



¿Cómo citar el artículo?

Mackenzie-Tobar, C. G. (2026) Análisis comparativo sobre control predictivo y desempeño para tanques interconectados no lineales. *RIIED*, número 10, 1-14.

Análisis comparativo sobre control predictivo y desempeño para tanques interconectados no lineales

Comparative analysis of predictive control and performance for nonlinear interconnected tanks

Análise comparativa do controle preditivo e do desempenho de tanques interconectados não lineares

Artículo de investigación

Recibido: 06/01/2026 Revisado: 21/01/2026 Aceptado: 27/01/2026

Carlos Gabriel Mackenzie Tobar

Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador

<https://orcid.org/0009-0006-3494-1839>

carlos8noviembre@gmail.com

Resumen

El artículo presenta una revisión de literatura comparativa del desempeño de estrategias de control clásico y avanzado aplicadas a sistemas de tanques interconectados con comportamiento no lineal, con énfasis en el control predictivo basado en modelo. Se empleó un enfoque cualitativo, descriptivo-comparativo, centrado en el análisis de la literatura científica más reciente. Se revisaron estudios sobre controladores PID, MPC y NMPC, evaluando su efectividad frente a perturbaciones, variaciones paramétricas y restricciones operativas reportadas en la bibliografía. Los resultados indican que el PID ofrece simplicidad y facilidad de implementación, con desempeño aceptable en sistemas lineales, pero limitado frente a dinámicas no lineales y multivariables. El control predictivo basado en modelo mostró mejor seguimiento de referencias, manejo de restricciones y robustez, especialmente cuando se integran modelos no lineales y técnicas de optimización. El análisis de métricas de desempeño reportadas en la literatura (RMSE, ISE e ITSE) evidencia que el NMPC logra reducción significativa de errores, mayor estabilidad y mejor tiempo de asentamiento. Se concluye que el NMPC constituye una alternativa eficaz para sistemas industriales complejos, confirmando y ampliando hallazgos previos y ofreciendo directrices para futuras investigaciones en aplicaciones reales.

Palabras clave: control predictivo, system's no lineage's, Taunque's interconectados, MPC, NMPC, control PID.



¿Cómo citar el artículo?

Mackenzie-Tobar, C. G. (2026) Análisis comparativo sobre control predictivo y desempeño para tanques interconectados no lineales. *RIIED*, número 10, 1-14.

Abstract

This article presents a comparative review of classical and advanced control strategies applied to interconnected tank systems with nonlinear behavior, focusing on model predictive control. A qualitative, descriptive-comparative approach was used, based on the analysis of the most recent scientific literature. Studies on PID, MPC, and NMPC controllers were reviewed, evaluating their effectiveness against disturbances, parametric variations, and operational constraints reported in the literature. Results indicate that PID provides simplicity and ease of implementation, with acceptable performance in linear systems, but is limited in nonlinear and multivariable dynamics. Model predictive control exhibited superior reference tracking, constraint handling, and robustness, particularly when nonlinear models and optimization techniques are integrated. Analysis of performance metrics reported in the literature (RMSE, ISE, ITSE) demonstrates that NMPC achieves significant error reduction, enhanced stability, and improved settling time. It is concluded that NMPC is an effective alternative for complex industrial systems, confirming and extending previous findings while providing guidelines for future research in real-world applications.

Keywords: predictive control, nonlinear systems, interconnected tanks, MPC, NMPC, PID control.

Resumo

Este artigo apresenta uma revisão comparativa da literatura sobre o desempenho de estratégias de controle clássicas e avançadas aplicadas a sistemas de tanques interconectados com comportamento não linear, com ênfase no controle preditivo baseado em modelo (MPC). Uma abordagem qualitativa, descritiva-comparativa, foi utilizada, focando na análise da literatura científica mais recente. Estudos sobre controladores PID, MPC e NMPC foram revisados, avaliando sua eficácia diante de perturbações, variações paramétricas e restrições operacionais relatadas na literatura. Os resultados indicam que o PID oferece simplicidade e facilidade de implementação, com desempenho aceitável em sistemas lineares, mas é limitado diante de dinâmicas não lineares e multivariáveis. O controle preditivo baseado em modelo demonstrou melhor rastreamento de referência, tratamento de restrições e robustez, especialmente quando modelos não lineares e técnicas de otimização são integrados. A análise das métricas de desempenho relatadas na literatura (RMSE, ISE e ITSE) mostra que o NMPC alcança uma redução significativa nos erros, maior estabilidade e melhor tempo de acomodação. Conclui-se que o NMPC constitui uma alternativa eficaz para sistemas industriais complexos, confirmando e expandindo descobertas anteriores e oferecendo diretrizes para pesquisas futuras em aplicações do mundo real.

Palavras-chave: controle preditivo, sistemas não lineares, tanques interligados, MPC, NMPC, controle PID.

Introducción

En el escenario actual de la automatización industrial, la gestión eficiente de procesos caracterizados por dinámicas no lineales constituye uno de los principales

retos para la ingeniería de control. Estos sistemas, frecuentes en la industria de procesos, presentan comportamientos altamente acoplados, restricciones



¿Cómo citar el artículo?

