

# **ANÁLISIS COMPARATIVO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL PID, CONTROL DIFUSO, PLC Y CONTROL PREDICTIVO BASADO EN PROCESOS DE ENCAPSULACIÓN DE PASTILLAS MEDIANTE CAMA MOVIL SIMULADA (CMS): UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA**

Quintanilla Cárdenas Lina Marcela<sup>1</sup>

Chaparro Avellaneda Camilo Andres<sup>2</sup>

Bautista John Henry<sup>3</sup>

## **RESUMEN**

Este artículo presenta una revisión sistemática, cuyo objetivo es analizar las principales estrategias de control aplicadas en la industria química frente al proceso en cama móvil simulada (CMS). Se investigaron estrategias de control tales como; El control Proporcional–Integral–Derivativo (PID, por sus siglas en inglés)", lógica difusa y control predictivo basado en modelos (MPC), considerando al controlador lógico programable (PLC) únicamente como una plataforma de implementación que ejecuta las estrategias definidas por el desarrollador, y no como una estrategia de control autónoma. La metodología cuya estructuración se basó en el modelo CIMO (Contexto, Intervención, Mecanismo, Resultado), permitió formular la pregunta problema y establecer criterios de selección e inclusión, de los cuales se resaltan 51 artículos científicos publicados entre 2017 y 2025. Los resultados obtenidos tras la revisión indican que, si bien el PID se mantiene como la estrategia más utilizada por las industrias debido a la simplicidad y bajo costo, su desempeño puede variar considerablemente según la configuración aplicada: en sistemas lineales puede ser suficiente, pero en procesos no lineales o sujetos a perturbaciones dinámicas tiende a presentar limitaciones como lo es el control de incertidumbres en los procesos. Finalmente, el análisis realizado en el documento se orientó a la discusión de los procesos críticos de la industria farmacéutica, donde las consideraciones éticas, debido a los marcos regulatorios que incluyen la FDA y la iniciativa PAT, que dan respuesta a la responsabilidad social de la ingeniería, responsabilidad cuya da garantía de transparencia, confiabilidad y trazabilidad de los procesos.

## **PALABRAS CLAVE**

Estrategias de control, controladores industria química, cama móvil simulada, procesos industriales.

<sup>1</sup> estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facativá  
[Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co](mailto:Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co)

<sup>2</sup>Estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facativá  
[Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co](mailto:Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co)

<sup>3</sup>Docente de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facativá  
[bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co](mailto:bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co)

# COMPARATIVE ANALYSIS OF PID, FUZZY CONTROL, PLC, AND PREDICTIVE CONTROL STRATEGIES BASED ON TABLET ENCAPSULATION PROCESSES USING A SIMULATED MOVING BED (SMB): A SYSTEMATIC REVIEW

Quintanilla Cárdenas Lina Marcela<sup>1</sup>

Chaparro Avellaneda Camilo Andres<sup>2</sup>

Bautista John Henry<sup>3</sup>

## ABSTRACT

This article presents a systematic review aimed at analyzing the main control strategies applied in the chemical industry to simulated moving bed (SMB) processes. Control strategies such as: Proportional–Integral–Derivative (PID) control, fuzzy logic, and modelbased predictive control (MPC), considering the programmable logic controller (PLC) only as an implementation platform that executes the strategies defined by the developer, and not as an autonomous control strategy. of which 51 scientific articles published between 2017 and 2025 are highlighted. The results obtained after the review indicate that, although the PID remains the most used strategy by industries due to its simplicity and low cost, its performance can vary greatly depending on the applied configuration: in linear systems it may be sufficient, but in non-linear processes or those subject to dynamic disturbances it tends to present limitations such as the control of uncertainties in the processes. Finally, the analysis carried out in the document is oriented to the discussion of critical processes in the pharmaceutical industry, where ethical considerations, due to regulatory frameworks that include the FDA and the PAT initiative, which respond to the social responsibility of engineering, a responsibility whose guarantee of transparency, reliability and traceability of processes.

## KEYWORDS

Control strategies, chemical industry controllers, simulated moving bed, industrial processes.

<sup>1</sup> estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facativá  
[Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co](mailto:Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co)

<sup>2</sup>Estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facativá  
[Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co](mailto:Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co)

<sup>3</sup>Docente de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facativá  
[bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co](mailto:bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co)

## INTRODUCCIÓN

En la última década, las deficiencias con el cumplimiento de las buenas prácticas de manufactura han presentado un desafío constante en los procesos industriales. De acuerdo con el informe de la FDA (Food and Drug Administration) (2024), aproximadamente el 50% de los recalls registrados entre 2020 y 2023 estuvieron asociados a problemas de esterilidad, fallas en control de procesos, contaminación y mezcla de lotes. Ante esta situación, la adopción de procesos con "tecnología analítica de procesos, Process Analytical Technology (PAT), y estrategias de control, se ha demostrado la reducción de virilidad del proceso, fortaleciendo la estabilidad operativa y la disminución de los riesgos de no conformidad. Esto no solo mitiga la probabilidad de retiros de productos del mercado, sino que también reduce significativamente las pérdidas económicas derivadas de dichos eventos (Khanal, 2022). Por consiguiente, se ha demostrado que los sistemas de control son el núcleo del sector químico y farmacéutico, debido a la precisión que requieren los productos en cada etapa de su proceso de manufacturación. La encapsulación de medicamentos es una técnica de procesamiento que requiere mucha sensibilidad a la hora de efectuarse (Yan & Kim, 2024). Por lo tanto, las desviaciones en dicho proceso se entienden como un factor crítico que puede generar ineficiencias y/o

reprocesamientos. Teniendo en cuenta que las desviaciones surgen de la diferencia entre los valores esperados y los valores obtenidos en un producto o proceso a realizar o ya realizado, lo que provoca que estas ocurran de manera recurrente en los aspectos más críticos de la industria farmacéutica. Cuando no se gestionan adecuadamente estas desviaciones, afectan directamente la calidad del producto final y la seguridad del paciente/cliente, por lo que su clasificación y evaluación mediante herramientas sistemáticas resultan indispensables para mitigar el riesgo y optimizar la confiabilidad del proceso (V, 2020). Para el desglose de las estrategias de control. Se comenzará a hablar del control PID (Proporcional – Integral – Derivativo) ya que su consolidación histórica la ubica como la estrategia de control más implementada en la industria debido a su simplicidad, bajo costo computacional y facilidad de implementación en diversos procesos de automatización lineales y de dinámica conocida (Liu, 2023). Sin embargo, en los procesos industriales contemporáneos, caracterizados como procesos altamente no lineales, con presencias de retardos de tiempo, acoplamiento, multivariable y con condiciones propensas a cambios, se ha evidenciado que el desempeño del PID clásico resulta limitado. Debido a que un controlador mal configurado tiende a generar oscilaciones sostenidas, sobre impulsos elevados y una baja capacidad de rechazo a perturbaciones externas del sistema. No obstante, con una sintonización adecuada de sus parámetros

<sup>1</sup> estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá  
[Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co](mailto:Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co)

<sup>2</sup>Estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá  
[Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co](mailto:Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co)

<sup>3</sup>Docente de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá  
[bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co](mailto:bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co)

