



NUEVAS REALIDADES PARA LA EDUCACIÓN EN INGENIERÍA:
CURRÍCULO, TECNOLOGÍA, MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO

13 - 16
DE SEPTIEMBRE

2022

CARTAGENA DE INDIAS,
COLOMBIA



Encuentro Internacional de
Educación en Ingeniería ACOFI

Propuesta de desarrollo del Student Outcome 7 de ABET mediante un ejercicio de sintonía de controladores PID

Hader Alzate Gil, Carlos Ocampo López, Fabio Castrillón Hernández

Universidad Pontificia Bolivariana
Medellín, Colombia

Resumen

En 2016, la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Pontificia Bolivariana implementó una transformación curricular, y en dicha transformación consideró un curso de control de procesos, que aporta al estudiante elementos para analizar y mejorar la operabilidad de plantas de proceso. También, desde 2021, la Facultad de Ingeniería Química viene trabajando para el logro de la acreditación ABET y un aspecto importante en torno a la acreditación es el cumplimiento de los *Student Outcomes*. Con el objetivo de desarrollar destrezas en el estudiante y poder cumplir con el *Student Outcome 7*, que se relaciona con la adquisición y aplicación de nuevo conocimiento, se ha propuesto una experiencia de aprendizaje relacionada con la sintonía de controladores PID. En una actividad por equipos, se propone a los estudiantes analizar un proceso determinado disponible en la plataforma LoopPro la cual emula un ambiente real de planta. Se solicita a los estudiantes realizar el ajuste de un controlador PID empleando reglas de sintonía tratadas en clase, y contrastar con otra regla explorada en artículos de revistas indexadas o libros especializados. Los estudiantes deberán indicar las ventajas asociadas a las reglas de sintonía comparadas, además de revisar otros aspectos de interés que implican la aplicación de conceptos y conocimientos previos como tiempo de estabilización de la variable controlada, razón de decaimiento, trabajo del elemento final de control, entre otros. Se considera que el ejercicio propuesto es apropiado para el desarrollo del *Student Outcome 7* y permite que el estudiante adquiera destrezas que favorecen el aprendizaje activo y fomentan la metacognición.

Palabras clave: *Student Outcome 7*; control de procesos; sintonía de controladores PID

Abstract

In 2016, the Faculty of Chemical Engineering of the Universidad Pontificia Bolivariana implemented a curricular transformation, and in that transformation was considered a process control course, which provides the student the elements to analyze and improve the operability of process plants. Also, since 2021, the Faculty of Chemical Engineering has been working to achieve ABET accreditation and an important aspect of accreditation is compliance with the Student Outcomes. With the aim of developing skills in the student and being able to comply with the Student Outcome 7, which is related to the acquisition and application of new knowledge, a learning experience related to the tuning of PID controllers has been proposed. In a team activity, students are asked to analyze a specific process available on the LoopPro platform, which emulates a real plant environment. Students are asked to adjust a PID controller using tuning rules discussed in class, and contrast with another rule explored in indexed journal articles or specialized books. Students must indicate the advantages associated with the compared tuning rules, in addition to reviewing other aspects of interest that involve the application of concepts and previous knowledge such as stabilization time of the controlled variable, decay ratio, work of the final control element, among others. It is considered that the proposed exercise is appropriate for the development of the Student Outcome 7 and allows the student to acquire skills that favor active learning and promote metacognition.

Keywords: *Student Outcome 7; process control; PID controller tuning*

1. Introducción

El curso de control de procesos que se imparte en la Universidad Pontificia Bolivariana, sede Medellín, es de 3 créditos académicos, con 64 horas de acompañamiento directo del docente y 80 horas de trabajo autónomo del estudiante durante el semestre, el cual comprende 16 semanas (Universidad Pontificia Bolivariana, 2022). Este curso está en el noveno semestre de la carrera de ingeniería química, tal como se muestra en la malla curricular que aparece en la Figura 1.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
PREGRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA
DISTRIBUCIÓN SEMESTRAL DE CURSOS: MALLA CURRICULAR
MALLA MODELO
Agosto de 2017