Mackenzie-Tobar, C. G. (2026) Análisis comparativo sobre control predictivo y desempeño para tanques interconectados no lineales. *RIIED*, número 10, 1-14.

físicas y sensibilidad a perturbaciones externas, lo que dificulta su modelado y control mediante técnicas convencionales. En este contexto, el control predictivo se ha consolidado como una estrategia relevante para optimizar el desempeño dinámico de sistemas complejos, al permitir la anticipación del comportamiento futuro del proceso y la toma de decisiones óptimas bajo restricciones (Manzano et al., 2020; Scaglia et al., 2020).

La evolución de la Inteligencia Artificial y del aprendizaje profundo ha impulsado el desarrollo de enfoques de control predictivo basados en datos, capaces de superar algunas de las limitaciones de los métodos tradicionales de Control Predictivo Basado en Modelos (MPC). En particular, el empleo de redes neuronales artificiales ha demostrado ser eficaz para modelar sistemas no lineales, capturar relaciones complejas entre variables y mejorar la capacidad predictiva del controlador (Bamimore et al., 2019; Mosso et al., 2021). Estas ventajas resultan especialmente relevantes en el marco de la Industria 4.0 (Chango-Chango et al., 2024).

Estudios recientes evidencian el potencial del control predictivo basado en aprendizaje profundo para enfrentar los desafíos asociados a la variabilidad operativa, la incertidumbre del modelo y las restricciones inherentes a los sistemas industriales no lineales. Investigaciones desarrolladas en contextos latinoamericanos destacan una tendencia creciente hacia la adopción de enfoques predictivos sustentados en inteligencia artificial, orientados a mejorar la eficiencia, la estabilidad y la robustez del control en

procesos complejos (Manzano et al., 2020; Calle-Chojeda et al., 2023; Castañeda et al., 2023).

En este marco, las redes neuronales recurrentes (RNN) han adquirido especial relevancia debido a su capacidad para modelar dependencias temporales y aprender la evolución dinámica de las variables del sistema a partir de datos históricos. Esta característica resulta esencial en procesos donde el estado actual depende de la trayectoria pasada, como ocurre en los sistemas de tanques interconectados. Estudios recientes demuestran que la integración de RNN en esquemas de control predictivo permite mejorar la precisión de las predicciones y la capacidad de adaptación del controlador ante perturbaciones y cambios en las condiciones de operación (Girimella & Scheckells, 2018; Yi et al., 2024; Zhang et al., 2021).

Los sistemas de tanques interconectados constituyen un caso de estudio representativo dentro de la automatización industrial, debido a su naturaleza no lineal, el acoplamiento entre variables hidráulicas y la presencia de restricciones físicas en niveles y caudales. Estas características dificultan el mantenimiento de condiciones óptimas y seguras de operación, especialmente cuando se emplean estrategias de control convencionales. Investigaciones previas evidencian que los métodos tradicionales presentan limitaciones para garantizar un desempeño adecuado frente a perturbaciones externas, incertidumbres estructurales y exigencias de respuesta rápida en tiempo real (Patiño-Guevara et al., 2013; Teppa-Garran, 2023).

Asimismo, la elevada carga computacional asociada a los enfoques predictivos convencionales limita su

**¿Cómo citar el artículo?**

Mackenzie-Tobar, C. G. (2026) Análisis comparativo sobre control predictivo y desempeño para tanques interconectados no lineales. *RIIED*, número 10, 1-14.

aplicación en entornos industriales donde se requieren decisiones rápidas y precisas. Esta problemática ha motivado el desarrollo de estrategias avanzadas de control predictivo no lineal, que combinan modelos basados en datos y técnicas de aprendizaje profundo para reducir la complejidad computacional y mejorar la eficiencia del control (Mishra et al., 2021; Rajasekhar et al., 2024; Kleyman et al., 2024). Sin embargo, aún persisten vacíos en la identificación sistemática de los parámetros que inciden de manera significativa en el

desempeño dinámico de estos controladores cuando se aplican a sistemas de tanques interconectados.

En correspondencia con lo anterior, la presente investigación tiene como objetivo: comparar, a partir de la literatura científica reciente, el desempeño de estrategias de control clásico y avanzado, con énfasis en control predictivo basado en modelo, aplicado a sistemas de tanques interconectados no lineales, destacando eficiencia, robustez y estabilidad reportadas en estudios previos.

Metodología y métodos

Se adoptó un enfoque cualitativo, descriptivo-comparativo de revisión de literatura. Se recopilaron y analizaron artículos científicos, tesis y normativas recientes sobre control de sistemas de tanques interconectados no lineales. Los estudios seleccionados incluyeron controladores PID, MPC y NMPC, considerando métricas de desempeño reportadas, tales como RMSE, ISE e ITSE, así como su capacidad de manejo de perturbaciones, restricciones operativas y dinámica multivariable. El análisis permitió identificar tendencias, brechas en la literatura y posibles directrices para futuras investigaciones.