(Kp, Ki, Kd) es posible mejorar parcialmente su robustez, aunque sigue siendo superado por estrategias más avanzadas en entornos complejos (Xingqi, 2023). En respuesta a los desafíos del PID se han desarrollado estrategias de control complejas como la lógica difusa, en dicha estrategia se desarrolló un sistema basado en la adaptabilidad para diferentes entornos y cambios inesperados en las variables de control predictivo. La lógica difusa es un modelo que se creó basado en la razón humana, lo que permite que sea capaz de realizar la toma de decisiones en base a experiencias y pueda ser utilizado en procesos que requieren un alto nivel de precisión (Romanov, 2023). De igual manera la lógica difusa, permitió mejorar significativamente la optimización de procesos en los cuales las variables no son lineales e intensifico la experiencia operativa del usuario que desarrolla estos procesos. En cuanto a las plataformas de control, el PLC sigue siendo la utilizadas en la automatización industrial el PLC, sigue siendo una de las plataformas de control más utilizada en la automatización industrial, principalmente en procesos donde tienen demasiada resistencia. Su fácil integración de sensores y actuadores convierte los parámetros en imperativos, pero su dependencia a la lógica del programa no lo hace evolucionable, ya que se queda corto en entornos que requieran precisión, como en el caso de CMS (Cama Móvil Simulada) (Sehr, 2020). Así mismo, es pertinente señalar que la cama móvil simulada (CMS) es un

proceso continuo de separación de componentes los cuales utilizan múltiples columnas conectadas en serie, junto con válvulas neumáticas que cambian periódicamente su posición para simular el movimiento de una cama estacionaria. De igual forma, se considera como un proceso eficaz que permite proporcionar separaciones de materia a gran escala, reduciendo errores y pérdidas económicas. La aplicación de este modelo de cama móvil simulada puede verse en distintos entornos industriales tales como: el farmacéutico (en encapsulados y separación de enantiómeros) y el azucarero (en la producción de jarabe), estas industrias adoptan el modelo de CMS por su alta productividad y menor consumo de recursos energéticos, por lo que, su alta capacidad de operar de manera continua la hace una opción viable para aplicar en dichos procesos de separación (Lee, 2021). En la industria, la implementación de camas móviles simuladas (CMS), ha avanzado significativamente de forma constante debido a las estrategias de control implementadas. Estas son necesarias en los procesos de CMS debido a que se presentan dinámicas altamente no lineales, las cuales contienen variaciones de caudales y/o conmutaciones periódicas de válvulas neumáticas, lo que hace inviable un control simple de tipo ON/OFF, ya que este solo permite respuestas binarias (NA/NC: E/A) sin capacidad de anticipación ni ajuste previo, en comparación con estrategias como PID, lógica difusa o MPC que permiten un

<sup>1</sup> estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá  
[Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co](mailto:Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co)

<sup>2</sup>Estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá  
[Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co](mailto:Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co)

<sup>3</sup>Docente de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá  
[bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co](mailto:bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co)

control continuo y adaptable, garantizando estabilidad del proceso, operación multicolumna y una recuperación eficiente del sistema incluso bajo perturbaciones externas (Sathiyapriyan, 2025). Para ello, se lleva a cabo una comparativa literaria de enfoque cualitativo, debido a que no solo se evalúa, indicadores de rendimiento y eficiencia reportados en los diversos estudios analizados, sino que también se incorpora un análisis interpretativo de los enfoques metodológicos y contextuales. Esto permitió obtener una visión integral sobre la aplicabilidad, las ventajas y las limitaciones de cada estrategia de control en escenarios industriales complejos.

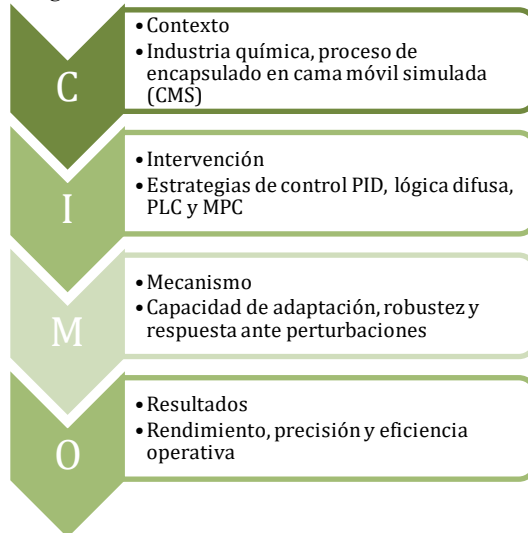
## MÉTODOS

En la línea abordada, para el desarrollo de la revisión sistemática con perspectivas crítico-comparativa, se adoptó un enfoque metodológico cualitativo, lo cual permitió identificar, evaluar y sintetizar hallazgos relevantes de estudios empíricos y simulados.

Para estructurar la pregunta de investigación se aplicó el modelo CIMO (Figura 1, Desglose modelo CIMO), ampliamente utilizado en estudios de ingeniería aplicada.

El cual fue eficiente para crear una pregunta problema que abarque las diferentes fases de importancia en esta revisión sistemática

**Figura 1.**  
Desglose modelo CIMO



Nota. La figura representa que conlleva cada una de las abreviaciones del modelo. Fuente. Elaboración propia

## Pregunta problema

¿Cómo impactan las distintas estrategias de control (PID, lógica difusa, PLC y MPC) en la precisión y eficiencia del encapsulado de pastillas en cama móvil simulada (CMS) en la industria química?

Esta pregunta problema brindo una guía para crear un modelo de inclusión y exclusión para la búsqueda de la información pertinente para este artículo de revisión.

Para nombrar puntalmente los criterios de selección de la información, y garantizar la calidad y pertinencia de los estudios incluidos se establecieron los siguientes criterios mostrados en la Figura 2, criterios de inclusión y exclusión.

<sup>1</sup> estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facativá  
[Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co](mailto:Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co)

<sup>2</sup>Estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facativá  
[Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co](mailto:Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co)

<sup>3</sup>Docente de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facativá  
[bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co](mailto:bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co)

**Figura 2.**  
*Criterios de inclusión y exclusión*



Nota. La figura 2 muestra los criterios de selección y descartes para la búsqueda. Fuente. Elaboración propia

Seguido de esto se realizó una búsqueda exhaustiva de información en bases de datos académicas de alto impacto como IEEE Xplore, Scopus, ScienceDirect y Google Scholar, para lo cual se establecieron ecuaciones de búsqueda en cada una de las plataformas anteriormente mencionadas.

La Figura 3, presenta la bitácora de estrategias de búsqueda que se implementó. La cual usa combinaciones de palabras clave y operadores booleanos para una mejor búsqueda de artículo

**Figura 3.**  
*Bitácora de búsqueda de artículos*



Nota. La Figura 3 muestra la bitácora de búsqueda implementada en la revisión de artículos Fuente. Elaboración propia.

<sup>1</sup> estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facativá

[Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co](mailto:Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co)

<sup>2</sup>Estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRAIRIA – Colombia Facativá

[Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co](mailto:Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co)

<sup>3</sup>Docente de la Universidad UNIAGRAIRIA – Colombia Facativá

[bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co](mailto:bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co)

## RESULTADOS

En la investigación cualitativa actual, el uso de las visualizaciones cumple una función clave para organizar y representar de mejor manera la información recolectada en los artículos. Esto con el fin de facilitar la interpretación y la comunicación de los hallazgos (Nowell, 2017).

Además, según Braun y Clarke (2021) la investigación cualitativa puede mejorar con representaciones visuales que ayuden al análisis de las temáticas expuestas, teniendo en cuenta que deben estar relacionados con la pregunta de investigación. Por otro lado, Saldaña (2021) enfatiza en que los esquemas visuales son recursos muy útiles en la representación de comparativas de conceptos que no son fáciles de comprender, aportando facilidad al proceso de interpretación

Es por eso por lo que el uso de diagramas en este artículo se debe entender como instrumentos de análisis cualitativo visual que se utilizan para facilitar la comprensión mediante una manera práctica de las diferentes estrategias de

control en procesos de encapsulación mediante cama móvil simulada. De esta manera, se reafirma que el presente estudio mantiene su naturaleza cualitativa, utilizando recursos gráficos como apoyo interpretativo y de comunicación, no como técnicas de cuantificación estricta. En ese sentido, para un mejor entendimiento visual se desarrolla un diagrama de Venn el cual permite relacionar las diferencias y similitudes de cada estrategia de control (PID, MPC, lógica difusa) con una plataforma de implementación (PLC), en el diagrama 1 (interrelación de estrategias de control), a través de cada conjunto, se plasman las características exclusivas de cada estrategia de control, mientras que en las intersecciones se evidencian los elementos compartidos.

De esta manera, el diagrama no solo está contribuyendo a resaltar los aspectos comunes relacionados en el rendimiento, la precisión, la robustez, adaptabilidad y la eficiencia operativa, sino que también brinda la herramienta didáctica que simplifica la interpretación de lo expuesto en el artículo.