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Lenguaje y Cultura 2	Humanismo y Cultura ciudadana 2 Cristología 2		Ética general 1	Línea de Formación Humanista I 2 Emprendimiento y Responsabilidad social 2		Línea de Formación Humanista II 2		Ética Profesional 1	Línea de Formación Humanista III 2
Cálculo Diferencial 3	Álgebra Lineal 3	Cálculo Vectorial 3			Créditos optativos CBD 3				
Geometría Analítica 3	Cálculo Integral 3	Ecuaciones Diferenciales 3							
Fundamentos de Química 3	Física Mecánica 3	Electricidad y magnetismo 3 Métodos experimentales en Física 2							
Introducción a la Ingeniería Química 1	Química Orgánica I 3	Química Orgánica II 3	Bioquímica 2	Termodinámica clásica 3	Termodinámica Química 4		Operaciones de transferencia de masa 3	Diseño de Procesos 3	
Diseño de producto 2			Laboratorio Oca Orgánica y Bioquímica 2	Química Analítica 3	Laboratorio de Termodinámica 1	Tecnología de Partículas 3		Control de Procesos 3	
			Fisicoquímica 3	Laboratorio de Química Analítica 2		Laboratorio de Operaciones Unitarias: Calor y Momentum 2	Laboratorio de Operaciones Unitarias: Calor y Masa 2	Laboratorio de Ingeniería de Procesos 2	
			Mecánica de Fluidos para Ingenieros Químicos 3	Fenómenos de transporte 3	Transferencia de Calor y Masa 3		Ingeniería de las reacciones químicas 3		Práctica Profesional (modalidades elegibles) 11
		Elementos de programación 2	Métodos Numéricos para Ingenieros de Proceso 3		Balances en procesos de ingeniería química 3		Laboratorio de Ingeniería de las reacciones químicas 2		
			Estadística y Diseño de experimentos 3	Metodología de Investigación (Práctica profesional obligatorio I) 1		Preparación y Evaluación de Proyectos 3	Gestión de proyectos (Práctica profesional obligatorio II) 3	Contexto profesional (Práctica profesional obligatorio III) 1	
						Optativo CP I (Ruta optativa de formación) 3		Optativo CP II (Ruta optativa de formación) 3	
							Optativo CI I (Ruta optativa de formación) 3	Optativo CI II (Ruta optativa de formación) 3	Optativo CI III (Ruta optativa de formación) 3
					Electivo I 3	Electivo II 3			

Figura 1. Ubicación del curso de control de procesos dentro de la malla curricular de la carrera de ingeniería química de la UPB

El programa de ingeniería química de la Universidad Pontificia Bolivariana ha iniciado un proceso de actualización curricular para optar a la acreditación internacional ABET.

ABET espera que para el Student Outcome 7 el estudiante esté en capacidad de adquirir y aplicar nuevo conocimiento según lo requiera, utilizando estrategias de aprendizaje adecuadas.

Para contribuir al desarrollo de dicho Student Outcome 7, desde el curso de Control de Procesos se implementó un ejercicio de sintonía de controladores PID, que permite fomentar un indicador en donde el estudiante resuelve de manera adecuada el problema enfrentado basado con el nuevo conocimiento adquirido.

Muchas tareas de aprendizaje y control de retroalimentación automática realizadas en muchos sistemas dinámicos todavía se basan fundamentalmente en una forma de ley de control proporcional-integral-derivativo (PID). La evidencia muestra que esta ley de control sigue vigente y que además el proceso para ajustar el algoritmo PID para un control de lazo cerrado preciso y estable se convierte en un problema complejo (Somefun, Akingbade, & Dahunsi, 2021).

Por lo tanto, el rendimiento de un sistema de control retroalimentado en lazo cerrado en términos de precisión y estabilidad es fundamental, lo cual sumado a un buen diseño se convierte en una inversión real que ahorra dinero y salva vidas (Somefun et al., 2021).

A pesar del auge del software de sintonización industrial, la mayoría de los lazos controlados por PID en tiempo real en funcionamiento se comportan mal después de un tiempo y necesitan volver a



sintonizarse, lo que a menudo aumenta los costos de mantenimiento del lazo. Es por ello que se vislumbra la necesidad de revisar la teoría del diseño de control PID.