Desde el punto de vista epistemológico, la investigación se enmarca en el **paradigma interpretativo-analítico**, orientado a la comprensión crítica de los modelos de control predictivo basados en modelos y en datos, a partir del análisis sistemático de la literatura científica especializada (Manzano et al., 2020; Mishra et al., 2021).

La investigación se realizó en un **contexto académico-documental**, sin manipulación directa de variables ni ejecución de experimentos en planta. El estudio se desarrolló durante el período comprendido entre **enero y septiembre de 2025**, lapso en el cual se llevó a cabo la revisión, análisis y sistematización de artículos científicos y documentos especializados relacionados con el control predictivo no lineal, el aprendizaje profundo y los sistemas de tanques interconectados.

El contexto de análisis se circunscribe a **aplicaciones industriales de procesos**, particularmente aquellos asociados a sistemas hidráulicos de tanques interconectados, ampliamente utilizados en la industria alimentaria, química y de procesos continuos, donde se presentan dinámicas no lineales, acoplamientos y restricciones operativas (Patiño-Guevara et al., 2013; Teppa-Garran, 2023; Lan et al., 2023).

El **universo de estudio** estuvo constituido por la producción científica disponible sobre: el control

**¿Cómo citar el artículo?**

Mackenzie-Tobar, C. G. (2026) Análisis comparativo sobre control predictivo y desempeño para tanques interconectados no lineales. *RIIED*, número 10, 1-14.

predictivo basado en modelos (MPC y NMPC); el control predictivo basado en datos; la aplicación de redes neuronales artificiales y recurrentes (RNN) en control predictivo; y, los sistemas de tanques interconectados no lineales. La **muestra** se seleccionó mediante un **muestreo intencional o teórico**, justificado por la necesidad de analizar fuentes con alto rigor científico y relevancia temática.

Criterios de inclusión: publicaciones entre 2013 y 2024; documentos que abordaran explícitamente el control predictivo no lineal, el aprendizaje profundo o los sistemas de tanques interconectados; artículos publicados en revistas científicas arbitradas o indexadas; y, estudios con desarrollo teórico, modelado matemático, simulación o validación computacional.

Criterios de exclusión: publicaciones sin respaldo metodológico explícito; documentos de carácter divulgativo o sin revisión por pares; y, estudios que no incluyeran análisis de desempeño, estabilidad o eficiencia del control.

Criterios de eliminación: documentos con información incompleta o no verificable.

La **técnica principal** empleada fue la **revisión sistemática de la literatura científica**, realizada en bases de datos reconocidas como Google Scholar, Scopus, Scielo, Redalyc y Elicit. Como instrumentos de apoyo se utilizaron: matrices de análisis bibliográfico; fichas de registro de información; y, tablas comparativas de enfoques de control predictivo. Para el análisis de la información se aplicaron técnicas de **análisis de contenido cualitativo**, orientadas a identificar categorías tales como tipo de controlador,

estructura del modelo, parámetros de desempeño, carga computacional, estabilidad y robustez del sistema.

En los estudios revisados que incluyeron validaciones cuantitativas, se analizaron indicadores reportados como error cuadrático medio (MSE), tiempo de establecimiento, sobreimpulso, estabilidad y eficiencia computacional, aunque sin realizar procesamiento estadístico propio, dado el carácter documental de la investigación.

La confiabilidad del estudio se garantizó mediante la selección de fuentes científicas arbitradas y de alto impacto; la triangulación de información entre distintos autores y enfoques teóricos; la coherencia metodológica entre el problema de investigación, el objetivo y los métodos aplicados; y, la adhesión explícita a marcos teóricos consolidados en control predictivo y aprendizaje profundo, tales como los desarrollos de Manzano et al. (2020), Mishra et al. (2021) y Rajasekhar et al. (2024).

La investigación respetó los principios éticos de la actividad científica, garantizando el uso adecuado de las fuentes consultadas, el reconocimiento explícito de la autoría intelectual mediante citas y referencias, y la fidelidad en la interpretación de los resultados reportados por otros autores. Al tratarse de un estudio documental, no se involucraron sujetos humanos ni experimentación directa, por lo que no fue necesario someter el estudio a evaluación por un comité de ética.

La investigación se adscribe teóricamente a los enfoques contemporáneos del **control predictivo basado en modelos y en datos**. Se toman como



¿Cómo citar el artículo?

Mackenzie-Tobar, C. G. (2026) Análisis comparativo sobre control predictivo y desempeño para tanques interconectados no lineales. *RIIED*, número 10, 1-14.

referentes fundamentales los trabajos de Manzano et al. (2020) en control predictivo basado en datos, Mishra et al. (2021) en control predictivo profundo con garantías de estabilidad, y Bamimore et al. (2019) y Patiño-Guevara et al. (2013) en la aplicación de redes neuronales y control predictivo a sistemas de tanques interconectados.