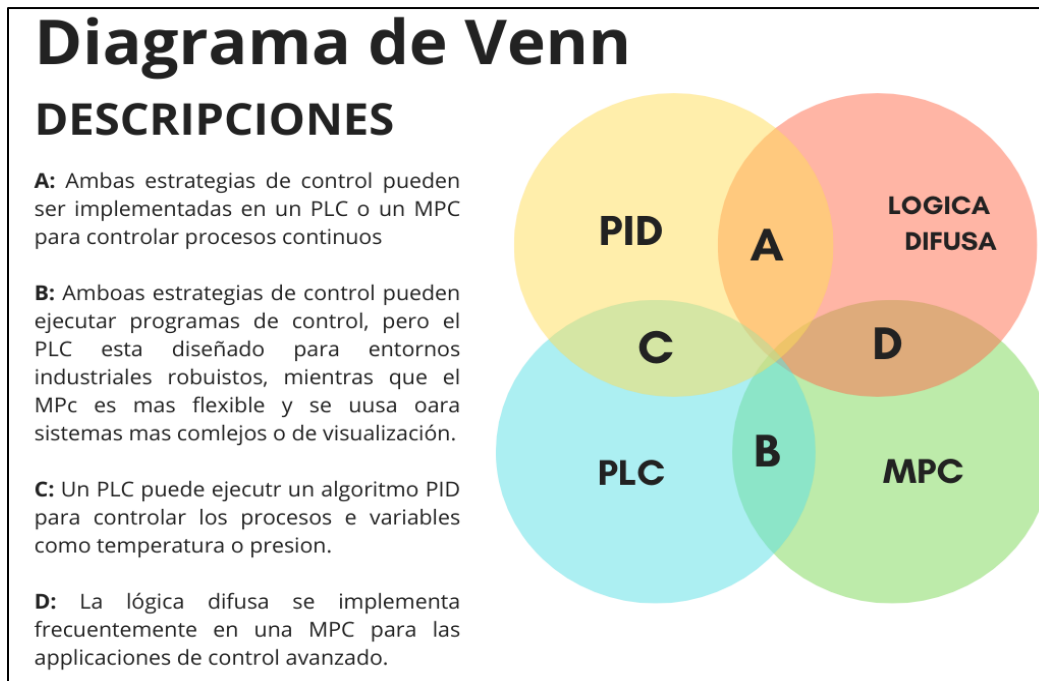
<sup>1</sup> estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá  
[Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co](mailto:Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co)

<sup>2</sup>Estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá  
[Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co](mailto:Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co)

<sup>3</sup>Docente de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá  
[bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co](mailto:bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co)

## Diagrama 1

Diagrama de Venn interrelación de estrategias de control (PID, PLC, MPC y lógica difusa)



*Nota. El diagrama de Venn muestra que estas estrategias de control pueden ser utilizados en conjunto en un sistema de control para mejorar la eficiencia operativa, la adaptabilidad, la precisión y la robustez. Por ejemplo, una PC puede ejecutar un control de lógica difusa, que a su vez controla un PLC que tiene un algoritmo PID ajustando un proceso.*  
Fuente Elaboración propia

Relacionando las estrategias de control mencionadas en el artículo el PID se considera de bajo costo debido a que Fiducioso (2019) propone una optimización automática del control PID en HVAC (sistemas de calefacción/ventilación) mediante Bayesian Optimization, destacando que el PID es muy empleado por su simplicidad y efectividad comprobada, lo que permite reducir costos significativamente (32%) sin sacrificar confort o seguridad (Fiducioso, 2019).

En la estrategia de control MPC la revisión del desarrollo en la industria farmacéutica, resalta que esta estrategia permite la alta precisión de control con complejidad moderna gracias a la predicción del comportamiento futuro del sistema y la optimización en tiempo real (Ding, 2018). Pero de igual manera en los modelos de captura de CO<sub>2</sub>, mejorar el modelo predictivo del controlador (MPC) incluyendo la dinámica de fricción (“stiction”) incrementa la robustez y la precisión del seguimiento (Sultan, 2022).

<sup>1</sup> estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá  
[Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co](mailto:Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co)

<sup>2</sup>Estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRAIRIA – Colombia Facatativá  
[Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co](mailto:Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co)

<sup>3</sup>Docente de la Universidad UNIAGRAIRIA – Colombia Facatativá  
[bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co](mailto:bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co)

En cuanto a la estrategia de Lógica difusa, la revisión realizada demuestra que maneja incertidumbres y la no linealidad en sistemas como robots o vehículos autónomos, lo que lo hace de fácil implementación para la cama móvil simulada en el entorno de la industria química, debido a que permite el control flexible y preciso en entornos dinámicos (Tang & Ahmad, 2024).

Dan y Van Binh (2023) desarrolla un controlador difuso adaptativo que ajusta automáticamente sus parámetros frente a cambios e incertidumbres, ofreciendo mayor adaptabilidad y robustez en operaciones variantes (Dan & Van Binh, 2023).

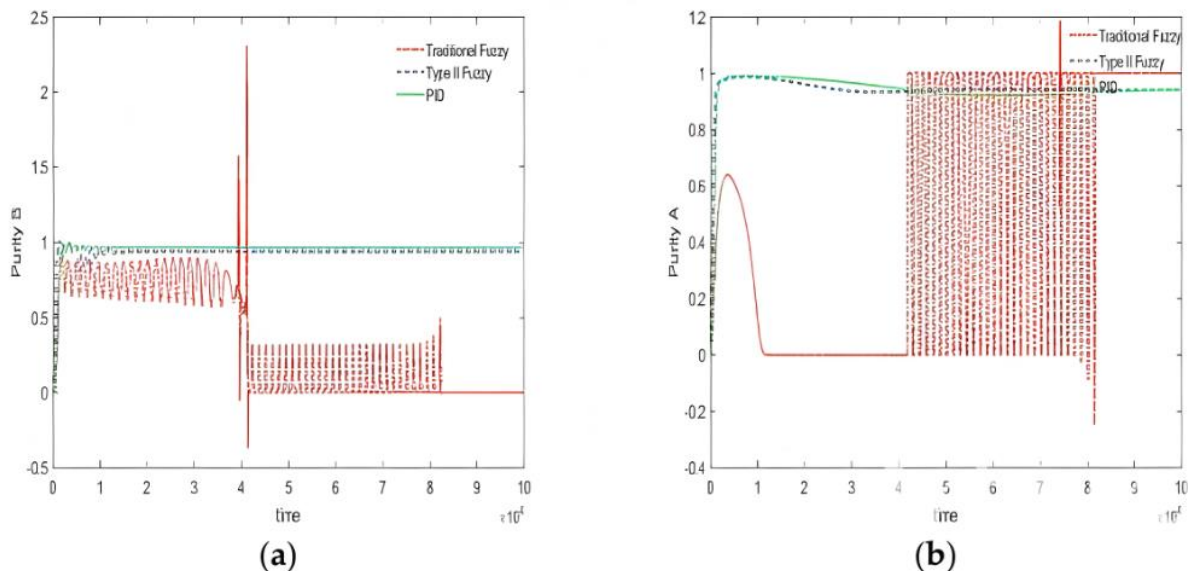
Con el fin de valorar la aplicabilidad de diferentes estrategias de control en el proceso de CMS, se realizó un análisis comparativo tomado como referencia de los resultados presentados por Xie y Hwang (2022), ya que el estudio identifica que la aplicabilidad del

controlador difuso tipo II en proceso de CMS es altamente relevante para los sistemas de separación continua en la industria química y biofarmacéutica, donde se requiere mantener con precisión la pureza de las corrientes de salida.

A diferencia de los controladores tradicionales (PID y difuso tipo I), el difuso tipo II demostró ser más robusto y adaptable frente a perturbaciones críticas, como cambios en los parámetros del adsorbente, la concentración en el puerto de alimentación y el tiempo de conmutación.

En las simulaciones realizadas figura 3 y 4 (Figura 13– 19 del artículo Xie & Hwang, 2022), el controlador tipo II logro mantener la pureza deseada con mínimos errores en estado estacionario y menor fluctuación, lo cual lo convierte en una estrategia prometedora para su implementación practica en sistemas CMS.

