, mediante el cambio de velocidad de giro del motor de la bomba DC P1 que es manipulada mediante el controlador FC535, el transmisor de flujo FT535 permite determinar el flujo que atraviesa por el subsistema.

Fig. 1. Lazos de control de nivel 541 (a) y lazo de flujo 535(b)

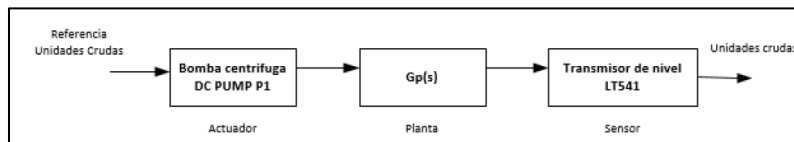


Segunda fase: Modelamiento de sistemas

a. Modelamiento subsistema 541

Se interactúa con el subsistema de nivel en lazo abierto, ver Fig. 2, y la válvula solenoide V500 abierta, se consideró una señal mínima que el controlador envía a la bomba P1 DC para mantener el nivel de agua del reservorio B1 en un valor estable, posterior a ello, se genera con el actuador bomba P1 DC una serie de estímulos a una amplitud constante y con variación en el tiempo entre los estímulos, la respuesta de la planta se registró mediante el sensor de nivel LT 541, el almacenamiento de información se realizó a través de la herramienta Trend del software del controlador RSLOGIX5000.

Fig. 2. Modelamiento subsistema de nivel 541

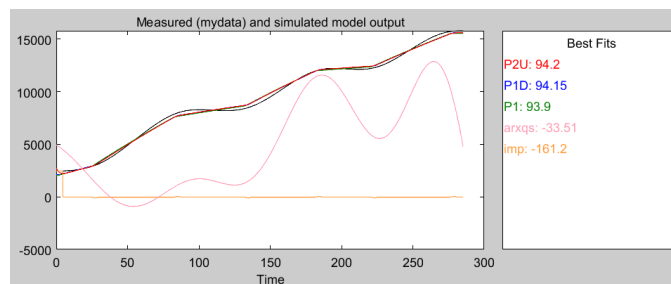


La herramienta Ident permite representar la forma de la función de transferencia de sistemas dinámicos y asegura una caja negra lineal y no lineal, en base en los datos de bucle abierto que ingresan y los que salen, proporcionando una construcción precisa y modelos simplificados de sistemas complejos a partir de series temporales (Al Khafaji et al. 2019), el proceso permite a través

de datos reales del sistema encontrar un modelo con un grado de correlación alto partir de las señales de entrada y salida obtenidas en la planta de nivel en lazo abierto (Bermeo Varon, Alvarez, and Mantilla Arenas 2021).

En el software de Matlab, se ingresó los datos de entrada, salida, y tiempo de muestra obtenido de la planta, mediante la herramienta System Identification Tool IDENT, Fig. 3, se obtiene los modelos de aproximación en función de la respuesta de la planta frente a dichos estímulos, obteniendo un modelo de función de transferencia. Al aplicar la función IDENT, se obtuvo la estimación con un porcentaje de aproximación del 94.2% para el subsistema de nivel 541, que se representa mediante la función de transferencia.

Fig. 3. Estimación de la planta del subsistema de nivel 541.

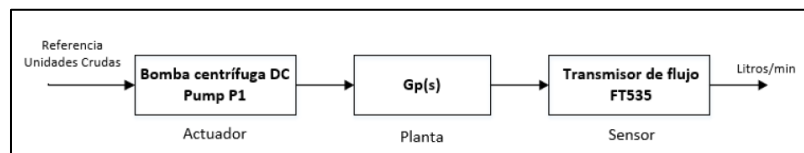


$$GP_{541}(s) = \frac{0.002188}{s^2 + 0.495s + 0.0014} \quad (1)$$

b. Modelamiento subsistema 535

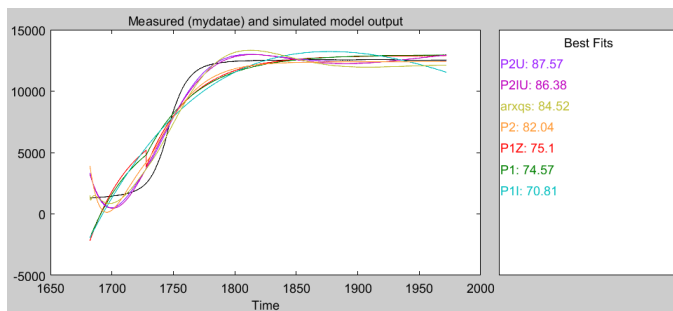
Considerando lo estipulado en la sección anterior, se realizó el modelamiento del subsistema de flujo 535, partiendo del lazo de control abierto, ver Fig. 4, como entrada los estímulos proporcionados a la bomba centrífuga DC P1 y como salida la magnitud medida por el transmisor FT535.