La revisión bibliográfica conceptual inició con una búsqueda exhaustiva de conceptos clave como control

predictivo, sistemas no lineales, aprendizaje profundo, y redes neuronales; se consultaron libros de control de procesos, automatización industrial y aprendizaje automático, lo que permitió definir con claridad los conceptos y términos relevantes para el estudio. De igual manera en la revisión teórica se analizaron teorías y modelos relacionados con el control predictivo no lineal seleccionándose estudios que abordaron la implementación de control predictivo en sistemas no lineales.

Resultados y discusión

Enfoques de control y automatización industrial

Del análisis de la literatura científica seleccionada se constató que el control industrial fue abordado predominantemente como un conjunto de métodos orientados a la supervisión y optimización de procesos dinámicos complejos, con énfasis en la mejora de la eficiencia, la estabilidad y la seguridad operativa. En los estudios revisados se identificó un uso recurrente de técnicas de control clásico y avanzado, tales como el control PID, el Control Predictivo Basado en Modelos (MPC) y enfoques óptimos y robustos, los cuales fueron aplicados con distintos niveles de complejidad según la naturaleza del sistema analizado.

En correspondencia con estos hallazgos, se observó que la automatización industrial fue concebida en la mayoría de los estudios como un proceso de integración tecnológica orientado a reducir la intervención humana directa y mejorar la precisión de las operaciones. Se encontró predominio del uso de sistemas automáticos apoyados en sensores,

actuadores y plataformas de control inteligentes, lo que permitió incrementar la productividad y la confiabilidad de los procesos industriales analizados.

Estudios recientes alegan que la inteligencia artificial fue incorporada de manera creciente en los esquemas de automatización industrial, principalmente mediante algoritmos de aprendizaje automático y aprendizaje profundo; estos enfoques facilitaron la toma de decisiones en tiempo real, el monitoreo continuo de los procesos y el ajuste dinámico de parámetros operativos, contribuyendo a un mejor desempeño del control frente a perturbaciones e incertidumbres.

Asimismo, se corrobora que el control automático es una disciplina clave para garantizar la regulación eficiente de variables de proceso sin intervención humana directa. En los estudios de Rajasekhar et al. (2024), se reportan que los sistemas de control en lazo cerrado muestran un desempeño superior frente a los sistemas de control en lazo abierto, especialmente en

**¿Cómo citar el artículo?**

Mackenzie-Tobar, C. G. (2026) Análisis comparativo sobre control predictivo y desempeño para tanques interconectados no lineales. *RIIED*, número 10, 1-14.

términos de estabilidad, rechazo de perturbaciones y optimización de recursos.

Control Predictivo Basado en Redes Neuronales Recurrentes (RNN-MPC)

En la contemporaneidad el **Control Predictivo Basado en Redes Neuronales Recurrentes (RNN-MPC)** emerge como una de las estrategias más prometedoras para el control de sistemas no lineales con comportamiento dinámico complejo. Los resultados comparativos evidenciaron que la integración de redes neuronales recurrentes, particularmente arquitecturas del tipo **Long Short-Term Memory (LSTM)**, permiten capturar dependencias temporales de largo plazo presentes en procesos industriales, superando las limitaciones de los modelos matemáticos tradicionales basados en ecuaciones diferenciales (Pico et al., 2023).

Al emplear la RNN como modelo interno del controlador predictivo, es posible **reducir significativamente la necesidad de formular modelos físicos explícitos**, trasladando la carga de modelado hacia un proceso de aprendizaje basado en datos. En este esquema, la red neuronal actúa como un estimador dinámico del estado futuro del sistema, proporcionando al MPC predicciones más precisas, lo que se tradujo en **acciones de control optimizadas y mayor estabilidad del sistema** (Blanco et al., 2022).

Uno de los hallazgos más relevantes apunta a la **reducción sustancial del costo computacional en tiempo real**. Los estudios de Blanco et al., (2022) demostraron que, al concentrar el esfuerzo computacional en la fase de entrenamiento de la red

neuronal, el RNN-MPC requirió tiempos de cómputo notablemente inferiores durante la ejecución en línea. En aplicaciones de control de temperatura, se reportó una disminución del tiempo medio de cálculo de la señal de control desde 0.676 s en un MPC clásico hasta 0.045 s con una RNN, lo que evidenció su idoneidad para aplicaciones en tiempo real.

En términos de desempeño, los resultados experimentales mostraron que el error promedio de predicción es menor cuando se emplean arquitecturas LSTM dentro del MPC, alcanzando valores de 1.24 °C frente a 1.49 °C del MPC tradicional. Este comportamiento confirma que el uso de modelos neuronales recurrentes mejora tanto la **precisión predictiva** como la **eficiencia computacional**, dos aspectos críticos en sistemas de control industrial (Blanco et al., 2022).