**Figura 4.**  
Resultados de control de los tres controladores



<sup>1</sup> estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facativá

[Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co](mailto:Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co)

<sup>2</sup>Estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facativá

[Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co](mailto:Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co)

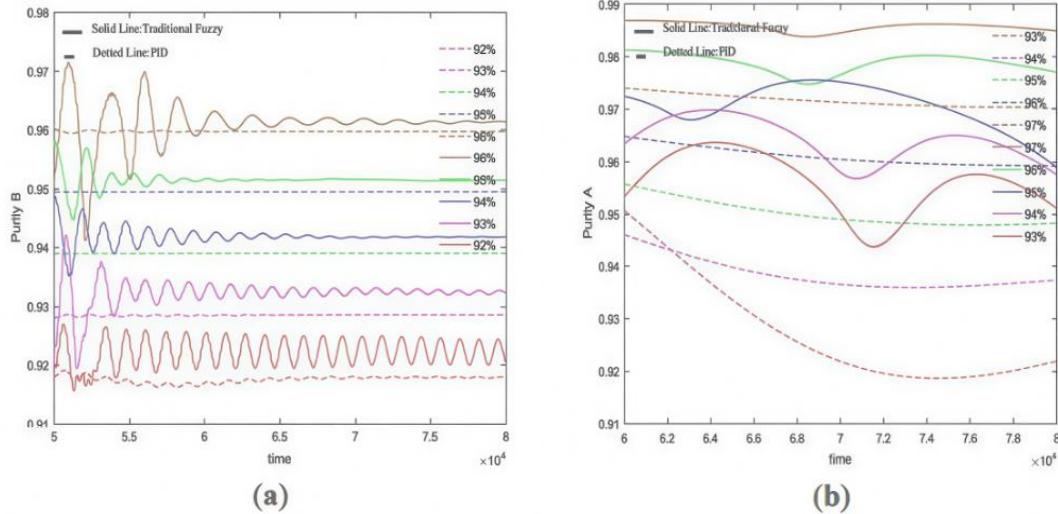
<sup>3</sup>Docente de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facativá

[bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co](mailto:bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co)

Nota. Resultados de control de los tres controladores (tiempo de conmutación = 178 s; deseado A = 94 %, deseado B = 96 %). (a) Salida de extracción (material B); (b) Salida de refinado (material A). Fuente. (Xie & Hwang, 2022)

**Figura 5.**

Conmutación del tiempo de extracción



Nota. Con el cambio del tiempo de conmutación  $\theta = 178 \text{ s} \rightarrow 182 \text{ s}$ . (a) Salida de extracción (material B); (b) Salida de refinado (material A). Fuente, (Xie & Hwang, 2022).

De manera similar, bajo variaciones en la concentración de entrada ( $C_f$ ) y en el tiempo de conmutación ( $\theta$ ), el tipo II conservó la estabilidad (Figura 18 del artículo) Figura 6.

Teniendo en cuenta la síntesis de los resultados reportados por Xie y Hwang (2022) confirman que, si bien los controladores PID y difuso tipo I presentan un desempeño aceptable en condiciones estables, ambos muestran limitaciones significativas frente a cambios en parámetros clave del CMS, generando errores en estado estacionario y oscilaciones en la pureza de los

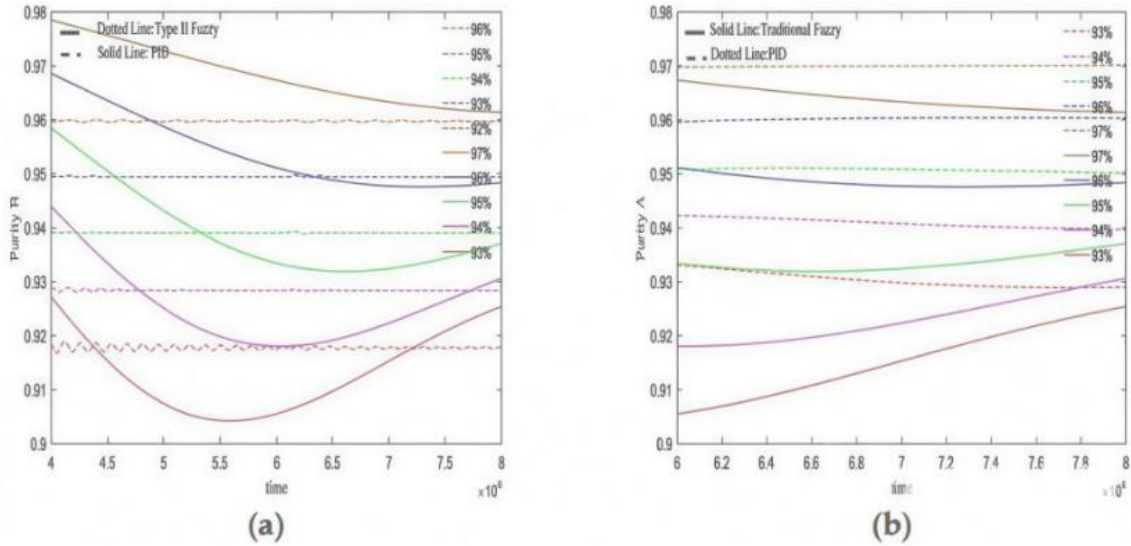
productos. En contraste con el controlador difuso tipo II logro mantener los niveles de pureza deseados con mínimas fluctuaciones y sin errores sostenidos, además de evidenciar mayor robustez y adaptabilidad frente a perturbaciones externas como se ve en la figura 19 (Figura 4), que indica que estos hallazgos dan paso a que si bien el enfoque difuso tipo II ofrece una solución más confiable y eficiente para la integración de sistemas de manufactura continua (CMS), también aporta estabilidad esto implica que reduce costos de ajuste experimental en entornos industriales complejos.

<sup>1</sup> estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá [Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co](mailto:Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co)

<sup>2</sup>Estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá [Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co](mailto:Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co)

<sup>3</sup>Docente de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá [bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co](mailto:bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co)

**Figura 6.**  
Cambio de parámetro absorbente



Nota. Cambio del parámetro adsorbente  $HA = 0,01 \rightarrow 0,03$ . (a) Salida de extracción (material B); (b) Salida de refinado (material A). Fuente, (Xie & Hwang, 2022).

Por otro lado, otro caso de estudio del artículo de Abdelaziz (2024) presenta una revisión exhaustiva de los enfoques de control inteligente aplicados en sistemas no lineales y de alta complejidad, con especial énfasis en contextos industriales que pueden extrapolarse en la manufactura continua (CMS). Entre los algoritmos evaluados se incluyen redes neuronales profundas, aprendizaje por refuerzo, control difuso, lógica adaptativa y esquemas híbridos neuro-difusos, todos ellos orientados a superar las limitaciones de los controladores clásicos ante entornos inciertos y dinámicos, La aplicabilidad a procesos CMS radica en su capacidad para manejar simultáneamente múltiples variables de operación, optimizar la toma de

decisiones en tiempo real y adaptarse a perturbaciones del sistema sin necesidad de reajustes constantes. En cuanto a las variables a considerar, el estudio resalta la importancia de parámetros dinámicos como caudales, concentraciones de entrada, tiempos de conmutación, constantes de transferencia de masa y condiciones de operación del equipo, variables que en los CMS determinan directamente la estabilidad del proceso y la calidad del producto final. Este enfoque no solo mejora la capacidad de predicción y adaptación, sino que también amplía la factibilidad de integración de CMS en escenarios industriales complejos y altamente variables.