Fig. 4. Modelamiento subsistema de flujo535



Se determinó la estimación subsistema de flujo 535 con un porcentaje de aproximación del 87.57%, que se representa mediante la función de transferencia.

Fig. 5. Estimación de la planta del subsistema de flujo 535.



$$GP_{535}(s) = \frac{0.045706}{s^2 + 0.3472s + 0.0304} \quad (2)$$

Tercera fase: Algoritmos de control

a. Técnica de control del lazo de nivel 541

La sintonización del controlador PI consiste en determinar sus parámetros, entre ellos la sensibilidad proporcional K_p y la constante de integración ajustable K_i donde la primera parte es la acción de control proporcional, mientras que la segunda es la acción integral (Panoeiro et al. 2018). Se implementó la técnica de control proporcional integral (PI), enfocándose en la sintonización de la acción integral que permita obtener un error estacionario que tienda a cero mediante y la acción proporcional para el control del sobreimpulso; no se consideró la acción derivativa (K_d) debido a que el nivel del reservorio presenta perturbaciones y vibraciones propias de la planta por el encendido del actuador y la caída del agua en el reservorio, por lo cual, la acción derivativa busca corregir los continuos errores, lo que genera saturación en el funcionamiento del actuador.

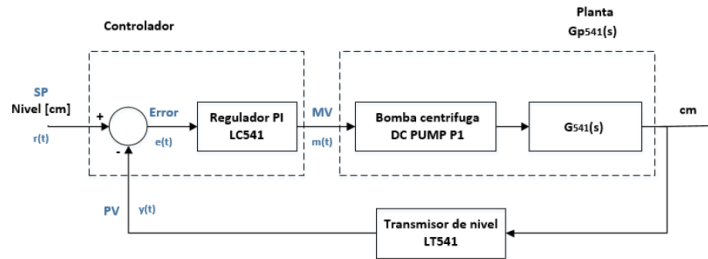
$$Gc(s) = Kc + \frac{Ki}{s} \quad (3)$$

En la Tabla 1 se detallan las características de diseño del lazo de control 541 y en la Fig. 6 se visualiza el diagrama de bloques en lazo cerrado.

Tabla 1. Especificaciones de control - lazo de nivel 541

DESCRIPCION	MAGNITUD
Rango de nivel de control (SETPOINT, SP)	9 cm a 23 cm
Rango de nivel del proceso (Spam)	14 cm
Alarma alta de control:	0.2 cm sobre el valor del SP.
Alarma baja de control:	0.2 cm bajo el valor del SP.

Fig. 6. Diagrama de control para el lazo de nivel 541



El diseño de la técnica de control se desarrolló a partir del dominio de la frecuencia, método que se aplica a menudo para diseñar controladores de orden fraccional PI o PD, en función de la frecuencia de cruce de ganancia y el margen de fase dados, los parámetros del controlador se calculan de acuerdo con la especificación de robustez de ganancia. El sistema de control obtenido puede lograr la robustez para ganar variaciones (Zheng et al. 2017).

El diseño de controladores en dominio de frecuencia, se emplea en diferentes sectores, un análisis de dominio de frecuencia basado en los diagramas de Bode y Nichols describe las propiedades de frecuencia del modelo con el compensador diseñado para la amortiguación de oscilaciones, siendo en este método necesario la especificación del sobre impulso (M_p), el tiempo de estabilidad de la planta en lazo abierto (T_o) y el tiempo de estabilidad (T_s) que se desea lograr en el proceso controlado (Čápková, Kozáková, and Minár 2019); los valores considerados para el diseño del lazo de nivel 541:

$$M_p \leq 10\%; T_o = 800[seg]; T_s \leq 500[seg] \quad (4)$$

El diagrama de bode en el software de Matlab permitió representar la función de transferencia en función de la frecuencia, las medidas margen de fase y de estabilidad relativa del margen de ganancia; mediante el diagrama de Bode se determinó el valor de la ganancia del módulo y el ángulo que debe tener la planta en función de la frecuencia de cruce de ganancia. A partir del dominio de la frecuencia se obtienen los parámetros sintonizados para el regulador PI del lazo de nivel 541, considerando la formula (1) y (3).

