



## SECCIÓN CIENCIAS TÉCNICAS

### Artículo original de investigación

# Modelación neuronal parsimoniosa para el control del secado de minerales lateríticos

Víctor Germán Rodríguez Durán <sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5019-1891>  
Deynier Montero Góngora <sup>2,8\*</sup> <https://orcid.org/0000-0003-0903-6635>  
Ángel Oscar Columbié Navarro <sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4068-1472>  
Yoalby Retirado Mediaceja <sup>2,7,8</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5098-5675>  
Eddy Luis Terrero Montero <sup>3</sup> <https://orcid.org/0009-0004-1973-7798>  
Yury Valeryevich Ilyushin <sup>4</sup> <https://orcid.org/0009-0004-3730-3790>  
Liomnis Osorio <sup>5</sup> <https://orcid.org/0000-0001-5217-318X>  
Alexander Mosquera Urbano <sup>6</sup> <https://orcid.org/0009-0003-9860-213X>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Metalurgia Electromecánica, Universidad de Moa Dr. Antonio Núñez Jiménez. Holguín, Cuba

<sup>2</sup> Centro de Estudios de Energía y Tecnología Avanzada de Moa, Facultad de Metalurgia Electromecánica, Universidad de Moa Dr. Antonio Núñez Jiménez. Holguín, Cuba

<sup>3</sup> Departamento de Defensa, Facultad de Geología Minas, Universidad de Moa Dr. Antonio Núñez Jiménez. Holguín, Cuba

<sup>4</sup> Análisis y control de sistemas, Universidad Minera Emperatriz Catalina II de San Petersburgo, San Petersburgo, Rusia

<sup>5</sup> Departamento de Procesos Industriales, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Temuco, Temuco, Chile

<sup>6</sup> Instituto Nacional de Innovación Tecnológica, Energía y Minas, Quito, Ecuador

<sup>7</sup> Becario de Posdoctorado de la AMEXCID, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México

<sup>8</sup> Academia de Ciencias de Cuba

\*Autor para la correspondencia: [dmonterog150688@gmail.com](mailto:dmonterog150688@gmail.com)

## RESUMEN

**Introducción:** El proceso de secado térmico de minerales lateríticos constituye una de las etapas de mayor consumo energético dentro de la industria metalúrgica del níquel, siendo la eficiencia de la combustión un factor determinante en el desempeño global del sistema. **Objetivo:** Desarrollar modelos de redes neuronales artificiales que describan la dinámica no lineal de los lazos de control del proceso de secado de minerales lateríticos, mediante un criterio de selección multiobjetivo que garantice un equilibrio óptimo entre precisión predictiva y parsimonia estructural. **Métodos:** La investigación se realizó bajo un enfoque de experimentación pasiva, empleando datos históricos reales de operación correspondientes a un mes de funcionamiento continuo del sistema. Se evaluaron arquitecturas de perceptrón multicapa con diferente número de neuronas en la capa oculta, utilizando el error cuadrático medio y el criterio de información Bayesiano para la selección del modelo óptimo. **Resultados:** Se identificó que una arquitectura con 4 neuronas ocultas proporciona el mejor compromiso entre precisión y parsimonia. Para el lazo de aire primario se obtuvo un error cuadrático medio promedio de  $0,79596 \times 106 \text{ m}^3/\text{h}$  y un criterio de información Bayesiano de  $3,4954 \times 104$ , mientras que para el lazo de petróleo el error cuadrático medio fue de  $1,1740 \times 104 \text{ kg/h}$

### Editor

Lisset González Navarro  
Academia de Ciencias de Cuba.  
La Habana, Cuba

### Traductor

Darwin A. Arduengo García  
Academia de Ciencias de Cuba.  
La Habana, Cuba

con un criterio de información Bayesiano de  $2,4149 \times 10^4$ . Conclusiones: Se evidencian una adecuada capacidad predictiva y de generalización de los modelos seleccionados, así como la pertinencia del enfoque propuesto para apoyar el perfeccionamiento del control automático del proceso de secado, con potencial impacto en la eficiencia energética y la estabilidad operativa.