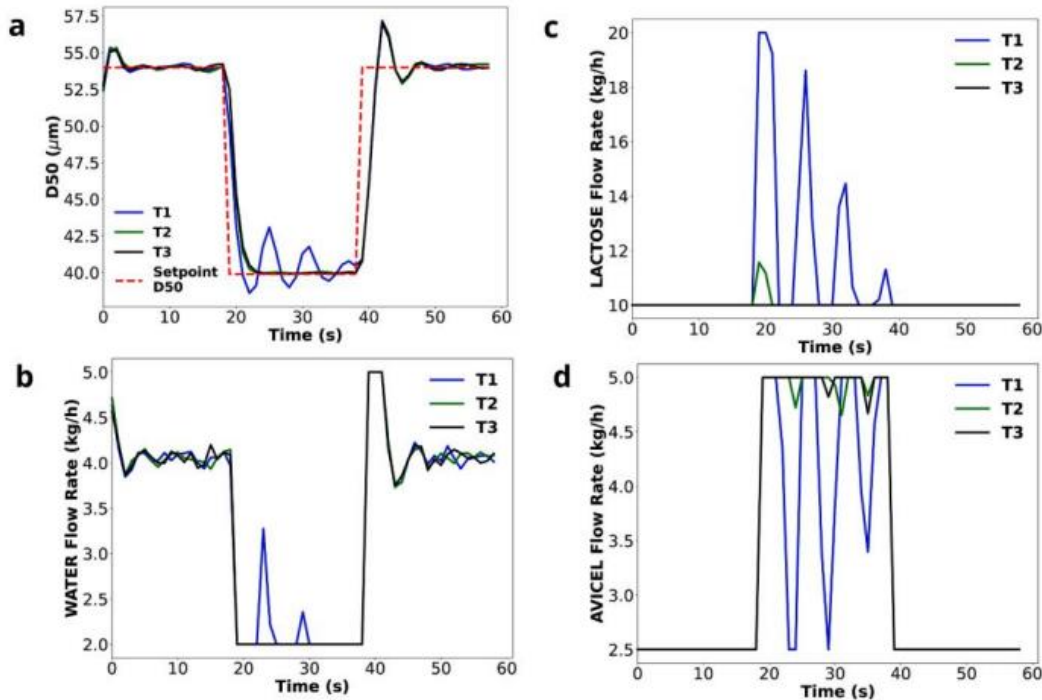
<sup>1</sup> estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá  
[Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co](mailto:Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co)

<sup>2</sup>Estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá  
[Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co](mailto:Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co)

<sup>3</sup>Docente de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá  
[bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co](mailto:bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co)

**Figura 7.**

Respuesta comparativa de los controladores PID (T1), lógica difusa (T2) y MPC (T3) en el proceso de cama móvil simulada (CMS).



Nota. (a) Evolución del tamaño de partícula D50 frente al setpoint. (b) Caudal de agua. (c) Caudal de lactosa. (d) Caudal de Avicel. La comparación muestra que el MPC (T3) logra una mayor precisión y estabilidad con mínima oscilación, la lógica difusa (T2) ofrece una respuesta más suave que el PID, y el PID (T1) presenta mayores overshoot y oscilaciones en las variables de proceso. Fuente (Eslami, A., Pauli, D., & Khinast, J. G. 2024)

En la figura 7 se comparan tres estrategias de control (T1, T2 Y T3), que son respectivamente (PID, MPC Y FUZZY). El objetivo de la simulación realizada en dicho artículo es evidenciar el desempeño de los tres controladores en base al tamaño de la partícula D50 que se

referencia con la línea punteada roja, las perturbaciones del sistema ocurren en un lapso de 20 a 40 segundos, representando la respuesta dinámica de los controladores en el proceso de cama móvil simulada, los resultados de la figura 7 se evidencian en la tabla 1

<sup>1</sup> estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá  
[Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co](mailto:Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co)

<sup>2</sup>Estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá  
[Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co](mailto:Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co)

<sup>3</sup>Docente de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá  
[bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co](mailto:bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co)

**Tabla 1.**

*Evaluación comparativa de los controladores PID (T1), lógica difusa (T2) y MPC (T3) en el proceso de cama móvil simulada (CMS).*

<b>Variable controlada</b>	<b>PID (T1)</b>	<b>Lógica difusa (T2)</b>	<b>MPC (T3)</b>
<b>Tamaño de partícula D50 (a)</b>	Presenta Overshoot y oscilaciones antes de estabilizarse en el Setpoint	EL mejor y con oscilación estable.	Se ajusta rápido al Setpoint con mínima desviación y gran estabilidad.
<b>Caudal de agua (b)</b>	Oscilaciones marcadas y pérdida de control en cambios bruscos	Estabilidad moderada, con pequeñas variaciones.	Control preciso y estable, mantiene el flujo cercano al valor deseado.
<b>Caudal de lactosa (c)</b>	Grandes oscilaciones y desviaciones significativas.	Respuesta más rápida, con leves fluctuaciones.	Control óptimo, estable y ajustado al Setpoint.
<b>Caudal de Avicel (d)</b>	Respuesta inestable con picos muy altos.	Mayor estabilidad, aunque con pequeñas variaciones	Respuesta más robusta y estable, sin oscilaciones significativas.

*Nota. La tabla 1 presenta la organización comparativa de las estrategias de control PID, lógica difusa y MPC aplicadas al proceso de cama móvil simulada (CMS), considerando variables críticas como el tamaño de partícula D50 y los caudales de agua, lactosa y Avicel.*

## DISCUSION

En la literatura científica revisada se está planteando la unión de varios modelos dentro de un mismo sistema, se le conoce como estrategias híbridas que combinan PID con lógica difusa, o MPC con algoritmos de aprendizaje automático esto con el fin de combinar las fortalezas de ambos enfoques (Liu, 2024; Visioli, 2017). En cuanto a la relevancia que se le

da la integración de dichas estrategias de control avanzadas en CMS no solo están impactando en procesos químicos, sino que también en el desarrollo de sistemas mecatrónicos aplicados a bioingeniería y automatización industrial.

En la búsqueda y análisis realizado se logra identificar que predominaron las aplicaciones en industria química con un

<sup>1</sup> estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá [Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co](mailto:Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co)

<sup>2</sup>Estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá [Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co](mailto:Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co)

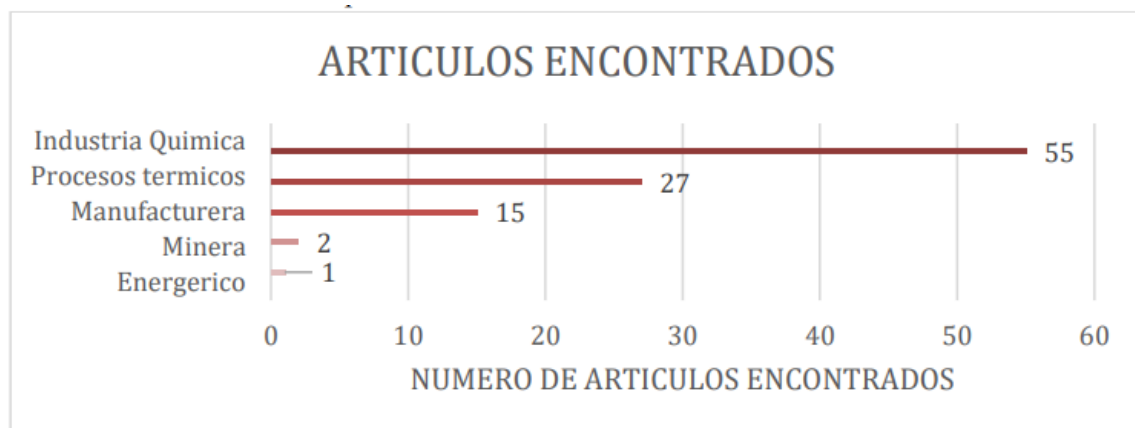
<sup>3</sup>Docente de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá [bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co](mailto:bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co)

total de 55 artículos, seguidas por procesos térmicos con un total de 27 artículos, manufacturera con un total de 15 artículos, minería con un total de 2 artículos y energía con un total de 1 artículo. Esta tendencia refleja una concentración de esfuerzos investigativos

en sectores con alta automatización y demanda energética, aunque emergen casos relevantes en contextos rurales y agroindustriales. Lo cual se puede entender mejor de una manera visual, para ello se construye el Gráfico 1, cantidad de artículos encontrados.