Fig. 7. Diseño en el dominio de la frecuencia del controlador nivel LT541 en Matlab

```

s = tf('s');
gp=tf([0.0021885],[1 0.4955 0.0014]);
figure(1)
subplot(1,2,1)
margin(gp)
hold on
w1=0.02;
MF=70;
[G,Q]=bode(gp,w1);
dfi=Q*180;
fime=MF-dfi;
fime=fime*pi/180;
kc=cos(fime)/G;
ki = -w1*sin(fime)/G;
kd = sin(fime)/w1/G;
    
```

Command Window

```

kc =
    4.0989
>> ki
ki =
    0.0396
    
```

$$Kc = 4.09; Ki = 0.04\left[\frac{1}{seg}\right]; Kd = 0 \quad (5)$$

b. Técnica de control del lazo de flujo 535

Considerando lo expuesto en la sección anterior, se realiza el diseño del controlado del lazo de flujo 5353, en la Fig. 1Fig. 8 se describe las especificaciones del proceso a controlar y el diagrama de control del lazo.

Fig. 8. Diagrama de control para el lazo de control 535

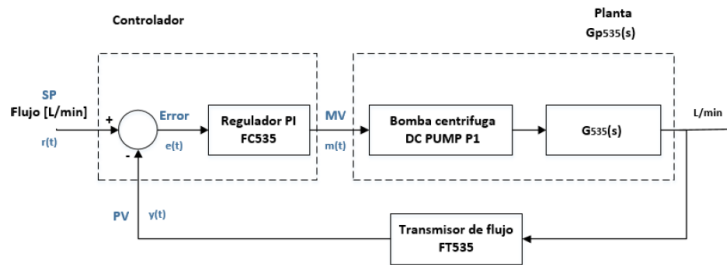


Tabla 2. Especificaciones lazo de control 535

DESCRIPCION	MAGNITUD
Rango de flujo de control (SP):	12 L/min a 6 L/min.
Rango de flujo del proceso (Spam):	6 L/min.
Alarma alta de control:	0.3 L/min sobre el valor del SP.
Alarma baja de control:	0.3 L/min bajo el valor del SP

Los valores considerados para el diseño son el sobre impulso (Mp), tiempo de estabilidad de la planta en lazo abierto (To) y el tiempo de estabilidad controlado (Ts) del lazo de flujo 535.

$$Mp \leq 10\%; To = 45[seg]; Ts \leq 40[seg] \quad (6)$$

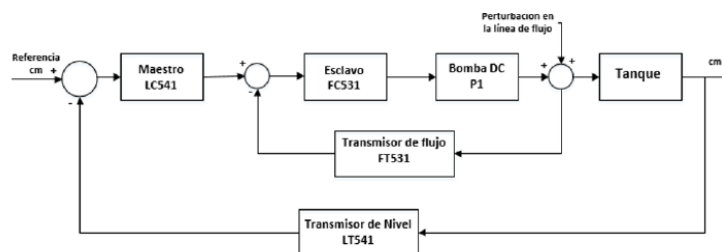
A partir del dominio de la frecuencia se obtienen los parámetros sintonizados para el regulador PI del lazo de flujo 535, en función de la formula (2) y (3).

$$Kc = 0.25; Ki = 0.135\left[\frac{1}{seg}\right]; Kd = 0 \quad (7)$$

Cuarta fase: Diseña de la estrategia de control Cascada

Para el diseño de la estrategia cascada, se empleó las técnicas de control, PI lazo de flujo 535 y PI lazo de nivel 541, al combinar estas dos técnicas se controló el nivel de líquido del reservorio B1 en función del flujo, esa última es la variable intermedia del proceso. Las características del sistema de control en cascada puede sintonizar simultáneamente los bucles primario y secundario, y, evitar el paso de reidentificación del método de sintonización de secuencial tradicional (Xu, Fan, and Zhao 2020). El control en cascada permite corregir los errores del proceso más rápido que cuando se dispone de un solo lazo de control, debido a que este control consta de dos elementos de detección, lo que permite que el sistema sea más sensible.