Palabras clave: secado industrial; redes neuronales artificiales; identificación de sistemas; control automático

## Parsimonious neural modeling for the control of lateritic mineral drying

### ABSTRACT

**Introduction:** The thermal drying process of lateritic minerals is one of the most energy-intensive stages in the nickel metallurgy industry, with combustion efficiency being a determining factor in the overall system performance. **Objective:** To develop artificial neural network models that describe the nonlinear dynamics of the control loops of the lateritic mineral drying process, using a multi-objective selection criterion that guarantees an optimal balance between predictive accuracy and structural parsimony. **Methods:** The research was conducted using a passive experimental approach, employing real historical operating data corresponding to one month of continuous system operation. Multilayer perceptron architectures with different numbers of neurons in the hidden layer were evaluated, using the mean squared error and the Bayesian information criterion to select the optimal model. **Results:** An architecture with four hidden neurons was identified as providing the best compromise between accuracy and parsimony. For the primary air loop, an average mean squared error of  $0.79596 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{h}$  and a Bayesian information criterion of  $3.4954 \times 10^4$  were obtained, while for the oil loop, the mean squared error was  $1.1740 \times 10^4 \text{ kg/h}$  with a Bayesian information criterion of  $2.4149 \times 10^4$ . **Conclusions:** The selected models demonstrate adequate predictive and generalization capabilities, as well as the relevance of the proposed approach to support the improvement of automatic control of the drying process, with potential impact on energy efficiency and operational stability.

Key words: industrial drying; artificial neural networks; system identification; automatic control

## INTRODUCCIÓN

La industria metalúrgica desempeña un papel estratégico en el desarrollo económico e industrial de numerosos países, particularmente en aquellos con importantes reservas de minerales metálicos. En este contexto, la producción de níquel reviste una relevancia significativa debido a su amplio uso en la fabricación de aceros inoxidables, superaleaciones y componentes de alta resistencia, sectores que demandan procesos industriales altamente eficientes, estables y ambientalmente sostenibles. Se estima que aproximadamente el 65 % del níquel producido a nivel mundial se destina a la industria del acero inoxidable, lo que evidencia su importancia estratégica en la economía global.<sup>(1,2)</sup>

Actualmente, los minerales lateríticos constituyen la principal fuente de recursos de níquel a nivel mundial, representando aproximadamente entre el 70 % y el 72 % de los recursos conocidos. Además, su contribución a la producción global de níquel ha aumentado significativamente en las últimas décadas, llegando a aportar cerca del 69 % de la producción mundial en 2020, debido al creciente aprovechamiento de estos depósitos para satisfacer la demanda de la industria del acero inoxidable y de las baterías recargables.<sup>(3,4)</sup> Cuba se encuentra entre los principales países productores de níquel a nivel internacional, basando su producción en el procesamiento de lateritas, lo que confiere al perfeccionamiento de sus procesos tecnológicos un elevado impacto económico y energético.<sup>(5)</sup> Asimismo, la industria niquelífera

cubana continúa siendo objeto de investigaciones orientadas al perfeccionamiento tecnológico y al aprovechamiento integral de sus recursos mineros, dada su relevancia estratégica para el desarrollo económico nacional. <sup>(6,7,8)</sup> No obstante, la obsolescencia parcial de los equipos, junto con la elevada complejidad de los procesos térmicos involucrados, limita el aprovechamiento óptimo de los recursos energéticos y conduce a un incremento de los costos operacionales y del impacto ambiental.

Dentro del proceso Caron, el secado térmico constituye una operación fundamental debido a su influencia sobre la eficiencia de la etapa de reducción del mineral. Esta operación, intensiva en energía, permite disminuir el contenido de humedad de la mena laterítica desde valores del orden de 28 % y 38 % hasta aproximadamente un 5 %. En la Empresa Productora de Níquel y Cobalto Comandante Ernesto Che Guevara (ECG), este proceso se lleva a cabo en secadores rotatorios, donde la eficiencia energética y la estabilidad operativa dependen en gran medida del adecuado control de la combustión en la cámara asociada. El secado industrial constituye un proceso altamente no lineal de transferencia simultánea de calor y masa, influenciado por múltiples variables operativas, perturbaciones externas y acoplamientos dinámicos complejos. <sup>(9)</sup>

La complejidad dinámica de los sistemas rotatorios utilizados en el procesamiento mineral ha sido ampliamente reconocida, particularmente debido a los fenómenos acoplados de transferencia de calor, movimiento de material y variabilidad operacional presentes en este tipo de instalaciones. <sup>(10)</sup> Revisiones recientes sobre hornos y secadores rotatorios destacan que la dinámica de transporte y secado del material presenta un comportamiento altamente no lineal, condicionado por múltiples variables operativas y perturbaciones externas, lo que dificulta su representación mediante modelos clásicos. <sup>(11)</sup>