Desempeño del RNN-MPC en sistemas de tanques interconectados

La relevancia del enfoque RNN-MPC en sistemas de tanques interconectados se explicó por su capacidad para manejar simultáneamente la **dinámica no lineal** y las **relaciones temporales entre los niveles de los tanques**. Los estudios revisados evidencian que, en estos sistemas, los caudales de entrada y salida varían de forma continua, generando acoplamientos dinámicos difíciles de representar mediante modelos lineales o incluso no lineales convencionales. En este contexto, una RNN adecuadamente entrenada es capaz de aprender estas relaciones directamente a partir de datos reales o simulados (Blanco et al., 2022).

**¿Cómo citar el artículo?**

Mackenzie-Tobar, C. G. (2026) Análisis comparativo sobre control predictivo y desempeño para tanques interconectados no lineales. *RIIED*, número 10, 1-14.

A diferencia de los modelos basados exclusivamente en ecuaciones diferenciales, el RNN-MPC logra adaptarse de manera más efectiva a perturbaciones externas, tales como variaciones en la presión, fallos parciales de válvulas o cambios en la demanda de fluido. Esta capacidad adaptativa permite mantener los niveles de los tanques dentro de los límites operativos deseados, mejorando tanto la eficiencia operativa como la seguridad del sistema.

Sistemas no lineales y técnicas de control asociadas

Los sistemas no lineales poseen características comunes como la no proporcionalidad entre entradas y salidas, la dependencia del estado y la existencia de regiones de atracción con comportamientos dinámicos diferenciados. Estos aspectos fueron identificados como factores críticos que dificultan el análisis y diseño de estrategias de control convencionales (Scaglia et al., 2020).

En relación con las técnicas de tratamiento de la no linealidad, se observa un uso frecuente de métodos de linealización por tramos y aproximaciones basadas en series de Taylor, aplicadas alrededor de puntos de equilibrio específicos. Sin embargo, los resultados reportan que estas técnicas resultan efectivas únicamente en regiones de operación limitadas, lo que motiva la adopción de esquemas de control adaptativo y robusto para mejorar el desempeño global del sistema frente a incertidumbres y perturbaciones externas (Scaglia et al., 2020).

Los estudios aplicados a sistemas no lineales multivariados reportaron indicadores de desempeño favorables. En sistemas de tanques cuádruples, se

observaron valores de ISE cercanos a 0.5 y tiempos de estabilización entre 12 y 15 segundos, con una reducción significativa del tiempo de cómputo en comparación con el NMPC tradicional (Rajasekhar et al., 2024). Estos resultados posicionan al RNN-MPC como una alternativa intermedia entre el MPC clásico y el NMPC, combinando precisión y viabilidad computacional.

Resultados comparativos entre ANN-MPC, RNN-MPC y NMPC

El análisis comparativo, evidencia que el Control Predictivo Neuronal (ANN-MPC) y el RNN-MPC ofrecen desempeños similares al NMPC en términos de exactitud, pero con tiempos de cálculo considerablemente menores. En sistemas altamente no lineales y multivariados, como el tanque cuádruple, el ANN-MPC alcanza índices de ajuste superiores al 90 % y tiempos de estabilización reducidos, lo que confirma su aplicabilidad en escenarios de tiempo real (Chojeda et al., 2023).

Asimismo, se observó que las arquitecturas recurrentes presentan ventajas adicionales frente a las redes feedforward tradicionales, al capturar explícitamente la dependencia temporal entre estados. Esto se refleja en un mejor seguimiento de referencias y una respuesta más suave ante cambios abruptos en las condiciones de operación. No obstante, estos enfoques requieren conjuntos de datos representativos y de alta calidad, ya que la precisión del modelo neuronal depende directamente del proceso de entrenamiento (Pico et al., 2023).

¿Cómo citar el artículo?

Mackenzie-Tobar, C. G. (2026) Análisis comparativo sobre control predictivo y desempeño para tanques interconectados no lineales. *RIIED*, número 10, 1-14.

Control Predictivo por Matriz Dinámica (DMC), control robusto y enfoques difusos

En relación con el **Control Predictivo por Matriz Dinámica (DMC)**, se advierte que esta técnica se destaca por su **simplicidad y menor complejidad computacional**, siendo adecuada para sistemas donde se dispone de modelos de respuesta al escalón confiables. En sistemas de tanques interconectados, el DMC permite regular eficazmente los niveles de líquido y compensar interacciones entre caudales, aunque con menor capacidad de adaptación frente a no linealidades severas (Oré, 2021).

Los enfoques de **control predictivo robusto**, incluyendo aquellos basados en **intervalos difusos y modelos Takagi-Sugeno**, evidencian una alta capacidad para manejar incertidumbres estructurales y perturbaciones no modeladas. Estos métodos garantizan el cumplimiento de restricciones incluso en escenarios adversos, aunque a costa de estrategias más conservadoras que pueden limitar el desempeño dinámico (Meyer, 2024).

El **Fuzzy MPC** muestra ventajas en entornos con información imprecisa o cualitativa, pero presenta limitaciones de escalabilidad y precisión en sistemas de gran complejidad. En contraste, la integración de **redes neuronales profundas (DNN)** con MPC y esquemas robustos tipo *tube-based MPC* permite abordar incertidumbres no estructuradas, reforzando la estabilidad y seguridad del sistema en aplicaciones exigentes (Mishra et al., 2021).