Fig. 9. Diagrama de bloques del sistema de control en cascada



Se determinó al lazo externo (maestro) al subsistema 541, y, el lazo interno (esclavo) al subsistema 535, ver Fig. 9; el regulador LC541 será quien genere una señal de referencia para el regulador secundario FC535, formado de esta manera la estructura de control en cascada.

Considerando que la línea de tubería que une la bomba DC P1 hasta el reservorio B1, tuviese una gran distancia y de pronto disminuye el flujo que bombea el actuador, provoca que el flujo que atraviesa la línea de tubería también disminuya, siendo un flujo insuficiente para mantener el nivel, la técnica de control PI de un solo lazo detectará la disminución de nivel luego de un tiempo determinado cuando el LT541 registre la disminución en el reservorio, momento en la cual iniciará

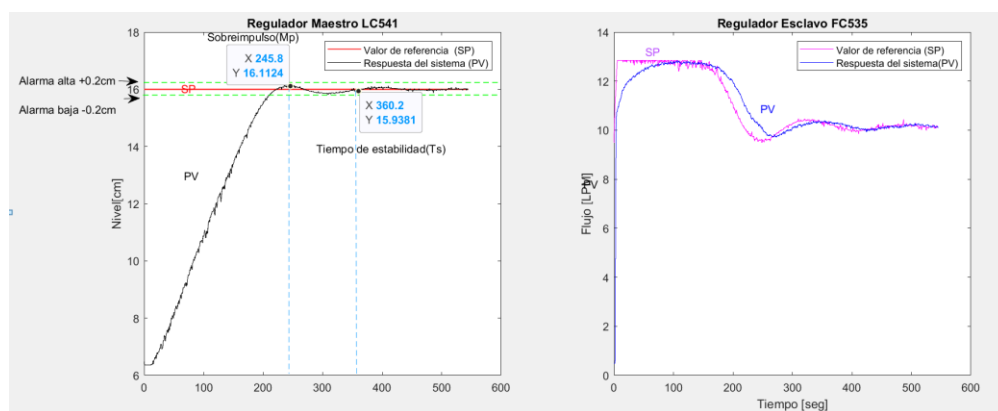
con la corrección del sistema, lo que incrementa el tiempo necesario para estabilizar el sistema frente a perturbaciones o cambios de referencia de nivel de líquido (SP).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados

Se implementó el control en cascada en el módulo didáctico, lo que permitió visualizar el comportamiento real de la planta del proceso, en la Fig. 10 se detalla los resultados obtenidos al realizar una prueba de funcionamiento, que se basó en colocar una referencia (SP) de nivel de agua de 16 cm, partiendo que el reservorio se encontraba vacío.

Fig. 10. Implementación de la estrategia de control cascada



La Fig. 10 indica el comportamiento del proceso de control de nivel (izquierda) y el funcionamiento del controlador esclavo relacionado al flujo del proceso (derecha), se evidenció que la variable controlada de nivel (PV maestro) se estabilizó en un tiempo menor a 360 segundos, considerando que el tanque se encontraba vacío, sin líquido; a partir de ese tiempo el sistema presenta estabilidad; se contempló en el diseño de los algoritmos de control un sobreimpulso menor al 10%, en la prueba se obtuvo un sobreimpulso de 16.11cm al colocar el SP en 16 cm que corresponde al 0.68 %, cumpliendo las características de diseño del algoritmo de control para el nivel del reservorio.

Tabla 3. Resultado de control de nivel mediante estrategia cascada

Consideraciones de diseño del controlador 541	Resultados del control de nivel en cascada
Sobreimpulso $M_p \leq 10\%$ del SP $16\text{cm} + 10\% = 17.6[\text{cm}]$ max.	M_p : 16.11 [cm] equivalente al 0.68% del SP
Tiempo de estabilidad: $T_s \leq 500$ [seg]	T_s : 360 [seg]; desde los 245 seg no sobrepasa las alarmas alta y baja, error del proceso menor al 1%

Alarma alta de control: 0.2[cm] sobre el SP.	No presenta alarma alta
Alarma baja de control: 0.2[cm] [bajo el SP.	No presenta alarma baja

La estrategia de control cascada que se aplicó al módulo didáctico, consideró dos reguladores en su diseño, el regulador maestro correspondiente al lazo de nivel LC541 y el regular esclavo al lazo de flujo FC535; la estrategia permitió tener un error menor al 1% cuando se encuentra en la zona de estabilidad (Ts).