Desde el punto de vista del control automático, la correcta regulación de los flujos de combustible y aire primario resulta crítica para garantizar una combustión eficiente, reducir el consumo de combustibles fósiles y minimizar las emisiones contaminantes. En el caso específico del secadero, el control de estos flujos se realiza mediante controladores PID (proporcional-integral-derivativo) que actúan sobre válvulas de regulación. Sin embargo, la ausencia de modelos matemáticos representativos del comportamiento dinámico del sistema obliga a realizar ajustes empíricos basados en la experiencia del operador, lo que limita la robustez, la eficiencia energética y la capacidad de optimización del proceso.

La modelación de procesos térmicos industriales complejos constituye actualmente una línea activa de investigación en la automatización de sistemas metalúrgicos y mineros. Estudios recientes han evidenciado la creciente aplicación de enfoques avanzados de modelación y control en hornos y sistemas térmicos

industriales, donde la presencia de dinámicas no lineales y fuertes acoplamientos entre variables dificulta el desarrollo de modelos convencionales precisos. <sup>(12,13)</sup>

La literatura especializada recoge diversos enfoques para la modelación de procesos de secado en secadores rotatorios, incluyendo modelos empíricos, semiempíricos y fenomenológicos. Aunque estos modelos aportan información valiosa, su aplicación en entornos industriales reales suele verse restringida por la dificultad de identificación de parámetros, la alta variabilidad de las condiciones de operación y la complejidad inherente de los fenómenos físicos involucrados. En este contexto, los enfoques de modelación basada en datos han ganado relevancia como una alternativa práctica y efectiva, debido a su capacidad para representar procesos complejos y no lineales a partir de datos operacionales, reduciendo la dependencia de parámetros físicos difíciles de determinar. <sup>(14,15)</sup>

En investigaciones previas se desarrollaron modelos paramétricos lineales de bajo orden para la representación dinámica de los lazos de aire y combustible, objeto de estudio. <sup>(16)</sup> Los modelos mostraron un adecuado desempeño descriptivo bajo condiciones específicas de operación, evidenciando su utilidad para el diseño de estrategias de control en regímenes estacionarios o cercanos a un punto de trabajo determinado. Sin embargo, su capacidad de generalización puede verse comprometida ante variaciones operativas más amplias, donde emergen comportamientos no lineales inherentes al proceso. En este contexto, resulta pertinente explorar enfoques de modelación más flexibles, como las redes neuronales artificiales (RNA).

Las RNA se han consolidado en los últimos años como herramientas robustas para la identificación y modelación de sistemas no lineales complejos, particularmente en procesos industriales donde el conocimiento mecanicista es incompleto o difícil de formalizar. Además, han demostrado su capacidad para aproximar relaciones no lineales multivariantes, capturar dinámicas complejas y generalizar adecuadamente a partir de datos reales. <sup>(17,18,19)</sup> Asimismo, se ha evidenciado su aplicabilidad en procesos térmicos, de combustión y de separación, donde presentan ventajas frente a modelos clásicos en términos de precisión predictiva, adaptabilidad y flexibilidad estructural. <sup>(20)</sup>

A pesar de los avances en la modelación de procesos de secado industrial, persiste una limitada disponibilidad de modelos que capturen simultáneamente la no linealidad del sistema y mantengan una complejidad estructural reducida que favorezca su implementación en entornos industriales reales. Los enfoques existentes, basados en modelos lineales o neuronales sin criterios explícitos de parsimonia, presentan limitaciones relacionadas con la capacidad de generalización y la aplicabilidad práctica en sistemas de control industrial.

El objetivo de la presente investigación es desarrollar modelos de redes neuronales artificiales que describan la dinámica no lineal de los lazos de control del proceso de secado de minerales lateríticos, mediante un criterio de selección multiobjetivo que garantice un equilibrio adecuado entre precisión predictiva y parsimonia estructural.

## MÉTODOS

La investigación se centra en la identificación de sistemas mediante experimentación pasiva, utilizando datos históricos reales de 1 mes de operación continua del secadero 1 en el año 2023, obtenidos en la Empresa Productora de Níquel y Cobalto Ernesto Che Guevara, ubicada en el municipio de Moa, provincia de Holguín, Cuba.