Los métodos de sintonización de controladores PID se pueden clasificar en tres enfoques generales basados en el concepto de un modelo para describir o representar el sistema que se va a controlar, bien sea en lazo cerrado o en lazo abierto. El primero comprende métodos basados en modelos de plantas, que requieren la identificación de una estructura de modelo de planta y el conocimiento de sus parámetros para el ajuste. Estos métodos pueden o no estar basados en datos; el segundo consiste en métodos sin modelo de planta, que son enfoques puramente basados en datos con optimización para el ajuste; y el tercero, métodos híbridos, que combinan conocimiento a priori del modelo de planta con enfoques de ajuste basados en datos.

En particular, el tiempo de asentamiento y el tiempo muerto son elementos clave para llegar a seleccionar un método y una buena sintonía de control.

Autores como Leva y Papadopoulos (2013) recomiendan la implementación de actividades para sensibilizar a los alumnos sobre la lógica de las reglas de sintonía de controladores, para que comprendan las características dinámicas del proceso controlado, y los objetivos a alcanzar. De esta forma se logra que los estudiantes se empoderen en el uso consciente de las reglas de sintonía, y apropien nuevas herramientas conceptuales que los hagan autónomos para que el proceso de sintonía no sea el seguimiento de una receta (Leva & Papadopoulos, 2013).

En contraste, la cantidad de reglas de sintonía de controladores disponibles en la literatura es especialmente numerosa, por lo que las actividades que se propongan para incentivar el aprendizaje de los estudiantes deben tener cuidado desde el principio en distinguir entre una regla y un procedimiento de ajuste, ya que el enfoque está más dado a este último. Finalmente, se espera orientar el trabajo de los estudiantes a comprender las ideas subyacentes a la sintonía y luego a ver las reglas, por lo que se concibe como fundamental la descripción del proceso antes de realizar cualquier procedimiento de sintonía.

Lewin y Barzilai (2022) defienden el aprendizaje activo y significativo del control de procesos y soportan con estadísticas sofisticadas el mejoramiento del aprendizaje, hacen explícita la necesidad de aprender a sintonizar controladores PID y de obtener modelos para tal fin, a pesar del tiempo y el esfuerzo adicionales percibidos que se requieren para implementar cambios en los enfoques de enseñanza (Lewin & Barzilai, 2022).

Así mismo, Gasca-Taba y Machuca-Martínez (2020) ilustran la aplicación del programa Loop Pro 2020 para sintonizar un proceso real de alta complejidad en una industria colombiana como lo es el domo de una caldera acuotubular, para conocer en detalle el comportamiento del nivel y presión y su influencia en la operación de la caldera, lo que evidencia su pertinencia (Gasca-Taba & Machuca-Martínez, 2020).



2. Metodología

El Software LoopPro para control de procesos permite al usuario el entrenamiento con controladores PID y la sintonía de estos, emulando un ambiente real de planta, pues en la plataforma LoopPro se cuenta con diversos procesos industriales que pueden ser revisados.

En aula de clase se analiza un proceso de descarga de tanques, el cual está disponible en la plataforma LoopPro. El objetivo es obtener los parámetros de sintonía de controladores PID mediante Ziegler-Nichols tanto para lazo abierto y lazo cerrado.

Con base en lo que la plataforma de LoopPro puede ofrecer, se propone un ejercicio con el objetivo de verificar uno de los criterios planteados por el programa de Ingeniería Química de la Universidad Pontificia Bolivariana para *Student Outcome 7*, el cual está relacionado con la adquisición y aplicación de nuevo conocimiento. A continuación, se muestra el criterio y los tres niveles a evaluar.

Tabla 1. Criterio a evaluar del *Student Outcome 7*

Criterio	Descriptorios		
	En desarrollo	Satisfactorio	Ejemplar
Resuelvo de manera adecuada el problema enfrentado basado con el nuevo conocimiento adquirido	Comprende la relación básica entre el objetivo del problema planteado y los conocimientos previos.	Aplica conocimientos previos que le permiten establecer una relación básica del objetivo del problema planteado.	Analiza el impacto de la aplicación de los conocimientos previos permitiendo establecer una relación relevante con el objetivo del problema planteado y haciendo uso de sus conocimientos, autonomía, habilidades y capacidades.

