

Análisis exploratorio del desempeño de esquemas de control clásico y avanzado. Caso de estudio: Reactores para la producción de bioetanol



Colaboración

Elena Elsa Bricio-Barrios, Tecnológico Nacional de México / campus de Colima; Héctor Hernández-Escoto; Fernando López-Caamal; Salvador Hernández-Castro Universidad de Guanajuato; Santiago Arceo-Díaz, Tecnológico Nacional de México / campus de Colima

Fecha de recepción: 26 de noviembre de 2025

Fecha de aceptación: 04 de diciembre de 2025

RESUMEN: Este trabajo presenta la evaluación, mediante modelado numérico, del desempeño de un controlador PI sometido a perturbaciones térmicas simples y múltiples, comparando una técnica de sintonización analítica clásica por asignación de polos con una estrategia avanzada basada en redes neuronales. Los resultados muestran que este sistema altamente no lineal no requiere ser abordado directamente mediante estrategias avanzadas, sino que primero deben evaluarse los métodos clásicos. Por ejemplo, la asignación de polos no solo alcanzó un desempeño comparable al esquema basado en redes neuronales, sino que además no requiere poder de cómputo ni, en muchas ocasiones, software especializado para la obtención de las ganancias del controlador, las cuales pueden calcularse a papel y lápiz. Este resultado ejemplifica cómo un sistema altamente no lineal puede describirse mediante estrategias clásicas, favoreciendo el pensamiento crítico.

PALABRAS CLAVE: Bioetanol, Bioreactor continuo de tanque agitado, Controlador PI, método de asignación por polos, sintonización sistemática.

ABSTRACT: This study presents a numerical modeling-based evaluation of the performance of a PI controller subjected to single and multiple thermal disturbances, comparing a classical analytical tuning technique based on pole placement with an advanced strategy using neural networks. The results show that this highly nonlinear system does not need to be addressed directly through advanced strategies, but rather that classical methods should first be evaluated. For example, the pole-placement approach not only achieved performance comparable to the neural-network-based scheme, but also does not require computational power nor, in many cases, specialized software for determining the controller gains, which can be calculated using pencil and paper. This outcome illustrates how a highly nonlinear system can be described through classical strategies, promoting critical thinking.

KEYWORDS: Bioethanol, continuously stirred tank bioreactor, PI-controller, systematic tuning, pole-placement-method.

INTRODUCCIÓN

En el año 2023, el 81.5 % de la energía mundial se obtuvo de fuentes no renovables como el petróleo, el gas natural y el carbón, lo que sigue afectando los sistemas ambiental, social, económico y político [1].

En México, la gasolina representa el tercer mayor gasto en los hogares, sólo por debajo de la alimentación y la educación [2]. Aunque los vehículos eléctricos e híbridos han contribuido a reducir la demanda global de gasolina, su adopción en el país ha sido limitada: en 2022 representaron apenas el 5.3 % del parque vehicular [3]. Esta área de oportunidad ha impulsado la búsqueda de alternativas energéticas, entre las cuales el bioetanol ha sido una de las principales apuestas [4].

Inicialmente, la producción de bioetanol en México estuvo ligada al uso de maíz destinado al consumo humano, lo que generó preocupación por su impacto potencial en la seguridad alimentaria, dado que el maíz es un alimento básico en la dieta nacional. Como respuesta, se impulsó el uso de cultivos específicos destinados exclusivamente a la producción energética. Posteriormente, la atención se orientó hacia fuentes más sostenibles, como residuos agrícolas (incluidos los del propio maíz), biomasa forestal y desechos orgánicos provenientes de mercados y tianguis locales [5].

El bioetanol, también conocido como alcohol carburante, se obtiene por fermentación de azúcares reductores a partir de diversas materias primas. Su viabilidad operativa en procesos de fermentación continua depende del control preciso de variables clave como la dosificación de biomasa, sustrato y producto [6]. El aprovechamiento de residuos orgánicos no destinados a la alimentación humana ha permitido reducir la presión sobre los cultivos alimentarios y ha mejorado la factibilidad ambiental y económica de este biocombustible como sustituto parcial de la gasolina.