En el secadero existen 6 lazos de control asociados a variables relevantes del proceso de secado; sin embargo, la investigación se centra en los lazos de control de los flujos de petróleo y aire primario hacia la cámara de combustión, por ser los más representativos desde el punto de vista de la relación entrada-salida durante el período de experimentación pasiva analizado.<sup>(16)</sup>

El lazo de control del flujo de petróleo opera de manera independiente y permite regular la cantidad de combustible suministrado a la cámara de combustión. El operador establece un valor de referencia (SP), y un controlador PID actúa sobre la válvula de regulación (MV) para mantener el flujo real medido (PV) en torno a dicho valor. Este esquema de control indirecto introduce incertidumbres asociadas a la eficiencia de la combustión y a la variabilidad de las condiciones operativas, lo que justifica la necesidad de modelos dinámicos de apoyo.

Por su parte, el lazo de control del aire primario opera bajo un esquema de control de relación, donde la referencia se calcula como función del flujo real de petróleo mediante un coeficiente de relación determinado a partir de consideraciones estequiométricas y operativas. Este tipo de estructura introduce acoplamientos dinámicos no lineales que dificultan la modelación mediante enfoques clásicos, siendo particularmente adecuados para su tratamiento mediante técnicas de identificación basadas en datos.<sup>(17)</sup>

Ambos lazos de control se basan en instrumentación estándar: caudalímetros, válvulas de control motorizadas o neumáticas y un PLC (controlador lógico programable) encargado de ejecutar los algoritmos de control. No obstante, en instalaciones industriales existentes, este tipo de esquemas suele asociarse con una menor robustez frente a perturbaciones y con la aparición de oscilaciones sostenidas alrededor de los puntos de consigna, fenómeno frecuentemente relacionado con ajustes empíricos de los controladores, fricción estática en las válvulas y deficiencias en la sintonización del sistema de control.<sup>(21,22,23)</sup>

La investigación se desarrolló sin introducir perturbaciones externas ni modificar las condiciones normales de operación. Este enfoque resulta consistente con las prácticas actuales de identificación de sistemas industriales en operación continua, donde la seguridad y la estabilidad del proceso limitan la aplicación de experimentos activos.<sup>(16,18)</sup>

Se recopilaron 17 100 datos con un período de muestreo de 120 seg, garantizando la inclusión de variaciones operativas representativas del régimen normal de trabajo del sistema. Los datos se estructuraron en pares entrada-salida, donde las variables de entrada corresponden a las aperturas de las válvulas de regulación de petróleo y aire primario, expresadas en porcentaje (%), mientras que las variables de salida están representadas por los flujos reales de petróleo (kg/h) y de aire primario (m<sup>3</sup>/h). En todos los casos se garantizó la correspondencia temporal entre las variables y la coherencia dimensional de los datos utilizados.

La base de datos empleada comprende el período operacional entre el 16 de septiembre y el 18 de octubre de 2023, correspondiente a 33 días consecutivos de funcionamiento industrial del secadero 1. La selección de este intervalo permitió incorporar diferentes regímenes de operación y variaciones naturales del proceso asociadas a cambios en las condiciones tecnológicas y en las demandas energéticas del sistema.

Durante dicho período se registraron fluctuaciones representativas en las variables de salida (flujo de petróleo y flujo de aire primario), asociadas a perturbaciones inherentes a la operación industrial continua, tales como variaciones en la humedad del mineral alimentado, cambios en la carga del secador, modificaciones en los requerimientos térmicos y acciones de regulación de los controladores PID. Estas condiciones favorecen la persistencia de excitación necesaria para la identificación de sistemas basada en datos, al proporcionar suficiente variabilidad dinámica en las señales analizadas. Asimismo, el horizonte temporal seleccionado se consideró adecuado para capturar la dinámica dominante del proceso bajo condiciones normales de explotación industrial, sin introducir cambios estructurales relevantes en la operación tecnológica que pudieran comprometer la coherencia estadística de los datos.

Previo al entrenamiento de los modelos neuronales se realizó un proceso de limpieza de datos para la eliminación de valores atípicos. Se utilizó el comando `filloutliers` del entorno MATLAB®, que identifica valores anómalos mediante un criterio estadístico basado en 3 desviaciones estándar y los reemplaza por valores interpolados. Este procedimiento es ampliamente utilizado en la modelación basada en datos para reducir el impacto de mediciones erróneas, sin distorsionar la dinámica del sistema.