### Gráfico 1

*Cantidad de artículos encontrados para cada sector*



Nota. El gráfico 1. Muestra la distribución de artículos de estrategias de control en distintos sectores, Fuente Elaboración Propia

Con el propósito de identificar las áreas en las que existe mayor aplicación y desarrollo de estrategias de control dentro del ámbito industrial, se realizó un análisis bibliométrico que permite identificar la distribución de estudios por sector. Este enfoque facilita reconocer aquellos campos donde la investigación ha tenido mayor impacto y, al mismo tiempo, visibiliza sectores emergentes con un potencial de aplicación creciente. En primera instancia, el marco comparativo desarrollado en esta revisión se fundamentó en criterios técnicos — precisión, robustez, facilidad de implementación y viabilidad económica— complementados con

factores contextuales relevantes para la industria farmacéutica y química, como la gestión de desviaciones y la integración con Process Analytical Technology (PAT). Este enfoque permitió diferenciar claramente entre estrategias de control (PID, lógica difusa, MPC) y plataformas de implementación, como el PLC, que actúan más como entornos de soporte que como algoritmos de control en sí mismos. Los resultados sintetizados muestran que el PID continúa siendo una alternativa de bajo costo computacional y alta accesibilidad, adecuada para procesos lineales y de baja interacción. Sin embargo, estudios recientes destacan limitaciones evidentes

<sup>1</sup> estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá [Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co](mailto:Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co)

<sup>2</sup>Estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá [Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co](mailto:Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co)

<sup>3</sup>Docente de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá [bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co](mailto:bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co)

en procesos multivariados y con retardos de tiempo, como la CMS, donde el rechazo a perturbaciones es deficiente y se generan oscilaciones sostenidas (Xingqi, 2023; Zaman, 2024). En contraste, la lógica difusa constituye una alternativa flexible, capaz de manejar incertidumbre y no linealidades. Su principal ventaja es la capacidad de emular razonamientos heurísticos, lo que permite ajustar variables en tiempo real y mejorar la adaptabilidad del sistema (Tang & Ahmad, 2024; Dan & Van Binh, 2023). El control predictivo basado en modelos (MPC) se posiciona como la estrategia más robusta y precisa en escenarios multivariados. Su capacidad de anticipar el comportamiento del sistema y optimizar múltiples variables simultáneamente lo convierte en un enfoque idóneo para procesos de CMS, donde la pureza y la eficiencia deben mantenerse de forma estricta. No obstante, sus altos requerimientos de infraestructura tecnológica, costos de implementación y limitaciones de adopción en países en desarrollo constituyen barreras relevantes (Sultan, 2022; Yaghoubi, 2025). Respecto al PLC, su papel radica en proveer la plataforma de implementación más confiable y estandarizada en la industria, particularmente por su integración con sensores y actuadores. Sin embargo, su desempeño depende de la lógica programada y carece de adaptabilidad intrínseca, lo que obliga a recurrir a algoritmos más avanzados, como MPC o difusos, para procesos altamente dinámicos (Sehr, 2021; Fahim, 2023). Un aspecto emergente identificado en la literatura es el desarrollo de estrategias híbridas, que buscan combinar la simplicidad del PID con la flexibilidad de la lógica difusa o la capacidad predictiva del MPC. Aunque estas aproximaciones

han mostrado resultados prometedores en simulaciones y entornos experimentales (Visioli, 2017; Liu, 2024), aún carecen de validación en escenarios industriales a gran escala. Finalmente, se observa que la mayoría de los estudios se concentran en la industria farmacéutica, especialmente en procesos de encapsulación y clasificación, dada la necesidad de cumplir normativas estrictas de calidad (Yan & Kim, 2024; Lobel, 2024). Sin embargo, también emergen aplicaciones en sectores como la agroindustria, la minería y la energía, donde la CMS comienza a posicionarse como una herramienta de optimización (Khanal, 2022; Isoko, 2024).

Un punto llamativo de esta revisión es que casi no se encuentran investigaciones que mezclen las fortalezas del PID, la lógica difusa y el MPC. Hay apenas algunos casos en los que se combina PID con lógica difusa para aumentar la robustez frente a perturbaciones dinámicas, y los resultados suelen ser mejores que los obtenidos cuando cada estrategia trabaja sola (Visioli, 2017).

Cuando se analizan estrategias de control, es imposible desligarlas del tema de sostenibilidad, tanto económica como ambiental. Tomemos como ejemplo el MPC: está comprobado que puede reducir el consumo de energía en procesos continuos. Sin embargo, hay un detalle: su implementación es costosa y eso lo vuelve difícil de adoptar en todos los contextos. La lógica difusa, por su parte, ofrece la ventaja de manejar la incertidumbre y de esa manera mejora el uso de recursos en entornos dinámicos. Mientras tanto, el PID, pese a ser más limitado técnicamente, sigue siendo una opción válida y sostenible, sobre todo para industrias que tienen presupuestos ajustados (Ali, 2021).

<sup>1</sup> estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá  
[Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co](mailto:Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co)

<sup>2</sup> Estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá  
[Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co](mailto:Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co)

<sup>3</sup> Docente de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá  
[bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co](mailto:bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co)

La aplicabilidad de cada estrategia, al final, depende del equilibrio entre lo técnico y lo económico. En países con alta capacidad tecnológica, el MPC y las estrategias híbridas son vistos como el siguiente paso natural para el control de procesos CMS. Pero en escenarios emergentes, como es el caso colombiano, lo que se necesita es avanzar de manera gradual: combinar la robustez y bajo costo de los PLC con la flexibilidad de algoritmos difusos y la precisión que el MPC puede aportar en momentos clave.

Ahora, si bajamos la mirada hacia Colombia, el panorama cambia. Aquí la adopción de estrategias avanzadas de

## CONCLUSIONES

Las estrategias de control revisadas muestran un panorama diverso en cuanto a aplicabilidad y limitaciones. El PID sigue manteniendo la vigencia en aplicaciones industriales que requieren bajo costo computacional y que cuentan con una dinámica conocida, en la industria se contemplan otras estrategias de control debido a que el PID presenta limitación ante proceso no lineales o altamente variables.

Los resultados obtenidos afirman que ninguna estrategia de control en el proceso de cama móvil simulada es autosuficiente, esto indica que las estrategias híbridas son el futuro de la automatización, si se quiere garantizar que los procesos sean más seguros y eficientes.

control todavía enfrenta varias barreras. La mayoría de las empresas farmacéuticas locales siguen usando controladores PID montados en PLC. ¿La razón? Son baratos y fáciles de manejar. Pero claro, esta práctica limita la capacidad de los sistemas para reaccionar ante perturbaciones complejas y, en consecuencia, frena la posibilidad de lograr la máxima eficiencia en procesos como la encapsulación de medicamentos (Ramírez & Gaitán, 2021).

Con la identificación de los artículos científicos seleccionados publicados entre 2017 y 2025 se garantiza una investigación actualizada y confiable, Sin embargo, se encontraron limitaciones de búsqueda debido a la competencia y a la confidencialidad de las empresas que impidieron el acceso completo a la información.

En perspectiva, la integración de estas estrategias con tecnologías analíticas de proceso (PAT) y los avances de la Industria 4.0 ofrece un horizonte prometedor hacia sistemas de control más inteligentes, capaces de operar en tiempo real, optimizar el consumo energético y garantizar estándares de calidad cada vez más exigentes. Este enfoque proyecta la evolución de la CMS hacia plataformas más autónomas, resilientes y sostenibles, consolidando su papel como herramienta clave en la industria farmacéutica y en sectores

<sup>1</sup> estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá  
[Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co](mailto:Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co)

<sup>2</sup>Estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá  
[Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co](mailto:Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co)

<sup>3</sup>Docente de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá  
[bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co](mailto:bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co)

emergentes como la agroindustria, la energía y la minería.

La tendencia mundial apunta a que el uso de las estrategias híbridas en conjunto a la IA son el futuro de la optimización de procesos industriales farmacéuticos. En Colombia su adopción es inexistente debido a los factores económicos, aunque existen grandes oportunidades debido a la alta producción local de medicamentos.