Discusión

La estrategia cascada es empleada por diferentes autores para el control de procesos industriales considerando en su diseño, bucles primarios externos) y secundarios (internos), la salida del modelo de proceso secundario se utiliza como entrada para el proceso primario, lo que permite diseñar controladores en cascada paralelos para plantas inestables, el autor sugiere una estrategia simple, donde el lazo primario se considere un controlador Proporcional-Integral (PI) y para el lazo secundario se utilice un controlador Proporcional (P), en el presente documento se diseñó controladores PI para los dos subsistemas de nivel y flujo de la planta (Pashaei and Bagheri 2020).

El autor Mehedi et al (2019) describe a la estructura en cascada mediante un bucle interior y un bucle exterior, se diseña cada bucle por separado, la ventaja de esta estructura es que los dos controladores lineales se dimensionan por separado, configurando a la señal de salida del controlador de bucle externo como la señal de referencia del controlador de bucle interno (Mehedi et al. 2019); se concuerda con el autor que a través de técnicas de control simples de la familia PI se pueden establecer estrategias de control avanzadas como el control en cascada.

En la información revisada de artículos científicos existen modelos similares que emplean diferentes magnitudes como el nivel, presión, temperatura, flujo, entre otros y diferentes técnicas de control empleadas en la industrial, que adoptaron la estrategia en cascada para el control de sus procesos. En este documento se comprobó las ventajas que brinda el diseño e implementación del control cascada para un módulo didáctico que maneja las variables de nivel y flujo; la implementación de la estrategia en un escenario físico permitió verificar la estabilidad del proceso y la respuesta eficiente del proceso frente a perturbaciones que se generen.

CONCLUSIONES

Se concluye que a partir de las técnicas de control de Proporcional Integral (PI) es factible diseñar e implementar una estrategia de control más robusta y estable, como el control en Cascada, en la cual se involucran magnitudes intermedias del proceso, a fin de disminuir el tiempo de retardo entre la variable medida y la respuesta del sistema.

La estrategia de control en cascada se aplica en procesos que dispongan dos lazos de control y que estén relacionadas entre sí, como nivel y flujo, se diseña considerando al lazo de control más rápido como esclavo y al otro lazo como maestro, estrategia que es aplicable para un proceso que necesite regular el nivel de líquido en un reservorio.

Para el control de nivel de líquido en un tanque que se encuentra a distancias considerables respecto a la ubicación del actuador (bomba DC P1) del proceso, la estrategia en cascada detecta la disminución del caudal que atraviesa la línea de tubería de forma inmediata y realiza la corrección directa sobre el actuador, sin esperar a que pase un tiempo hasta que el error se vea reflejado en el nivel del reservorio para posteriormente corregir el error, es ahí que la estrategia cascada genera un menor tiempo de estabilización del proceso que al usar las técnicas de control independientes.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al Tecnológico Universitario Rumiñahui, por el apoyo brindado para la publicación del presente artículo científico.

REFERENCIAS

- Bequette, B. Wayne. 2019. "Process Control Practice and Education: Past, Present and Future." *Computers & Chemical Engineering* 128:538–56. doi: 10.1016/j.compchemeng.2019.06.011.
- Bermeo Varon, Leonardo Antonio, Juan Gonzalo Alvarez, and William Mantilla Arenas. 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):622–32. doi: 10.4067/S0718-33052021000400622.
- Čápková, Romana, Alena Kozáková, and Martin Minár. 2019. "Experimental Modelling and Control of a Tower Crane in the Frequency Domain." *Strojnícky Časopis - Journal of Mechanical Engineering* 69(3):17–26. doi: 10.2478/scjme-2019-0025.