El control de temperatura de la mezcla reaccionante en el interior del térmico tiene un efecto directo en la estabilidad del sistema y la tasa de crecimiento microbiano [7]. Esta variable, además de ser manipulable, puede alterar la dinámica del proceso sin modificar el medio. Por tanto, la incorporación de un esquema de control de temperatura es indispensable en esta operación unitaria.

Por otro lado, el proceso de fermentación y control de temperatura ha sido descrito eficientemente mediante modelos matemáticos. En específico, Nagy en [8] propuso un modelo basado en redes neuronales con acción de corrección en línea, que superó a controladores PID sintonizado por Ziegler-Nichols y lineales tradicionales.

Las redes neuronales artificiales son modelos computacionales inspirados en el funcionamiento del cerebro humano. Su estructura se basa en capas de nodos interconectados, denominados neuronas artificiales, que procesan información mediante funciones de activación y conexiones ponderadas. Estas redes aprenden a reconocer patrones complejos ajustando

iterativamente los pesos sinápticos entre neuronas durante un proceso de entrenamiento supervisado o no supervisado. Gracias a esta capacidad, se han aplicado con éxito en tareas como clasificación de señales, predicción de series temporales, reconocimiento de voz e imágenes, entre otras [9].

En el área del control automático, las redes neuronales han sido empleadas para la sintonización en línea de controladores, como los de tipo PID o PI. En esta configuración, la red neuronal actúa como un módulo adaptativo que recibe información del estado del sistema en tiempo real y ajusta dinámicamente los parámetros del controlador (ganancias proporcional, integral y derivativa), de modo que se optimice su respuesta frente a perturbaciones o cambios en las condiciones de operación [8].

No obstante, su implementación presenta áreas de oportunidad respecto a métodos tradicionales de sintonización como el entrenamiento efectivo de una red neuronal que requiere una cantidad considerable de datos experimentales representativos del sistema, así como la demanda computacional para entrenar el modelo y su validación cruzada. A ello se suma la dificultad de interpretación: las redes neuronales son comúnmente consideradas "cajas negras", lo que limita la comprensión directa de su lógica interna y complica su validación en entornos regulados o de misión crítica [10].

Por otro lado, las redes son sensibles a problemas como el sobreajuste y la mala escalabilidad de datos, lo que puede comprometer la robustez del controlador adaptativo. Finalmente, su demanda computacional es considerablemente mayor que la de métodos heurísticos clásicos como Ziegler-Nichols, Cohen-Coon o técnicas basadas en asignación de polos que son menos flexibles pero su implementación es analítica y relativa facilidad de implementación en sistemas industriales con recursos limitados [11].

El desempeño del esquema de control dependerá en gran medida de la sintonización de los parámetros [8]. No obstante autores como, Somefun y cols. en [12] señalan que la inversión en esta etapa repercute directamente en el costo del proceso, por tanto, es de interés evaluar el desempeño de estrategias de sintonización clásicas y avanzadas en un sistema altamente no lineal, como lo es un bioreactor de tanque agitado en operación continua,

Este trabajo propone una estrategia de control de temperatura para reactores continuos mediante un controlador PI lineal sintonizado con la técnica de asignación de polos estables, la cual ha mostrado alto desempeño en sistemas altamente no lineales como procesos fermentativos y columnas de destilación [12, 13].

MATERIAL Y MÉTODOS

Modelo matemático

Se seleccionó el modelo matemático de Nagy en [8], que describe un bioreactor de tanque agitado con chaqueta de enfriamiento operado en régimen continuo, donde se fermentan azúcares reductores para producir bioetanol (Figura 1).