Dando paso a realizar una proyección de controladores híbridos (PID – difuso, MPC- machine Learning, neuro – difusos) ya que representarían una tendencia emergente, debido a que integrarían las fortalezas de múltiples enfoques para mejorar precisión, robustez y adaptabilidad. Porque, en la industria química y biofarmacéutica, la aplicabilidad del CMS como proceso continuo de separación, requerirá estrategias de control más avanzadas para mantener la pureza del producto bajo condiciones dinámicas. Después de realizar las comparativas de las técnicas

implementadas en los artículos abarcados, se crea un enfoque hacia los procesos críticos de la industria farmacéutica, ya que en la industria farmacéutica se incorporan consideraciones éticas que, no solo efectúan la sostenibilidad del proceso, sino que integra la seguridad del proceso. Tomando en cuenta estas consideraciones se incorporan los marcos regulatorios internacionales, marcos que incluyen lineamientos de la Food and Drug Administration (FDA) y la iniciativa de Process Analytical Technology (PAT), para garantizar la transparencia, confiabilidad y trazabilidad de los procesos, permitiendo reforzar la seguridad del producto y el servicio dirigido al cliente. De igual manera, la selección de estrategias de control fue orientada hacia configuraciones que optimicen el consumo y recursos que minimicen las pérdidas en el proceso, esta minimización da paso a la contribución de la sostenibilidad industrial que conlleva la responsabilidad social de la ingeniería

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Lee, J. W., Kienle, A., & SeidelMorgenstern, A. (2021). Numerical ShortCut Design of Simulated Moving Bed Chromatography for Multicomponent Nonlinear Adsorption Isotherms: Nonstoichiometric Langmuir Model. *Industrial & Engineering*

*Chemistry Research*, 60(29), 10753-10763.

<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c00671>

Sathiyapriyan, P., Mukherjee, S., Vogel, T., Essen, L., Boerema, D., Vey, M., & Kalina, U. (2025). Current PAT Landscape in the Downstream Processing of Biopharmaceuticals. *Analytical*

<sup>1</sup> estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facativá [Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co](mailto:Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co)

<sup>2</sup>Estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facativá [Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co](mailto:Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co)

<sup>3</sup>Docente de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facativá [bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co](mailto:bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co)

Science Advances, 6(1).  
<https://doi.org/10.1002/ansa.70013>

Isoko, K., Cordiner, J. L., Kis, Z., & Moghadam, P. Z. (2024). Bioprocessing 4.0: A Pragmatic Review and Future Perspectives. *Digital Discovery*, 3(9), 1662-1681.  
<https://doi.org/10.1039/d4dd00127c>

Khanal, O. (2022). Mathematical modeling and process analytical technology for continuous chromatography of biopharmaceutical products. *Current Opinion In Biotechnology*, 78, 102796.  
<https://doi.org/10.1016/j.copbio.2022.102796>

Yan, C., & Kim, S. (2024). Microencapsulation for Pharmaceutical Applications: A Review. *ACS Applied Biomaterials*, 7(2), 692-710.  
<https://doi.org/10.1021/acsabm.3c00776>

Lee, J. W., Kienle, A., & Seidel-Morgenstern, A. (2021). Numerical Short-Cut Design of Simulated Moving Bed Chromatography for Multicomponent Nonlinear Adsorption Isotherms: Nonstoichiometric Langmuir Model. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60(29), 10753-10763.  
<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c00671>

V, D., Kumar, S. H., Gangadharappa, H. V., & Gowrav, M. P. (2020). Handling of Pharmaceutical deviations: A detailed case study. *Indian Journal of*

*Pharmaceutical Sciences*, 82(6).  
<https://doi.org/10.36468/pharmaceuticalsciences.725>

Liu, C., Wang, Y., Zhang, M., Wang, P., Liu, S., Wu, W., & Sun, Y. (2023). Investigation of a fuzzy internal-mode PID-based temperature control system for solid-state electric storage heaters. *Journal of Control and Measurement*, 34(4), 24–32.  
<https://doi.org/10.1007/s10462-024-10743-0>

Xingqi, H., Guolian, H., & Wen, T. (2023). Tuning of PID controllers for oscillatory systems with time delays. *Frontiers In Control Engineering*, 3.  
<https://doi.org/10.3389/fcteg.2022.1083419>

Romanov, A. A., Filippov, A. A., & Yarushkina, N. G. (2023). Adaptive Fuzzy Predictive Approach in Control. *Mathematics*, 11(4), 875.  
<https://doi.org/10.3390/math11040875>

Sehr, M. A., Lohstroh, M., Weber, M., Ugalde, I., Witte, M., Neidig, J., Hoeme, S., Niknami, M., & Lee, E. A. (2020b). Programmable Logic Controllers in the Context of Industry 4.0. *IEEE Transactions On Industrial Informatics*, 17(5), 3523-3533.  
<https://doi.org/10.1109/tii.2020.3007764>

Pozzi, G., Li, H., & Rizzoni, G. (2022). Enhanced concentration control in electrochemical reactors using fuzzy logic with conventional PID and MPC

<sup>1</sup> estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativa  
[Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co](mailto:Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co)

<sup>2</sup>Estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativa  
[Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co](mailto:Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co)

<sup>3</sup>Docente de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativa  
[bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co](mailto:bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co)

controllers. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, 12(2), 130–141.

<https://doi.org/10.18280/ijcmem.120204>

Yaghoubi, E., Yaghoubi, E., Maghami, M. R., Rahebi, J., Jahromi, M. Z., Ghadami, R., & Yusupov, Z. (2025). A Systematic Review and Meta-Analysis of Model Predictive Control in Microgrids: Moving Beyond Traditional Methods. *Processes*, 13(7), 2197.

<https://doi.org/10.3390/pr13072197>

Liu, C., Wang, Y., Zhang, M., Wang, P., Liu, S., Wu, W., & Sun, Y. (2023). Investigation of a fuzzy internal mode PID based temperature control system for solid state electric storage heaters. *Journal of Control and Measurement*, 34(4), 24–32.

<https://doi.org/10.1007/s10462-024-10743-0>

Visioli, A., García, C., & Chao, K. (2017). Improved fuzzy PID controller design using predictive functional control structure for temperature regulation in a coke furnace. *ISA Transactions*, 67, 460–471.

<https://doi.org/10.1016/j.isatra.2017.01.006>

Nowell, L. S., Norris, J. M., White, D. E., & Moules, N. J. (2017). Thematic analysis: Striving to meet the trustworthiness criteria. *International Journal of Qualitative Methods*, 16(1), 1–13.

<https://doi.org/10.1177/160940691773320847>

Libro Braun, V., & Clarke, V. (2021). *Thematic analysis: A practical guide*. SAGE Publications.

Libro Saldaña, J. (2021). *The coding manual for qualitative researchers* (4th ed.). SAGE Publications.

Fiducioso, M., Curi, S., Schumacher, B., Gwerder, M., & Krause, A. (2019). Safe Contextual Bayesian Optimization for Sustainable Room Temperature PID Control Tuning. *arXiv* (Cornell University).

<https://doi.org/10.48550/arxiv.1906.12086>

Ding, Y., Wang, L., Li, Y., & Li, D. (2018). Model predictive control and its application in agriculture: A review. *Computers And Electronics in Agriculture*, 151, 104–117.

<https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.06.004>

Sultan, T., Zabiri, H., Shahbaz, M., & Maulud, A. S. (2022). Model Analysis for the Implementation of a Fast Model Predictive Control Scheme on the Absorption/Stripping CO<sub>2</sub> Capture Plants. *ACS Omega*, 7(10), 8437–8455.

<https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05974>

Tang, H. H., & Ahmad, N. S. (2024). Fuzzy logic approach for controlling uncertain and nonlinear systems: a comprehensive review of applications

<sup>1</sup> estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facativá  
[Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co](mailto:Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co)

<sup>2</sup>Estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facativá  
[Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co](mailto:Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co)

<sup>3</sup>Docente de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facativá  
[bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co](mailto:bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co)

and advances. *Systems Science & Control Engineering*, 12(1). <https://doi.org/10.1080/21642583.2024.2394429>

Dan, V. N., & Van Binh, T. (2023). Adaptive Control for Uncertain Nonlinear Systems based on Fuzzy Logic. *International Journal Of Engineering Trends And Technology*, 71(5), 266-271. <https://doi.org/10.14445/22315381/ijettv71i5p228>

Farooq, A. A., Marquard, J., George, K., & Moyer, T. (2019). Detecting Safety and Security Faults in PLC Systems with Data Provenance. arXiv (Cornell University). <https://doi.org/10.48550/arxiv.1911.06304>

Tanveer, A., Sinha, R., MacDonell, S. G., Leitao, P., & Vyatkin, V. (2019). Designing actively secure, highly available industrial automation applications. 2022 IEEE 20th International Conference On Industrial Informatics (INDIN), 374-379. <https://doi.org/10.1109/indin41052.2019.8972262>

Rohmani, R., Suprpto, I., & Pambudi, N. (2024). Practical steps for bibliometric analysis: Mapping trends in scientific articles on digital literacy using VosViewer from the Google Scholar Database. *International Journal Of Multidisciplinary Approach Research and Science*, 2(01), 351-361.