- Dastjerdi, Ali Ahmadi, Blas M. Vinagre, YangQuan Chen, and S. Hassan HosseinNia. 2019. “Linear Fractional Order Controllers; A Survey in the Frequency Domain.” *Annual Reviews in Control* 47:51–70. doi: 10.1016/j.arcontrol.2019.03.008.
- Flores García, Ernesto, José Carlos Quezada Quezada, Rafael Víctor Hugo Calderón Medina, and Atenas Samaria Hernández López. 2021. “Control En Cascada En La Automatización Del Proceso de Elaboración de Pegamento Implementando Un PAC System RX3i Y Una HMI.” *Boletín Científico INVESTIGIUM de La Escuela Superior de Tizayuca* 7(13):46–56. doi: 10.29057/est.v7i13.7189.
- Gurjar, Bhagyashri, Vinita Chaudhari, and Shailaja Kurode. 2021. “Parameter Estimation Based Robust Liquid Level Control of Quadruple Tank System — Second Order Sliding Mode Approach.” *Journal of Process Control* 104:1–10. doi: 10.1016/j.jprocont.2021.05.009.
- Ionescu, Clara M., Eva H. Dulf, Maria Ghita, and Cristina I. Muresan. 2020. “Robust Controller Design: Recent Emerging Concepts for Control of Mechatronic Systems.” *Journal of the Franklin Institute* 357(12):7818–44. doi: 10.1016/j.jfranklin.2020.05.046.
- Jadhav, Vrushali Vishnu. 2020. “Robust Video Watermarking Using Invariant Quaternion Legendre- Fourier Moments & Optimization with Bees Algorithm.” *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), India* 07(06):7613–17.
- Kar, Biprajeet, and Prasanta Roy. 2018. “A Comparative Study Between Cascaded FOPI–FOPD and IOPI–IOPD Controllers Applied to a Level Control Problem in a Coupled Tank System.” *Journal of Control, Automation and Electrical Systems* 29(3):340–49. doi: 10.1007/s40313-018-0373-z.
- Al Khafaji, Falih S. M., W. Z. Wan Hasan, M. M. Isa, and N. Sulaiman. 2019. “A HSMDAQ System for Estimating Transfer Function of a DC Motor.” Pp. 25–28 in *2019 IEEE Asia Pacific Conference on Postgraduate Research in Microelectronics and Electronics (PrimeAsia)*. IEEE.
- Mehedi, Ibrahim Mustafa, Ubaid M. Al-Saggaf, Rachid Mansouri, and Maamar Bettayeb. 2019. “Two Degrees of Freedom Fractional Controller Design: Application to the Ball and Beam System.” *Measurement* 135:13–22. doi: 10.1016/j.measurement.2018.11.021.
- Panoeiro, F. F., M. F. Santos, D. C. Silva, J. L. Silva, and M. J. Carmo. 2018. “PI Controller Tuned by Bee Swarm for Level Control Systems.” Pp. 301–6 in *2018 19th International Carpathian Control Conference (ICCC)*. IEEE.
- Pashaei, Shabnam, and Peyman Bagheri. 2020. “Parallel Cascade Control of Dead Time Processes via Fractional Order Controllers Based on Smith Predictor.” *ISA Transactions* 98:186–97. doi: 10.1016/j.isatra.2019.08.047.

- Urrea, Claudio, and Felipe Páez. 2021. "Design and Comparison of Strategies for Level Control in a Nonlinear Tank." *Processes* 9(5):735. doi: 10.3390/pr9050735.
- Xu, Zuhua, Qingli Fan, and Jun Zhao. 2020. "Gain-Scheduled Equivalent-Cascade IMC Tuning Method for Water Level Control System of Nuclear Steam Generator." *Processes* 8(9):1160. doi: 10.3390/pr8091160.
- YUMURTACI, Mehmet, and Özgür VERİM. 2020. "Liquid Level Control with Different Control Methods Based on Matlab/Simulink and Arduino for the Control Systems Lesson." *International Advanced Researches and Engineering Journal* 4(3):249–54. doi: 10.35860/iarej.750664.
- Zheng, WeiJia, Ying Luo, XiaoHong Wang, YouGuo Pi, and YangQuan Chen. 2017. "Fractional Order PI Λ D M Controller Design for Satisfying Time and Frequency Domain Specifications Simultaneously." *ISA Transactions* 68:212–22. doi: 10.1016/j.isatra.2017.02.016.
- Bequette, B. Wayne. 2019. "Process Control Practice and Education: Past, Present and Future." *Computers & Chemical Engineering* 128:538–56. doi: 10.1016/j.compchemeng.2019.06.011.
- Bermeo Varon, Leonardo Antonio, Juan Gonzalo Alvarez, and William Mantilla Arenas. 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):622–32. doi: 10.4067/S0718-33052021000400622.
- Čápková, Romana, Alena Kozáková, and Martin Minár. 2019. "Experimental Modelling and Control of a Tower Crane in the Frequency Domain." *Strojnícky Časopis - Journal of Mechanical Engineering* 69(3):17–26. doi: 10.2478/scjme-2019-0025.
- Dastjerdi, Ali Ahmadi, Blas M. Vinagre, YangQuan Chen, and S. Hassan HosseinNia. 2019. "Linear Fractional Order Controllers; A Survey in the Frequency Domain." *Annual Reviews in Control* 47:51–70. doi: 10.1016/j.arcontrol.2019.03.008.
- Flores García, Ernesto, José Carlos Quezada Quezada, Rafael Víctor Hugo Calderón Medina, and Atenas Samaria Hernández López. 2021. "Control En Cascada En La Automatización Del Proceso de Elaboración de Pegamento Implementando Un PAC System RX3i Y Una HMI." *Boletín Científico INVESTIGIUM de La Escuela Superior de Tizayuca* 7(13):46–56. doi: 10.29057/est.v7i13.7189.
- Gurjar, Bhagyashri, Vinita Chaudhari, and Shailaja Kurode. 2021. "Parameter Estimation Based Robust Liquid Level Control of Quadruple Tank System — Second Order Sliding Mode Approach." *Journal of Process Control* 104:1–10. doi: 10.1016/j.jprocont.2021.05.009.