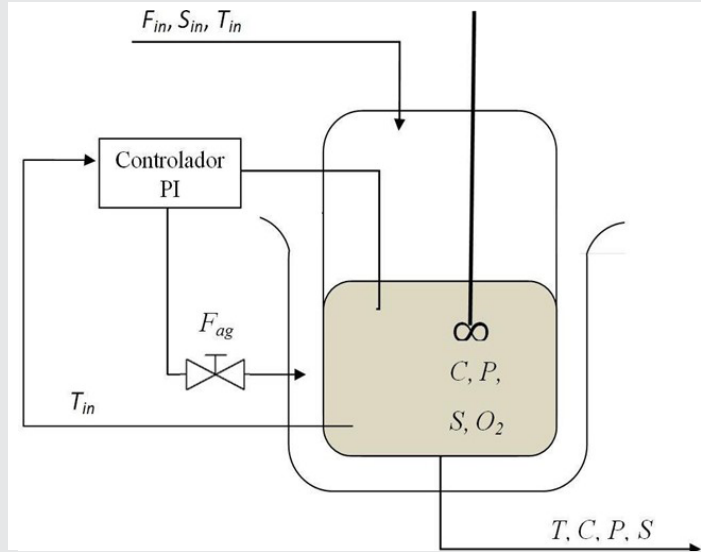


Figura 1. Diagrama de un bioreactor de tanque agitado en operación continua.

Fuente: Elaboración propia.

El modelo descrito mediante siete ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales, los balances de materia y energía, junto con relaciones cinéticas tipo Monod que consideran la inhibición por etanol y la influencia de los nutrientes. El espacio de estados, entradas, salidas y perturbaciones se muestran en la Ec. 1.

$$\dot{x} = r(x, d) + \Pi \cdot \frac{F_J}{V_J} (T_{J,in} - T_J), \quad x(0) = x_0; \quad y_T = T$$

$$\text{donde } x = (C, S, P, O_2, V, T, T_J), \quad d = (F_{in}, F_{out}, S_{in}, T_{in}) \quad (\text{Ec } 1)$$

$$r(\circ) = \left(r_C(x, d), r_S(x, d), \dots, r_T(x, d), r_{T_J}(x, d) \right),$$

donde los estados del sistema (x), corresponden a la concentración de biomasa (C), sustrato (S), producto (P), oxígeno disuelto (O_2) y volumen del reactor (V), y los fenómenos térmicos: temperatura del reactor (T) y de la chaqueta (T_J). Mientras que, las perturbaciones externas (d) como los flujos de entrada y salida (F_{in}, F_{out}), la concentración de azúcar en la alimentación (S_{in}) y la temperatura de entrada (T_{in}). El término $r(\circ)$ representa el vector de tasas de reacción dependientes de los estados y entradas, asociado a procesos como crecimiento microbiano, consumo de sustrato, producción de producto y transferencia de oxígeno.

Con base al trabajo realizado por Nagy en [8] se incorporaron las condiciones iniciales: $(C, S, P, O_2, V, T, T_J) = (0.9047 \text{ g/L}, 29.7389 \text{ g/L}, 12.5152 \text{ g/L}, 3.1695 \text{ g/L}, 1000 \text{ L}, 29.5732 \text{ }^\circ\text{C}, 27.0539 \text{ }^\circ\text{C})$ y las condiciones de operación fueron: $(F_{in}, F_{out}, S_{in}, T_{in}, T_{J,in}) = (51 \text{ L/h}, 51 \text{ L/h}, 60 \text{ g/L}, 25 \text{ }^\circ\text{C}, 15 \text{ }^\circ\text{C})$.

El Sistema de Control

Se consideró un controlador lineal de tipo Proporcional-Integral (PI) expresado mediante la Ec. 2 :

$$F_J(t) = \bar{F}_J + K_C \cdot (\bar{T} - y_T(t)) + \frac{K_C}{\tau_I} \int_0^t (\bar{T} - y_T(t)) \cdot d\tau \quad (\text{Ec } 2)$$

donde $u(t)$ representa la señal de control (en este caso, el flujo de fluido en la chaqueta (F_J), y $e(t)$ es el error entre la temperatura deseada y la temperatura actual del reactor y, de este modo, la temperatura del reactor (T), o su medición (y_T) converja hacia un valor de referencia, utilizando como punto de partida el valor nominal de F_J .

Estrategia de sintonización de parámetros

Para describir la dinámica del sistema, se observa que la naturaleza no lineal de la Ec. 1 donde se observa que el grado relativo entre T y T_J es dos, permitiendo modelar el sistemas a un modelo de segundo orden sobreamortiguado.