Para este caso se considera la simulación de un intercambiador de calor, puesto que es un proceso más complejo que el estudiado en clase, como lo sugiere (Smith & Corripio, 2014).

Las pautas para el desarrollo de esta actividad se entregan en un documento en Word al estudiante y se lleva a cabo por equipos conformados por dos personas. En primera instancia se solicita que sintonice el controlador PID según Ziegler – Nichols para lazo abierto o lazo cerrado. Para lazo abierto (el controlador en modo “manual”) se aplica un cambio escalón en la señal de salida del controlador y de la respuesta de la variable de proceso frente al tiempo se obtiene el tiempo muerto (tiempo de inactividad), la constante de tiempo y la ganancia. Para lazo cerrado el controlador debe estar en modo “automático” y con oscilación sostenida se obtiene la ganancia última (K_{cu}) y el período último (T_u). Con la información para cualquiera de los dos casos pueden estimarse los valores de los diferentes parámetros de los controladores PID según ecuaciones dadas por Ziegler y Nichols (Smith & Corripio, 2014). Para la segunda parte de este ejercicio, se sugiere que se opere el controlador en el modo P, PI ó PID aplicando:

- las reglas de sintonía vistas en clase
- sintonía propuesta en la plataforma LoopPro la cual se basa en el método lambda o de síntesis directa, donde se sugiere probar reglas de sintonía agresivas y moderadas
- las reglas de sintonía que el estudiante ha consultado previamente siguiendo las instrucciones de la actividad



Con base en la comparación de los comportamientos para los diferentes métodos de sintonía que los estudiantes han trabajado como también en los resultados de tiempo de estabilización y razón de decaimiento, el estudiante puede tomar decisiones y discernir cual de las reglas resulta más apropiada.

3. Resultados

Para el ejercicio se revisa el proceso de calentamiento de un fluido mediante un intercambiador de calor. En la Figura 2 se muestra el comportamiento cuando se modifica la señal de salida de controlador de 39 a 30%, con base en este comportamiento se obtienen los parámetros de sintonía en lazo abierto. Cabe aclarar que se muestra los resultados una de las parejas, pero también algunos grupos realizaron la sintonía con base en resultados de lazo cerrado.

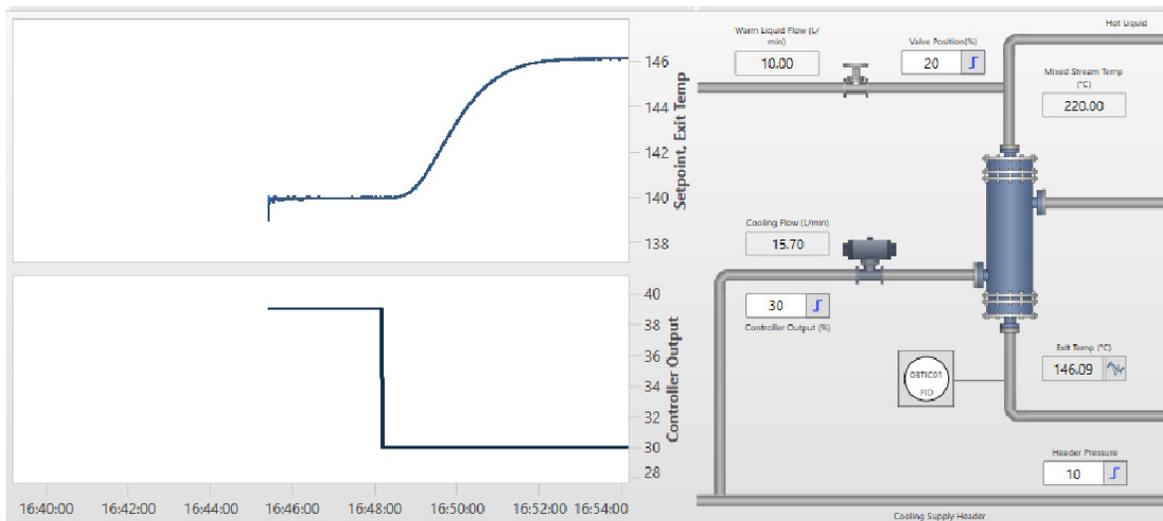


Figura 2. Comportamiento de la variable de proceso cuando se realiza un cambio escalón