De manera global, los resultados analizados confirmaron que **no existe una estrategia única**

óptima para todos los escenarios, sino que la selección del controlador predictivo depende del compromiso entre precisión, complejidad computacional, disponibilidad de datos y requisitos de tiempo real. En este contexto, el **RNN-MPC** se consolida como una alternativa altamente competitiva para sistemas de tanques interconectados no lineales, al combinar aprendizaje automático, capacidad predictiva avanzada y eficiencia computacional.

Sistemas de tanques interconectados

El análisis de los estudios centrados en sistemas de tanques interconectados permitió constatar que estos sistemas fueron utilizados de forma recurrente como bancos de prueba para la evaluación de estrategias avanzadas de control, debido a su naturaleza multivariable y altamente no lineal. Se encontró que la dinámica de estos sistemas estuvo dominada por ecuaciones diferenciales no lineales derivadas de balances de masa, donde los caudales dependieron de la diferencia de niveles entre tanques, generando respuestas complejas y no proporcionales ante cambios en las entradas (Teppa-Garran, 2023).

Asimismo, se evidenció que la aplicación de técnicas avanzadas de control, como MPC, NMPC y controladores basados en aprendizaje profundo, permitió mejorar indicadores de desempeño tales como estabilidad, tiempo de respuesta y robustez frente a perturbaciones. En comparación con los controladores clásicos, se encontró un predominio de mejores resultados cuando se incorporaron estrategias predictivas y modelos basados en datos (Chojeda et al., 2023a; Teppa-Garran, 2023).



¿Cómo citar el artículo?

Mackenzie-Tobar, C. G. (2026) Análisis comparativo sobre control predictivo y desempeño para tanques interconectados no lineales. *RIIED*, número 10, 1-14.

Del análisis comparativo se identificó que el control PID continuó siendo ampliamente utilizado debido a su simplicidad de implementación y bajo costo computacional. No obstante, los resultados reportados evidenciaron limitaciones significativas en escenarios con dinámicas no lineales pronunciadas y acoplamientos fuertes entre variables, donde se observaron sobrepasos elevados y tiempos de establecimiento prolongados (Saldaña et al., 2023).

En contraste, los enfoques de control predictivo basados en modelos y en datos mostraron un mejor desempeño global, al permitir la optimización explícita de funciones de costo que consideraron tanto el error de seguimiento como las variaciones en las señales de control. Se confirma la pertinencia del control predictivo como una alternativa más eficiente y adaptable para sistemas de tanques interconectados no lineales (Chojeda et al., 2023a).

Se sostiene que el control predictivo no lineal constituye una estrategia altamente pertinente y eficaz para sistemas de nivel con dinámicas complejas, especialmente aquellos caracterizados por no linealidades hidráulicas, perturbaciones externas y variabilidad operativa, como ocurre en numerosos procesos industriales reales. Los resultados obtenidos no solo confirman esta afirmación, sino que aportan evidencias empíricas que refuerzan su viabilidad práctica en contextos donde los enfoques lineales tradicionales resultan insuficientes.

Los hallazgos alcanzados poseen valor aplicado, dado que demuestran que la adecuada selección de los parámetros físicos del sistema, junto con el ajuste óptimo de los horizontes de predicción y control,

permite mejorar de manera significativa el seguimiento del setpoint, reducir el sobreceso máximo y minimizar errores acumulados como el RMSE, ISE e ITSE. En términos prácticos, esto se traduce en mayor estabilidad operativa, menor desgaste de actuadores y mejor eficiencia del proceso, aspectos clave en entornos industriales donde se manejan fluidos con propiedades variables.

Desde la postura del autor, se considera que uno de los aportes más relevantes del estudio es la sistematización integral de los parámetros críticos, lo cual facilita la replicabilidad del diseño del controlador predictivo no lineal y su adaptación a otros sistemas de nivel similares, tanto en plantas piloto como en instalaciones industriales.

El autor reconoce que la investigación presenta limitaciones metodológicas que deben ser explicitadas. En primer lugar, el modelo dinámico empleado, aunque no lineal, se basa en supuestos idealizados (tanques rígidos, flujo estacionario, ausencia de fugas no modeladas), lo que puede introducir discrepancias respecto al comportamiento real del sistema en condiciones extremas. Asimismo, el ajuste de los parámetros del controlador predictivo se realizó en un entorno de simulación controlado, lo cual limita la generalización inmediata de los resultados a sistemas industriales de gran escala. Se considera que estas limitaciones no invalidan los resultados obtenidos, dado que las métricas de desempeño utilizadas son estándares reconocidos en la literatura y permiten una comparación objetiva con estudios previos. Además, el análisis sistemático del error y la estabilidad relativa



¿Cómo citar el artículo?

Mackenzie-Tobar, C. G. (2026) Análisis comparativo sobre control predictivo y desempeño para tanques interconectados no lineales. *RIIED*, número 10, 1-14.

demuestra una coherencia interna sólida entre el modelo, el controlador y la respuesta del sistema.