A continuación, se evaluó la técnica de sintonización propuesta por Zavala en [13] descrita en la Ec. 3:

$$K_C = \frac{2n-1}{K_P} \tau_I = \tau_P \cdot (\xi_R)^2 \cdot \left(\frac{2n-1}{n^2} \right) \quad (\text{Ec } 3)$$

donde la ganancia de proceso (K_P) y la constante de tiempo (τ_P) es la sensibilidad y velocidad de respuesta de control, el factor de amortiguamiento deseado (ξ_R) y el parámetro n .

Si bien, el valor de ξ_R es una variable de libre elección, es sabido que magnitudes bajas generan respuestas más rápidas pero con sobreoscilaciones, mientras que valores altos generarán una respuesta más suave pero el retorno al valor deseado será más lento [11].

Por otro lado, el parámetro n define cuántas veces más rápido se desea que responda el sistema controlado respecto al original, modulando así las oscilaciones abruptas del controlador.

Perturbaciones externas

Para evaluar el desempeño de las estrategias de sintonización de las redes neuronales respecto a la asignación de polo se propusieron dos escenarios:

i) Cambio de valor de referencia (set-point) en la temperatura del reactor donde se construyó una perturbación de temperatura $23 \text{ }^\circ\text{C}$ a $25 \text{ }^\circ\text{C}$, equivalente a una

actividad microbiana excesiva ocasionada por factores externos como dosificación excesiva de nutrientes ricos en fuentes de azúcares de fácil reducción [15].

ii) Control regulatorio frente a perturbaciones se creó un conjunto de perturbaciones de tipo escalón donde se pretende que la acción de control retorne al valor preasignado. Tras permanecer a 29 °C durante 50 horas, se pretende que el sistema alcance 32 °C durante 300 horas. A continuación, la temperatura retorna a la temperatura inicial otras 300 horas y desciende a hasta 27 °C.

RESULTADOS

Control de temperatura ante cambios en el set-point

Para contrarrestar esta perturbación, se aplicó nuevamente el controlador PI con la técnica de sintonización por asignación de polos. Como primera etapa, se evaluó el efecto del parámetro n ($n=1$ vs $n=10$), en la dinámica transitoria de este caso de estudio. La Figura 2 muestra en la parte superior la acción del flujo de refrigeración ante dicha perturbación y, en la inferior, cómo afecta la concentración de producto.

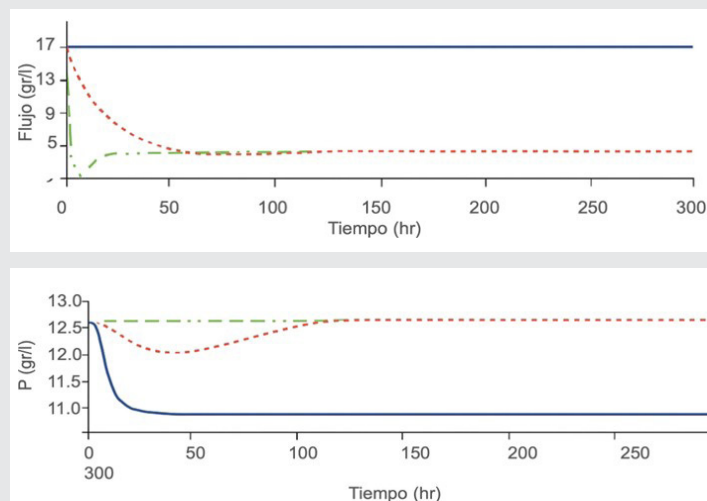


Figura 2. Desempeño del sistema ante una perturbación de temperatura en el interior del reactor. La línea azul corresponde al sistema en lazo abierto, la roja es $n=1$ y el verde es $n=10$. Fuente: Elaboración propia.

En la parte superior de la Figura 2 se muestra la respuesta del flujo de refrigerante. Al aumentar el parámetro n , el sistema mejora su capacidad para rechazar rápidamente la perturbación térmica. Esto se refleja en una respuesta más rápida y estable del sistema controlado con $n = 10$, en comparación con $n = 1$, el cual presenta una desaceleración más prolongada antes de alcanzar el valor de referencia.