Posteriormente, los datos fueron normalizados mediante una transformación tipo z-score, centrando las variables en me-

dia 0 y desviación estándar unitaria. Esta etapa resulta esencial para mejorar la estabilidad numérica del entrenamiento y facilitar la convergencia del algoritmo de optimización, especialmente en RNA de tipo perceptrón multicapa.<sup>(19)</sup>

Se empleó una red neuronal tipo NARX (modelo auto regresivo no lineal con entrada exógena) con retardos de entrada y salida en el intervalo [1,3], con arquitectura SISO (1 entrada-1 salida). Cada red consta de 1 capa de entrada, 1 capa oculta y 1 capa de salida, configuración que ha demostrado ser suficiente para aproximar funciones no lineales continuas en aplicaciones industriales.<sup>(17)</sup> La función de activación empleada en la capa oculta fue la sigmoide hiperbólica (tansig), mientras que en la capa de salida se utilizó una función lineal (purelin), adecuada para problemas de regresión.

El entrenamiento se realizó mediante el algoritmo de Levenberg-Marquardt, reconocido por su eficiencia en problemas de regresión con conjuntos de datos de tamaño moderado. Los datos disponibles se dividieron aleatoriamente en 3 subconjuntos: 70 % para entrenamiento, 15 % para validación y 15 % para prueba.

Con el objetivo de identificar una arquitectura neuronal adecuada se evaluó un conjunto de modelos NARX variando el número de neuronas en la capa oculta dentro del rango de 1 a 30. Para cada configuración, el proceso de entrenamiento se repitió 16 veces con el fin de capturar la variabilidad inherente al ajuste de RNA y garantizar la robustez estadística de los resultados.<sup>(24)</sup>

Para realizar una selección objetiva de la arquitectura neuronal se empleó un criterio combinado que integra simultáneamente la precisión predictiva y la complejidad estructural del modelo. Para ello, se consideraron el error cuadrático medio (MSE) y el criterio de información bayesiano (BIC). El MSE, como medida de desempeño predictivo en el conjunto de prueba, se define como (1):

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (1)$$

donde  $y_i$  representa el valor real de la variable de salida,  $\hat{y}_i$  el valor estimado por el modelo, y  $N$  el número de observaciones. Esta métrica cuantifica el error promedio de predicción, y es utilizada en problemas de regresión no lineal.<sup>(17)</sup>

Por su parte, el BIC se emplea como criterio de penalización de la complejidad del modelo y se expresa como (2):

$$BIC = N \cdot \ln(MSE) + k \cdot \ln(N) \quad (2)$$

donde  $k$  representa el número de parámetros ajustados del modelo. Este criterio introduce una penalización logarítmica que favorece modelos más simples con adecuada capacidad de ajuste, especialmente útil en contextos con grandes volúmenes de datos.<sup>(20)</sup>

Dado que ambas métricas presentan diferentes escalas y unidades, se procedió a su normalización en el intervalo [0,1], garantizando así su comparabilidad directa. A partir de estas versiones normalizadas, se definió una función de costo compuesta (3):

$$J = BIC_{norm} + \alpha \cdot MSE_{norm} \quad (3)$$

donde [0,1] regula el compromiso entre parsimonia y precisión predictiva. Este enfoque multiobjetivo permite superar las limitaciones de estrategias basadas únicamente en el error, e incorpora explícitamente el principio de parsimonia en el proceso de selección del modelo.<sup>(17,20)</sup>

En consecuencia, la arquitectura óptima se determinó como aquella que minimiza la función de costo  $J$ , garantizando un equilibrio adecuado entre capacidad de generalización, precisión y complejidad estructural, en concordancia con las tendencias actuales en modelación basada en datos aplicada a procesos industriales.<sup>(20)</sup>

En este estudio se adoptó  $\alpha = 0,5$  al evidenciar un equilibrio adecuado entre ambas métricas y una selección consistente de la arquitectura óptima a lo largo de múltiples corridas independientes. Este valor puede interpretarse como una ponderación equitativa entre precisión y parsimonia, criterio frecuentemente adoptado cuando no existe una preferencia a priori entre ambos objetivos.