Con la información que se muestra en la Figura 2 y mediante el ajuste a un modelo de primer orden con el método de prueba escalón (Smith & Corripio, 2014) se obtienen los valores de tiempo muerto (t_0), la constante de tiempo (τ) y la ganancia (k). Estos valores se pueden observar en la Figura 3, donde además se muestran los resultados para los parámetros de sintonía para un controlador proporcional puro (P) y un controlador proporcional – integral (PI) que se obtienen al reemplazar los valores de tiempo muerto (t_0), la constante de tiempo (τ) y la ganancia (k) en las ecuaciones dadas por Ziegler – Nichols para la sintonía de controladores PID retroalimentados (Smith & Corripio, 2014).

K	τ	t_0		
1.131	2.1	0.9746		
P	K_c	1.90515486		
PI	K_c	1.71463937	τ_i	3.245418

Figura 3. Valores de tiempo muerto (t_0), la constante de tiempo (τ) y la ganancia(k) y valores de los parámetros para un controlador P y PI sintonizado según Ziegler - Nichols

Hasta acá se muestra que el estudiante no ha aplicado nuevo conocimiento porque la sintonía que ha realizado lo ha hecho de acuerdo a lo visto en el aula de clase. Para este caso, esta pareja de estudiantes emplea una regla de sintonía propuesta por González (Morilla, 2006) y así comparar resultados entre las diferentes reglas de sintonía. En la Figura 4 se ilustra las expresiones de los parámetros de un controlador proporcional-integral (PI) y los valores obtenidos para la ganancia proporcional (K_c en la Figura 3, K_p en la Figura 4) y el tiempo integral (T_i ó τ_i). En las ecuaciones que aparecen en la Figura 3, δ se refiere a la razón de amortiguamiento o razón de decaimiento.

Controlador	Parámetros	Ajuste por coeficiente de amortiguamiento (δ)
PI	ω_n	$-\frac{2\delta}{T_0} + \sqrt{\frac{4\delta^2}{T_0^2} + \frac{2}{T_p T_0}}$
	K_p	$\frac{\omega_n^2 T_p T_0}{2K}$
	T_i	$\frac{T_0}{2}$

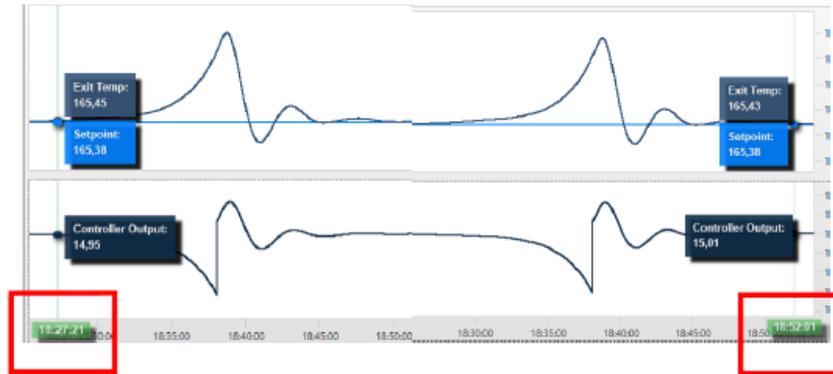
K	τ	t_0
1.131	2.1	0.9746

ω_n	0.42781079
K_p	0.37458396
T_i	1.05

Figura 4. Expresiones de los parámetros de sintonía y valores de estos parámetros para un controlador PI sintonizado según González (Morilla, 2006).



La Figura 5 muestra el comportamiento de la variable de proceso cuando se emplea un controlador PI ajustado según Ziegler – Nichols, mientras que la Figura 6 muestra el comportamiento cuando se emplea un controlador ajustado con la regla propuesta por González.