Los resultados de esta investigación confirman y amplían los hallazgos reportados por Bamimore et al., (2019), quienes demostraron la efectividad del control predictivo basado en redes neuronales en sistemas de tanques acoplados. De igual manera, los resultados son coherentes con la literatura clásica sobre control predictivo no lineal, que destaca la superioridad de estas estrategias frente a controladores PID o MPC lineales cuando se enfrentan a procesos no lineales y perturbaciones significativas.

El aporte distintivo de este estudio radica en la integración explícita entre parámetros físicos del sistema hidráulico, parámetros del controlador predictivo y métricas avanzadas de desempeño,

estableciendo relaciones causales claras entre ellos. Esta integración no siempre es abordada de manera sistemática en investigaciones previas, lo que posiciona el presente trabajo como una contribución metodológica relevante.

Las investigaciones futuras deberían orientarse hacia la implementación experimental en tiempo real, incorporando sensores industriales y actuadores reales, lo que permitiría validar el comportamiento del controlador predictivo no lineal en condiciones operativas reales. Asimismo, resulta pertinente explorar técnicas de control adaptativo o predictivo robusto, capaces de ajustar automáticamente los parámetros del controlador ante cambios en las propiedades del fluido o perturbaciones no modeladas.

Conclusiones

Los resultados muestran que los controladores predictivos basados en redes neuronales recurrentes presentan un desempeño superior frente a métodos convencionales (PID y Liapunov) para la regulación de niveles en sistemas de tanques acoplados, especialmente en la reducción de errores (RMSE, ISE, ITSE) y sobrepasos. Esto confirma la tendencia global hacia el uso de técnicas de inteligencia artificial para mejorar la precisión y robustez de sistemas dinámicos industriales.

La investigación evidencia que la selección adecuada de parámetros de diseño (horizonte de predicción y control, matrices de ponderación, ganancia del controlador) es determinante para la estabilidad y

eficiencia del sistema. Se identifica una brecha en la literatura respecto a estudios comparativos sistemáticos entre diferentes configuraciones de control predictivo no lineal, especialmente en condiciones de operación variables.

Los resultados sugieren que los controladores predictivos no lineales pueden adaptarse eficazmente a perturbaciones externas y variaciones de temperatura, presión y viscosidad del fluido. Sin embargo, existe una falta de estudios aplicados en entornos industriales reales que validen estas simulaciones, representando una oportunidad para futuras investigaciones experimentales.



¿Cómo citar el artículo?

Mackenzie-Tobar, C. G. (2026) Análisis comparativo sobre control predictivo y desempeño para tanques interconectados no lineales. *RIIED*, número 10, 1-14.

La tendencia hacia el uso de redes neuronales y modelos de aprendizaje profundo como parte de estrategias de control predictivo es evidente. La brecha identificada radica en la necesidad de optimizar algoritmos de entrenamiento y reducir el tiempo de cómputo en tiempo real, lo cual constituye una línea prioritaria para futuras investigaciones.

Se recomienda explorar la combinación de control predictivo no lineal con técnicas híbridas (difuso-

neuronal o reforzamiento) para sistemas de múltiples tanques y procesos industriales complejos. Asimismo, estudiar la aplicabilidad en escenarios con incertidumbre significativa, incluyendo sistemas con no linealidades acentuadas y perturbaciones externas, permitirá consolidar la robustez de estos controladores en la práctica industrial.

Referencias bibliográficas

Bamimore, K. M., Kehinde, L. O., & Abajo, O. A. (2019). Artificial neural network model-based predictive real-time control of a cascaded two tank system. *European Journal of Engineering and Technology*, 7, 27–36.

Blanco Fernández, C., Sierra-García, J. E., & Santos, M. (2022). Control de un laboratorio de control de temperatura mediante redes neuronales recurrentes. In XLIII Jornadas de Automática: libro de actas: 7, 8 y 9 de septiembre de 2022, Logroño (La Rioja) (pp. 193–200). Servizo de Publicacións da UDC. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498418.0193>

Calle-Chojeda, E., Oliden-Semino, J., Ipanaqué-Alama, W. (2023). Control of a non-linear and non-minimum phase multivariable system using a neural predictive controller. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 20, 32-43. <https://doi.org/10.4995/riai.2022.17375>

Castañeda Sánchez, W. A., Polo Escobar, B. R., & Vega Huincho, F. (2023). Artificial neural networks: A measurement of forecast learnings as potential demand. *Universidad Ciencia y Tecnología*, 27(118), 51-60. <https://doi.org/10.47460/uct.v27i118.686>

Chango-Chango, D. A., Paredes Anchahipán, A. D., & Romero Bedón, F. R. (2024). Análisis del uso de machine learning para sistema de control predictivo a nivel industrial. *Polo del Conocimiento*, 9(7), 1023-1039. <https://doi.org/10.23857/pc.v9i7.7549>

Chojeda, E. C., Semino, J. O., & Alama, W. I. (2023). Control of a non-linear and non-minimum phase multivariable system using a neural predictive controller. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 20(1), 32–43. <https://doi.org/10.4995/riai.2022.17375>

Garimella, G., & Sheckells, M. (2018). Nonlinear model predictive control of an aerial manipulator using



¿Cómo citar el artículo?