## RESULTADOS

En la tabla 1 se muestran los resultados obtenidos para los lazos de flujo de aire primario y petróleo, donde la arquitectura óptima corresponde a un modelo con 4 neuronas en la capa oculta, lo que sugiere la existencia de una estructura de complejidad reducida, capaz de capturar adecuadamente la dinámica de ambos procesos.

En el caso del lazo de flujo de aire primario se obtuvo un error cuadrático medio de  $0,79596 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/h, acompañado de una desviación estándar de  $2,9796 \times 10^5$ , lo que indica una dispersión moderada y, por tanto, un comportamiento estadísticamente consistente frente a múltiples ejecuciones. Por su parte, el valor medio del BIC de  $3,4954 \times 10^4$ , confirma que dicha arquitectura logra un adecuado equilibrio entre capacidad de ajuste y complejidad estructural, con un total de parámetros ( $k = 33$ ).

Para el lazo de flujo de petróleo, el modelo con 4 neuronas presenta un error medio significativamente menor de  $1,1740 \times 10^4$  kg/h, lo cual es consistente con posibles diferencias en la escala o dinámica del proceso. No obstante, la desviación estándar reportada ( $3,604 \times 10^3$ ) sugiere una mayor variabilidad en el desempeño del modelo en comparación con el lazo de flujo de aire primario, que podría estar asociado a una mayor sensibili-

Tabla 1. Modelo neuronal artificial SISO para ambos lazos

|                                 | Aire primario                              | Petróleo                          |
|---------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------|
| Neuronas ocultas                | 4                                          | 4                                 |
| $\overline{\text{MSE}}$         | $0,79596 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{h}$ | $1,1740 \times 10^4 \text{ kg/h}$ |
| $\delta(\overline{\text{MSE}})$ | $2,9796 \times 10^5$                       | $3,604 \times 10^3$               |
| $\overline{\text{BIC}}$         | $3,4954 \times 10^4$                       | $2,4149 \times 10^4$              |
| k                               | 33                                         | 33                                |

Fuente: Elaboración propia

dad a las condiciones de entrenamiento o a características intrínsecas del sistema. A pesar de ello, el valor del BIC ( $2,4149 \times 10^4$ ) resulta inferior al del lazo de aire primario, pues en términos relativos, el modelo alcanza un mejor compromiso entre precisión y parsimonia para este caso, manteniendo la misma cantidad de parámetros.

La figura 1 presenta la evolución de la función de costo J en el conjunto de prueba respecto al número de neuronas para el lazo de aire primario. Se observa una reducción marcada en las primeras configuraciones, atribuible a una mejora simultánea en la capacidad de ajuste (MSE) y en la eficiencia estructural (BIC). Posteriormente, la curva tiende a estabilizarse, indicando saturación en la ganancia de desempeño frente al incremento de la complejidad. Las ligeras fluctuaciones en arquitecturas más grandes evidencian redundancia paramétrica, sin beneficios en el compromiso multiobjetivo. El mínimo de J se alcanza con 4 neuronas, lo que identifica esta configuración como óptima ( $\alpha = 0,5$ ), al garantizar un balance efectivo entre parsimonia y precisión.

La figura 2 muestra la variación del MSE en función del número de neuronas para el lazo de aire primario. Se aprecia una disminución significativa del error en las primeras configuraciones, reflejo de una mejora en la aproximación de la dinámica no lineal del sistema. A partir de un umbral de complejidad, la reducción del MSE se vuelve marginal, e indica rendimientos decrecientes frente al incremento del número de parámetros. Las oscilaciones en arquitecturas más complejas sugieren sobreajuste incipiente, sin mejoras sustantivas en la capacidad predictiva. En consecuencia, 4 neuronas resultan suficientes para capturar la dinámica relevante del proceso.

La figura 3 ilustra el comportamiento del indicador de desempeño para el lazo de flujo de petróleo, en función del número de neuronas. La tendencia decreciente inicial confirma la mejora en el compromiso precisión-complejidad, a medida que aumenta la capacidad del modelo. Sin embargo, la estabilización posterior evidencia que la dinámica del sistema es representable mediante estructuras de baja dimensión. La ausencia de ganancias adicionales en configuraciones más complejas, pone de manifiesto redundancia estructural. La selección de 4 neuronas como solución óptima reproduce el patrón observado en el lazo de aire primario, lo que respalda la consistencia del criterio multiobjetivo aplicado.