No obstante, este aumento en el desempeño dinámico tiene un costo: la magnitud del flujo de refrigerante requerido es más abrupta cuando n sea alto. Esta

respuesta agresiva puede representar un riesgo práctico, ya que un incremento súbito y sostenido del flujo puede generar un desgaste acelerado del actuador de control, así como una posible afectación térmica sobre el cultivo microbiano, especialmente si se trata de levaduras sensibles a choques térmicos. En consecuencia, aunque valores altos de n mejoran la velocidad de respuesta, su implementación debe evaluarse cuidadosamente en función de los límites operativos del sistema físico.

En la parte inferior de la Figura 2 se observa el comportamiento de la concentración del producto. Aquí también se evidencia que, aunque los tres escenarios convergen al mismo valor estacionario, los tiempos de estabilización difieren. El sistema en lazo abierto muestra oscilaciones prolongadas, mientras que $n = 10$ estabiliza la variable en menor tiempo. Sin embargo, se observa una caída inicial más pronunciada del producto en este caso, lo que puede traducirse en pérdida de rendimiento temporal.

Control Regulatorio frente a perturbaciones de tipo escalón

Establecido de forma estocástico, se eligió el parámetro $n = 1$, para ahora, establecer la robustez de la técnica de sintonización ante un sistema regulatorio. La Figura 3 muestra en la parte superior la temperatura en el interior del reactor y, en la inferior, la acción del flujo de refrigeración ante dicha perturbación.

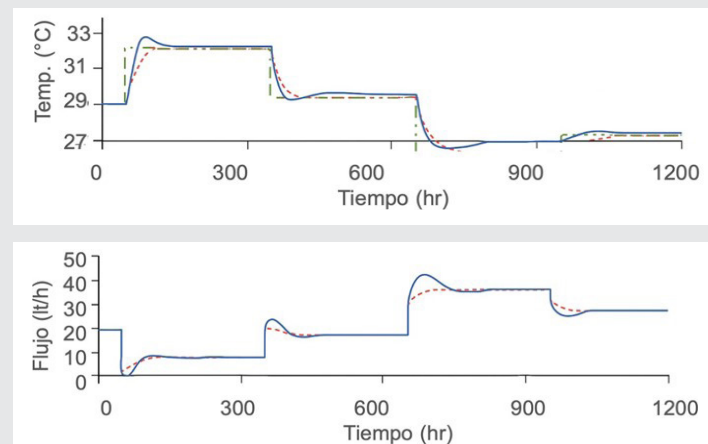


Figura 3. Desempeño de sistemas de control en escenarios de cambios de temperatura. La línea azul corresponde a las redes neuronales, la roja a la propuesta y el verde el set-point. Fuente: Elaboración propia.

En la parte superior de la Figura 3 se observa la evolución de la temperatura del reactor ante múltiples cambios escalonados en el set-point. Ambas estrategias de control presentan un desempeño comparable en términos de estabilidad y tiempo de establecimiento. Si bien el controlador basado en redes neuronales muestra una respuesta con un ligero sobreimpulso inicial (trayectoria sobrearmortiguada), y el controlador por

asignación de polos presenta una respuesta más rápida con menor sobreoscilación, en ambos casos el sistema logra alcanzar el valor deseado con precisión y en tiempos similares. Esto indica una buena capacidad de seguimiento del set-point bajo condiciones de operación variables.

En la parte inferior de la Figura 3 se representa la señal de control, es decir, el flujo del fluido refrigerante requerido para mantener la temperatura dentro de los valores establecidos. Se aprecia que el controlador sintonizado por asignación de polos genera una trayectoria de control más suave y menos exigente en comparación con el esquema basado en redes neuronales, el cual presenta picos más pronunciados y cambios abruptos en varios tramos del perfil.

Discusión

Este caso de estudio evaluó la regulación térmica en reactores de fermentación continua donde pequeñas oscilaciones de temperatura pueden comprometer la capacidad de replicación de la biomasa en el proceso fermentativo [ss].

El control de la temperatura en bioreactores es importante durante las fermentaciones y cultivos celulares para evitar sobrecalentamientos y oscilaciones que afecten negativamente el crecimiento microbiano. Aunque estos sistemas suelen clasificarse como lentos, los sobretiros de temperatura pueden poner en riesgo la capacidad de replicación de la biomasa y comprometer la estabilidad del lote. [16] Además, un sistema de calefacción y refrigeración eficiente debe mantener la uniformidad térmica para prevenir daños al metabolismo celular y asegurar la calidad del producto final. La temperatura influye directamente en la velocidad metabólica de la biomasa [17].