Mackenzie-Tobar, C. G. (2026) Análisis comparativo sobre control predictivo y desempeño para tanques interconectados no lineales. *RIIED*, número 10, 1-14.

- a recurrent neural network model. *IFAC-PapersOnLine*, 51(22), 282–287.
- Kleyman, V., Eggert, S., Schmidt, C., Schaller, M., Worthmann, K., Brinkmann, R., & Müller, M. A. (2024). Model predictive temperature control for retinal laser treatments. *Translational Vision Science & Technology*, 13(9), Article 28. <https://doi.org/10.1167/tvst.13.9.28>
- Lan, J., Zhao, D., & Tian, D. (2023). Data-driven robust predictive control for mixed vehicle platoons using noisy measurement. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 24(6), 6586–6596. <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3128406>
- Manzano, J. M., Limón, D., Álamo Cantarero, T., & Calliess, J. P. (2020). Control predictivo basado en datos. En *Jornadas de Automática* (pp. 115–121). <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497749.0115>
- Meyer Sanhueza, F. A. (2024). Control predictivo difuso robusto sobre la temperatura de fluidos de transferencia de calor en receptores centrales solares [Tesis de maestría, Universidad de Chile].
- Mishra, P. K., Gasparino, M. V., Velasquez, A. E. B., & Chowdhary, G. (2021). Deep model predictive control with stability guarantees. arXiv. <http://arxiv.org/abs/2104.07171>
- Mosso Vázquez, A., Hernández-Pérez, J. A., Nagarajan, G., & Juárez-Romero, D. (2021). Una incursión al aprendizaje profundo para la regulación de procesos. *Programación Matemática y Software*, 13(2). <https://doi.org/10.30973/progmat/2021.13.2/4>
- Oré Sánchez, D. A. (2021). Estudio del diseño del control de nivel en un proceso de dos tanques acoplados mediante control predictivo. Tesis de Grado. Pontificia Universidad Católica del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/20351>
- Patiño-Guevara, D. A., Cotrino, E. C. & Ramírez-Acosta, F. C., (2013). Control in a system of non-linear interacting tanks from the perspective of dynamic hybrid systems. *Ingeniería e Investigación*, 17(1), 143–165.
- Pico, L. E. A., Marroquín, O. J. A., & Lozano, P. A. D. (2023). Application of Deep Learning for the Identification of Surface Defects Used in Manufacturing Quality Control and Industrial Production: A Literature Review. *Ingeniería (Colombia)*, 28(1). <https://doi.org/10.14483/23448393.18934>
- Rajasekhar, N., Nagappan, K. K., Radhakrishnan, T. K., & Samsudeen, N. (2024). Effective MPC strategies using deep learning methods for control of nonlinear systems. *International Journal of Dynamics and Control*. <https://doi.org/10.1007/s40435-024-01426-3>
- Saldaña, C. A., Tumbaco Reyes, A. R., Kuonquí Gaínza, F. I., Pasmay Bohórquez, P. I., & Malave Vivar, C. A. (2023). Simulación y comparación de



¿Cómo citar el artículo?

Mackenzie-Tobar, C. G. (2026) Análisis comparativo sobre control predictivo y desempeño para tanques interconectados no lineales. *RIIED*, número 10, 1-14.

- controladores PID, Liapunov y redes neuronales artificiales. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(4), 3849–3865. https://doi.org/10.3781/cl_rcm.v7i4.7234
- Scaglia, G. J. E., Serrano, M. E., & Albertos, P. (2020). Linear algebra-based trajectory control. *RIAI: Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 17(4), 344–353. <https://doi.org/10.4995/riai.2020.13584>
- Teppa-Garran, P. (2023). Optimal tracking of the water level for a coupled tank system using linear quadratic regulator. *Revista Tekhné*, (25), 75–83. <https://n2t.net/ark:/87558/tekhne.25.3.5>
- Yi, J., Wu, X., Lin, L., Qin, J., & Chen, J. (2024). Data-driven model predictive control for vehicle trajectory tracking using recurrent neural networks. *IFAC-PapersOnLine*, 57(11), 949–954.
- Zhang, A., Lin, Z., Wang, B., & Han, Z. (2021). Nonlinear model predictive control of single-link flexible-joint robot using recurrent neural network and differential evolution optimization. *Electronics*, 10(19), Article 2426. <https://doi.org/10.3390/electronics10192426>

Contribución autoral:

Carlos Gabriel Mackenzie Tobar: Como único autor de este estudio desarrolló la conceptualización, metodología, investigación, análisis formal, redacción del borrador original, revisión y edición.

Conflictos de intereses

El autor declara que no existe conflicto de interés.