<https://risetpress.com/index.php/ijmars/article/view/480>

Purwayadi, T. (2020). SYSTEMATIC MAPPING OF PERFORMANCE ASSESSMENT RESEARCH: BIBLIOMETRIC STUDY WITH VOSVIEWER. *Advances In Social Sciences Research Journal*, 7(9), 151-161.

<https://doi.org/10.14738/assrj.79.8984>

Freire, G. D. G., & Reyes, G. M. Á. (2024). Transformación digital en la logística: un análisis bibliográfico de la influencia de las tecnologías de la información en la industria 4.0 y el desarrollo web. *Revista Imaginario Social*, 7(1).

<https://doi.org/10.59155/is.v7i1.154>

Fahim, A. A., Rahman, M. M., Hridoy, M. W., & Uddin, K. R. (2023b). Development of a PLC Based Automation Cell for Industry. *Journal Of Integrated And Advanced Engineering (JIAE)*, 3(2), 87-100. <https://doi.org/10.51662/jiae.v3i2.94>

Liu, C., Wang, Y., Zhang, M., Wang, P., Liu, S., Wu, W., & Sun, Y. (2023). Investigation of a fuzzy internalmode PIDbased temperature control system for solid-state electric storage heaters. *Journal of Control and Measurement*, 34(4), 24-32.

<https://doi.org/10.1007/s10462-024-10743-0>

Liu, K., Fan, Y., & Chen, J. (2024). Design and application of liquid fertilizer

<sup>1</sup> estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá [Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co](mailto:Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co)

<sup>2</sup>Estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá [Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co](mailto:Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co)

<sup>3</sup>Docente de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá [bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co](mailto:bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co)

pH regulation controller based on BPPIDSmith predictive compensation algorithm. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 33(1), 227–236. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2023.06.005>

Dan, V. N., & Van Binh, T. (2023). Adaptive Control for Uncertain Nonlinear Systems based on Fuzzy Logic. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 71(5), 266–271. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJE-TT-V71I5P228>

Ding, Y., Wang, L., Li, Y., & Li, D. (2018). Model predictive control and its application in agriculture: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 151, 104–117. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.06.004>

Isoko, K., Cordiner, J. L., Kis, Z., & Moghadam, P. Z. (2024). Bioprocessing 4.0: A pragmatic review and future perspectives. *Digital Discovery*, 3(9), 1662–1681. <https://doi.org/10.1039/D4DD00127C>

Liu, C., Wang, Y., Zhang, M., Wang, P., Liu, S., Wu, W., & Sun, Y. (2023). Investigation of a fuzzy internalmode PIDbased temperature control system for solid-state electric storage heaters. *Journal of Control and Measurement*, 34(4), 24–32. <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10743-0>

Khanal, O. (2022). Mathematical modeling and process analytical technology for continuous chromatography of biopharmaceutical products. *Current Opinion in Biotechnology*, 78, 102796. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2022.102796>

Liu, K., Fan, Y., & Chen, J. (2024). Design and application of liquid fertilizer pH regulation controller based on BP-PID-Smith predictive compensation algorithm. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 33(1), 227–236. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10462-024-10743-0>

Liu, C., Wang, Y., Zhang, M., Wang, P., Liu, S., Wu, W., & Sun, Y. (2023). Investigation of a fuzzy internal mode PID based temperature control system for solid state electric storage heaters. *Journal of Control and Measurement*, 34(4), 24–32. <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10743-0>

Lobel, J., et al. (2024). Current challenges in microcapsule designs and microencapsulation processes: A review. *Reaction Chemistry & Engineering*. <https://doi.org/10.1039/D4RE00185K>

Sathiyapriyan, P., Mukherjee, S., Vogel, T., Essen, L., Boerema, D., Vey, M., & Kalina, U. (2025). Current PAT Landscape in the Downstream Processing of Biopharmaceuticals. *Analytical Science Advances*, 6(1). <https://doi.org/10.1002/ansa.70013>

<sup>1</sup> estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá [Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co](mailto:Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co)

<sup>2</sup>Estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá [Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co](mailto:Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co)

<sup>3</sup>Docente de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá [bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co](mailto:bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co)

Sehr, M. A., Lohstroh, M., Weber, M., Ugalde, I., Witte, M., Neidig, J., Hoeme, S., Niknami, M., & Lee, E. A. (2021). Programmable logic controllers in the context of Industry 4.0. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(5), 3510–3520. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3007764>

Sultan, T., Zabiri, H., Shahbaz, M., & Maulud, A. S. (2022). Model analysis for the implementation of a fast model predictive control scheme on absorption/stripping CO<sub>2</sub> capture plants. *ACS Omega*, 7(10), 8437–8455. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05974>

Tang, H. H., & Ahmad, N. S. (2024). Fuzzy logic approach for controlling uncertain and nonlinear systems: A comprehensive review. *Systems Science & Control Engineering*, 12(1). <https://doi.org/10.1080/21642583.2024.2394429>

Visioli, A., García, C., & Chao, K. (2017). Improved fuzzy PID controller design using predictive functional control structure for temperature regulation in a coke furnace. *ISA Transactions*, 67, 460–471. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0019057817300277?via%3Dihub>

Wydmuch, M., et al. (2020). Interpretable PID parameter tuning for control engineering using deep neural networks. *PLOS ONE*, 15(12), e0243320.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.022043320>

Xing qi, H., Guolian, H., & Wen, T. (2023). Tuning of PID controllers for oscillatory systems with time delays. *Frontiers in Control Engineering*, 3, 1083419. <https://doi.org/10.3389/fcteg.2022.1083419>

Yan, C., & Kim, S. (2024). Microencapsulation for pharmaceutical applications: A review. *ACS Applied Biomaterials*, 7(2), 692–710. <https://doi.org/10.1021/acsubm.3c00776>

Yaghoubi, E., et al. (2025). A systematic review and meta-analysis of model predictive control in microgrids: Moving beyond traditional methods. *Processes*, 13(7), 2197. <https://doi.org/10.3390/pr13072197>

Zaman, S., et al. (2024). Performance and robust analysis of V-Tiger PID controller for AVR systems. *Scientific Reports*, 14, 11486. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58481-1>

Xie, C., & Hwang, R. (2022). Purity Control Based on a Type-II Fuzzy Controller for a Simulated Moving Bed. *Processes*, 10(11), 2437. <https://doi.org/10.3390/pr10112437>

Xie, C., & Tang, Y. (2021). Applicant hierarchical fuzzy controller for concentration control of simulated moving bed. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97134-5>

<sup>1</sup> estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá [Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co](mailto:Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co)

<sup>2</sup>Estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá [Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co](mailto:Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co)

<sup>3</sup>Docente de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá [bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co](mailto:bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co)

Eslami, A., Pauli, D., & Khinast, J. G. (2024). Data-driven model predictive control for continuous pharmaceutical manufacturing. *Journal of*

*Pharmaceutical Sciences*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.xphs.2024.08.014>

<sup>1</sup> estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá  
[Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co](mailto:Quintanilla.lina@uniagraria.edu.co)

<sup>2</sup>Estudiante de Pregrado de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá  
[Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co](mailto:Chaparro.camilo@uniagraria.edu.co)

<sup>3</sup>Docente de la Universidad UNIAGRARIA – Colombia Facatativá  
[bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co](mailto:bautista.jhonhe@uniagraria.edu.co)