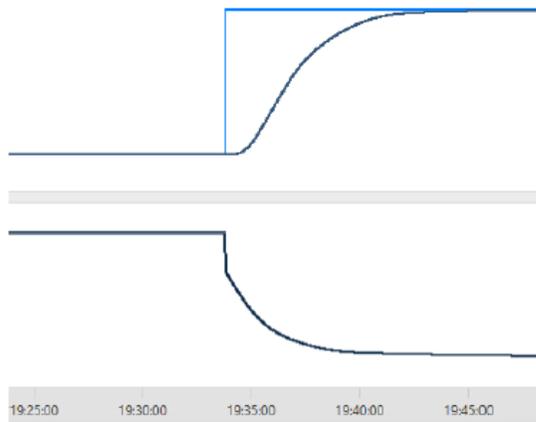


Tiempo de estabilización:

25 minutos desde que se hace la perturbación hasta que se estabiliza la curva (inicia la perturbación – 18:52 termina la perturbación).

Figura 5. Tiempo de estabilización y comportamiento de la variable de proceso para controlador ajustado según método de Ziegler – Nichols

Con las nuevas reglas se tiene el siguiente ajuste:



Aquí el tiempo de estabilización es: de 13 minutos.

Figura 6. Tiempo de estabilización y comportamiento de la variable de proceso para controlador ajustado según método de González

Se considera que este ejercicio favorece el aprendizaje activo dado que el estudiante está interpretando información tanto de conocimientos previos como de nuevo conocimiento, además el empleo de la plataforma LoopPro, que emula un ambiente real de planta, permite que el estudiante se involucre con el proceso y en tiempo real esté observando el comportamiento de la variable y la

incidencia de las decisiones que el estudiante toma. Lo anterior está en consonancia con lo expuesto por Lewin y Barzilai (2022) quienes resaltan la importancia del aprendizaje significativo en el control de procesos y su relación con la sintonía de controladores PID.

Para conocer la percepción de los estudiantes frente a este ejercicio, se les pidió valorar en una escala de 1 a 5, donde 5 es el valor más alto, su percepción sobre la actividad desarrollada haciendo énfasis en la adquisición de nuevo conocimiento sobre métodos de sintonía tal como se muestra en la Figura 7.

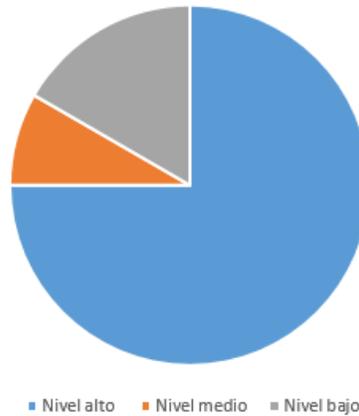


Figura 7. Discernimiento de cual método de sintonía es mejor. Nivel alto (valores 4 y 5), nivel medio (valor 3) y nivel bajo (valores 1 y 2)

Adicionalmente, se plantearon preguntas abiertas con el objetivo de conocer la opinión con respecto a una plataforma virtual que emula la situación en la planta de procesos y el entendimiento del tema de sintonía de controladores. La Tabla 2 muestra lo expresado por algunos estudiantes. La encuesta se realizó con estudiantes del primer semestre de 2022.

Tabla 2. Comentarios de los estudiantes frente al ejercicio planteado

Indique su percepción del empleo de un software, que emula un ambiente real de planta, para estudiar la sintonía de controladores PID	¿El desarrollo de este taller le ha permitido un mejor entendimiento de la sintonía de controladores?
Considero que el software es muy bueno y se debe seguir usando en esta materia, porque muestra cómo se puede comportar un proceso industrial en la realidad. Considero que el uso de un software es importante ya que simula las condiciones a las que opera una planta, por lo tanto aumenta la comprensión de este tipo de procesos Es adecuado para simular ambientes de trabajo reales y ayuda a plasmar los conceptos vistos en clase y detectar falencias en la comprensión y aplicación de estos.	Sí, entendí mejor cómo se comporta la respuesta de un controlador cuando se cambia alguna variable del proceso, y cómo funciona la sintonía del controlador para que el proceso vuelva a ser estable. Si, ya que permitió aclarar conceptos y ver qué influye en las variables Sí, el taller fue una actividad de aplicación y fortalecimiento de los conceptos aprendidos en clase. Es interesante la integración realizada sobre el tema de sintonía de controladores en los cursos de control de procesos y diseño de procesos.