- Ionescu, Clara M., Eva H. Dulf, Maria Ghita, and Cristina I. Muresan. 2020. "Robust Controller Design: Recent Emerging Concepts for Control of Mechatronic Systems." *Journal of the Franklin Institute* 357(12):7818–44. doi: 10.1016/j.jfranklin.2020.05.046.
- Jadhav, Vrushali Vishnu. 2020. "Robust Video Watermarking Using Invariant Quaternion Legendre- Fourier Moments & Optimization with Bees Algorithm." *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), India* 07(06):7613–17.
- Kar, Biprajeet, and Prasanta Roy. 2018. "A Comparative Study Between Cascaded FOPI–FOPD and IOPI–IOPD Controllers Applied to a Level Control Problem in a Coupled Tank System." *Journal of Control, Automation and Electrical Systems* 29(3):340–49. doi: 10.1007/s40313-018-0373-z.
- Al Khafaji, Falih S. M., W. Z. Wan Hasan, M. M. Isa, and N. Sulaiman. 2019. "A HSMDAQ System for Estimating Transfer Function of a DC Motor." Pp. 25–28 in *2019 IEEE Asia Pacific Conference on Postgraduate Research in Microelectronics and Electronics (PrimeAsia)*. IEEE.
- Mehedi, Ibrahim Mustafa, Ubaid M. Al-Saggaf, Rachid Mansouri, and Maamar Bettayeb. 2019. "Two Degrees of Freedom Fractional Controller Design: Application to the Ball and Beam System." *Measurement* 135:13–22. doi: 10.1016/j.measurement.2018.11.021.
- Panoeiro, F. F., M. F. Santos, D. C. Silva, J. L. Silva, and M. J. Carmo. 2018. "PI Controller Tuned by Bee Swarm for Level Control Systems." Pp. 301–6 in *2018 19th International Carpathian Control Conference (ICCC)*. IEEE.
- Pashaei, Shabnam, and Peyman Bagheri. 2020. "Parallel Cascade Control of Dead Time Processes via Fractional Order Controllers Based on Smith Predictor." *ISA Transactions* 98:186–97. doi: 10.1016/j.isatra.2019.08.047.
- Urrea, Claudio, and Felipe Páez. 2021. "Design and Comparison of Strategies for Level Control in a Nonlinear Tank." *Processes* 9(5):735. doi: 10.3390/pr9050735.
- Xu, Zuhua, Qingli Fan, and Jun Zhao. 2020. "Gain-Scheduled Equivalent-Cascade IMC Tuning Method for Water Level Control System of Nuclear Steam Generator." *Processes* 8(9):1160. doi: 10.3390/pr8091160.
- YUMURTACI, Mehmet, and Özgür VERİM. 2020. "Liquid Level Control with Different Control Methods Based on Matlab/Simulink and Arduino for the Control Systems Lesson." *International Advanced Researches and Engineering Journal* 4(3):249–54. doi: 10.35860/iarej.750664.
- Zheng, WeiJia, Ying Luo, XiaoHong Wang, YouGuo Pi, and YangQuan Chen. 2017. "Fractional Order PI Λ D M Controller Design for Satisfying Time and Frequency Domain

Specifications Simultaneously.” *ISA Transactions* 68:212–22. doi:
10.1016/j.isatra.2017.02.016.