Lisci et al. en [18] reporta la importancia del control de temperatura: desde una perspectiva de bioprocesos, en sistemas con set-point se pretende mantener una variable del proceso (como temperatura, pH, oxígeno disuelto) en un valor objetivo específico y constante, que favorecerá el crecimiento de la biomasa a la par de asegurar la estabilidad y eficiencia del proceso. Mientras que, los sistemas regulatorios, buscan enviar la variable controlada dentro de un rango aceptable ante perturbaciones externas o internas inesperadas que puedan afectar el proceso, buscando resistir y corregir estas perturbaciones para minimizar su daños al producto o a la biomasa.

Un elemento clave en el desempeño de un controlador, es la sintonización de los parámetros. En este estudio se evaluó la asignación de polos respecto a las redes neuronales. El primer esquema se obtiene mediante un proceso analítico donde parámetros pueden ajustarse a partir de la respuesta del proceso, permitiendo controlar explícitamente el tiempo de establecimiento y el

grado de amortiguamiento para evitar sobretiros, incluso en sistemas altamente no lineales [13].

Por otro lado, las redes neuronales incorporan capacidad adaptativa al ajustar las ganancias en función del estado del sistema, lo que puede mejorar la respuesta transitoria ante perturbaciones externas. No obstante su desempeño depende del entrenamiento del modelo y de la variabilidad del proceso. Aunado a esto, aquellas personas que mostró en la construcción de estos esquemas suele emplear software especializado, así alta demanda de poder computacional, limitando significativamente el pensamiento crítico frente al caso de estudio [19].

CONCLUSIONES

Este trabajo evaluó el desempeño de dos estrategias de sintonización de parámetros para un controlador PI, orientadas a la regulación simple y múltiple de la temperatura en un reactor de fermentación continua.

Los resultados mostraron que la técnica basada en asignación de polos permite alcanzar el valor deseado de forma efectiva al incrementar el parámetro n . No obstante, valores excesivamente altos generan una respuesta sobreamortiguada, lo que puede aumentar el desgaste del actuador y comprometer su vida útil. En decir, un incremento moderado de n representa un compromiso adecuado entre velocidad de respuesta, estabilidad y esfuerzo de control. Por tanto, la selección óptima de este parámetro debe considerar el comportamiento dinámico esperado así como las limitaciones físicas y biológicas del proceso fermentativo.

Por otro lado, al comparar esta estrategia con la sintonización basada en redes neuronales en escenarios con múltiples perturbaciones térmicas, se observó que ambos enfoques logran estabilizar el sistema en tiempos similares. Estos resultados indican que, al menos para este caso de estudio, el método analítico clásico puede competir en desempeño con técnicas más avanzadas de control inteligente.

Desde una perspectiva práctica, la estrategia basada en asignación de polos mostró un comportamiento más suave en la señal de control, lo cual implica una menor exigencia sobre los actuadores, menor consumo energético y mayor viabilidad para su implementación en entornos industriales. Aunque ambos métodos resultan viables, esta ventaja operativa convierte al enfoque clásico en una alternativa robusta, eficiente y fácilmente aplicable para el control térmico de biorreactores en operación continua.

Como trabajo futuro, se plantea enriquecer la técnica de sintonización por asignación de polos mediante la incorporación de un algoritmo que proponga y evalúe de forma automática los valores óptimos de los parámetros de diseño, específicamente ξR y el parámetro

de rapidez relativa (n). De esta manera, se podrá abordar de forma simultánea el desempeño dinámico del sistema y el esfuerzo requerido por el actuador.