De acuerdo a lo indicado por Somefun (2021), este tipo de ejercicios en el cual el estudiante se enfrenta a la sintonía de controladores es de importancia porque la mayoría de los lazos controlados por PID en tiempo real en funcionamiento se comportan mal después de un tiempo y necesitan volver a sintonizar, lo cual implica que el ingeniero debe adquirir las bases y tener la destreza para enfrentarse a estas situaciones.

4. Oportunidades de mejora

De acuerdo a lo observado en este ejercicio, se sugiere las siguientes oportunidades de mejora, teniendo en cuenta que el objetivo principal es desarrollar destrezas en el estudiante para cumplir con el *Student Outcome 7*:

- Direccional al estudiante para que en el desarrollo de la actividad seleccione métodos de sintonía provenientes de publicaciones técnicas recientes, lo cual le permitirá enfrentarse a nuevo conocimiento.
- Durante el desarrollo del curso de control de procesos ampliar el concepto de regla de sintonía y heurísticas para sintonía de manera que el estudiante pueda discernir sobre la conveniencia de aplicar alguna de ellas en la solución de un problema de control.
- Ampliar el ejercicio para la aplicación de otros conceptos relacionados con controladores PID en donde el estudiante realice una revisión de literatura y contraste con la fundamentación vista en clase.

5. Conclusiones

Se logró el diseño e implementación de un ejercicio de sintonía de controladores PID en el curso de control de procesos del programa de Ingeniería Química para fomentar el *Student Outcome 7* de ABET relacionado con la adquisición y aplicación de nuevo conocimiento. Se observó que el estudiante aplicó los conocimientos previos y empleando el software LoopPro logró evaluar diferentes métodos de sintonía, fortaleció su capacidad para la interpretación de datos y afianzar en conceptos del control de procesos de forma autónoma.

La percepción de los estudiantes respecto a la actividad propuesta fue valorada como positiva en un 75% y en sus comentarios se identificaron acciones de mejora que servirán como retroalimentación en las siguientes experiencias de aplicación de esta actividad en el curso de control de procesos.

6. Referencias

- Gasca-Taba, O., & Machuca-Martínez, F. (2020). Simulación del control nivel y presión en el domo de una caldera acuotubular usando Control Station® (LOOP-PRO). *Respuestas*, 25(3). <https://doi.org/10.22463/0122820X.2803>
- Leva, A., & Papadopoulos, A. V. (2013). Teaching a conscious use of PI/PID tuning rules. *IFAC*



- Proceedings Volumes*, 46(17), 25–30. <https://doi.org/10.3182/20130828-3-UK-2039.00007>
- Lewin, D. R., & Barzilai, A. (2022). The flip side of teaching process design and process control to chemical engineering undergraduates – And completely online to boot. *Education for Chemical Engineers*, 39, 44–57. <https://doi.org/10.1016/j.ece.2022.02.003>
 - Morilla, F. (2006). Controladores PID: Ajuste Empírico.
 - Smith, C., & Corripio, A. (2014). *Control automático de procesos: Teoría y práctica*. (Limusa Wiley, Ed.) (2nd ed.). México: Limusa Wiley.
 - Somefun, O. A., Akingbade, K., & Dahunsi, F. (2021). The dilemma of PID tuning. *Annual Reviews in Control*, 52, 65–74. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2021.05.002>
 - Universidad Pontificia Bolivariana. (2022). Ingeniería Química en Medellín. Retrieved June 10, 2022, from <https://www.upb.edu.co/es/pregrados/ingenieria-quimica-medellin>

Sobre los autores

- **Hader Alzate Gil:** Ingeniero Químico, Doctor en Ingeniería - Área Materiales – de la Universidad Pontificia Bolivariana. Profesor titular. hader.alzate@upb.edu.co
- **Carlos Ocampo López:** Ingeniero Químico, Doctor en Ingeniería - Área energía y Termodinámica – de la Universidad Pontificia Bolivariana. Profesor Titular. carlos.ocampo@upb.edu.co
- **Fabio Castrillón Hernández:** Ingeniero Químico, Magister en Ingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana. Profesor titular. fabio.castrillon@upb.edu.co

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2022 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)