Para lograrlo, se plantea el uso de métodos de cálculo variacional que permitan definir una función objetivo compuesta por dos términos: uno asociado al cumplimiento del set-point (calidad del producto) y otro relacionado con la magnitud y variabilidad de la señal de control como el costo energético y desgaste del actuador.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Carbon Brief. (2024). Analysis: Wind and solar added more to global energy than any other source in 2023. <https://www.carbonbrief.org/analysis-wind-and-solar-added-more-to-global-energy-than-any-other-source-in-2023/>.
- [2] ENIGH. (2022). Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). <https://www.inegi.org.mx/programas/enigh/nc/2022/>.
- [3] Núñez, H. M. (2023). Building a bioethanol market in Mexico. *EconoQuantum*, 19(2), 21–56. <https://doi.org/10.18381/eq.v19i2.7258>.
- [4] Zabed, H., Sahu, J. N., Boyce, A. N., & Faruq, G. (2023). Recent developments in bioethanol production from lignocellulosic biomass: A review. *Bioresource Technology Reports*, 22, 101458. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101458>.
- [5] Deenanath, E. D., Iyuke, S., & Rumbold, K. (2012). The bioethanol industry in sub-Saharan Africa: history, challenges, and prospects. *Bio-Med Research International*, 2012(1), 416491.
- [6] López, P., Feldman, H., Mauricio-Iglesias, M., Junicke, H., Huusom, J. K., & Gernaey, K. V. (2021). Benchmarking real-time monitoring strategies for ethanol production from lignocellulosic biomass. *Biomass and Bioenergy*, 127, 105296. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105296>.
- [7] Kula, K. S. (2024). Tuning a PI/PID Controller with Direct Synthesis to Obtain a Non-Oscillatory Response of Time-Delayed Systems. *Applied Sciences*, 14(13), 5468. <https://doi.org/10.3390/app14135468>.
- [8] Nagy, Z. (2007). Model based control of a yeast fermentation bioreactor using optimally designed artificial neural networks. *Chemical Engineering Journal*, 127(1–3), 95–109. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.09.014>.
- [9] Alvarado, R. H. (2016). Control auto-sintonizado utilizando redes neuronales (Tesis doctoral). Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial. <https://cidesi.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1024/301>.
- [10] Santos, S. O. (2014). Sintonización de un controlador PID basado en un algoritmo heurístico para el control de un Ball and Beam. <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/431>
- [11] O'Dwyer, A. (2000). A summary of PI and PID controller tuning rules for processes with time delay. Part 1: PI controller tuning rules. *Proceedings of the PID IFAC Workshop on Digital Control*, 175–180. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)38246-0](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)38246-0).
- [12] 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.ar-control.2021.03.003>.
- [13] Zavala, A., Hernández, H., Hernández, S., & Segovia, J. (2012). Conventional proportional-integral (PI) control of dividing wall distillation columns: Systematic tuning. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 55(38), 10869–10880. <https://doi.org/10.1021/ie300502>
- [14] Bricio, E., Millán, P., Díaz, S., Ramírez, J., & Torres, J. (2020). Application of thermodynamics and mathematical modeling on the optimization of the feeding flux rate on a fermentation process as a closed system. *Journal of Physics: Conference Series*, 1645(1), 012001. [doi:10.1088/1742-6596/1645/1/012001](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1645/1/012001)
- [15] Wakil, M. A., Oladipo, A. A., Ismail, S. O., & Salami, M. U. (2023). Temperature variations effect on bioethanol production from lignocellulosic biomass using locally developed small-scale production facility: A pilot study. *Renewable Energy Research and Applications*, 5(2), 103–110. <https://www.researchgate.net/publication/373059430>.
- [16] González-Hernández Y., Michiels E., Perré P. Heat of reaction in individual metabolic pathways of yeast determined by mechanistic modeling in an insulated bioreactor. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*. Springer Nature, 17, 1, 137, 2024.
- [17] Higginson A., Brooks K. A bioreactor system remote laboratory for teaching process control. *IFAC-PapersOnLine*. IFAC, 55, 17, 350–355, 2022.

[18] Lisci S., Grosso M., Tronci S. *Different control strategies for a yeast fermentation bioreactor*. IFAC-PapersOnLine. IFAC, 54, 3, 306–311, 2021.

[19] Moya Almeida V. *Desarrollo de un sistema de predicción y control de solventes durante la fermentación de cerveza con S. cerevisiae mediante redes neuronales y lógica difusa*. Tesis doctoral, Universidad Agronómica, 2023.