La figura 4 muestra la variación del MSE en función del número de neuronas para el lazo de flujo de petróleo, representada mediante diagramas de cajas. Se aprecia una reducción significativa del error en las primeras configuraciones, lo que refleja una mejora en la capacidad del modelo para aproximar la dinámica no lineal del sistema. A partir de un umbral de complejidad, la disminución del error se torna marginal, evidenciando rendimientos decrecientes frente al incremento del número de parámetros.

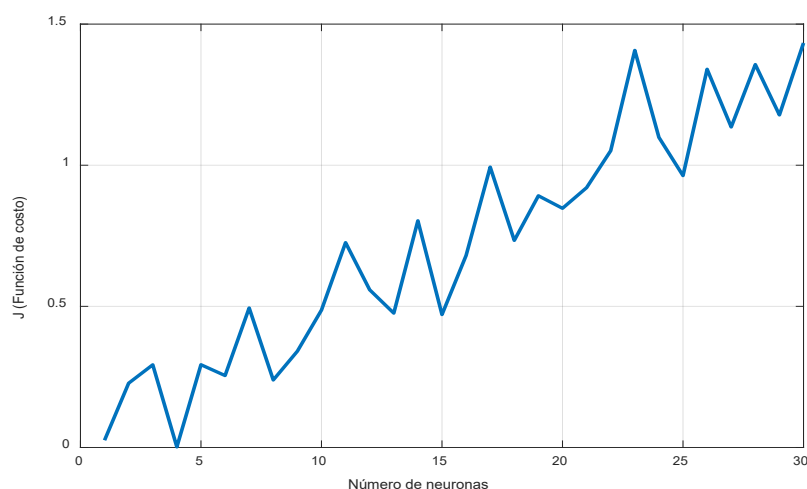


Fig.1. Evolución de la función de costo en función del número de neuronas para el lazo de flujo de aire primario Fuente: Elaboración propia

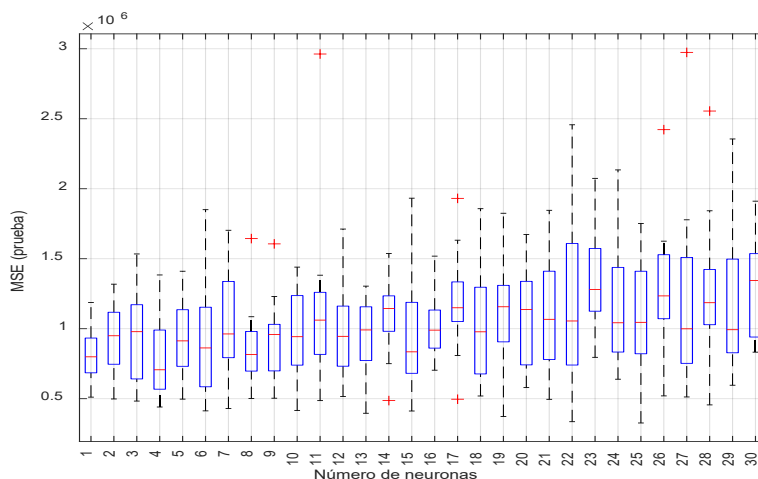


Fig.2. Error cuadrático medio en función del número de neuronas para el lazo de flujo de aire primario. Fuente: Elaboración propia

metros. La dispersión observada en arquitecturas más complejas sugiere una mayor variabilidad en el desempeño, asociada a efectos de sobreajuste sin ganancias sustantivas en precisión. En este contexto, una configuración de 4 neuronas resulta suficiente para capturar la dinámica relevante del proceso.

## DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos evidencian que la dinámica de los lazos de control de flujo de aire primario y petróleo puede ser representada de forma adecuada mediante modelos neu-

ronales de complejidad reducida. En particular, la selección consistente de una arquitectura con 4 neuronas en la capa oculta para ambos lazos sugiere que, a pesar de la naturaleza no lineal del proceso de secado, la relación entrada-salida subyacente presenta una estructura funcional relativamente compacta. Este hallazgo resulta relevante desde el punto de vista ingenieril, pues contradice la tendencia común a emplear arquitecturas sobredimensionadas en problemas de identificación basados en RNA, aspecto señalado en estudios recientes sobre modelación de procesos industriales complejos.<sup>(18,20)</sup>

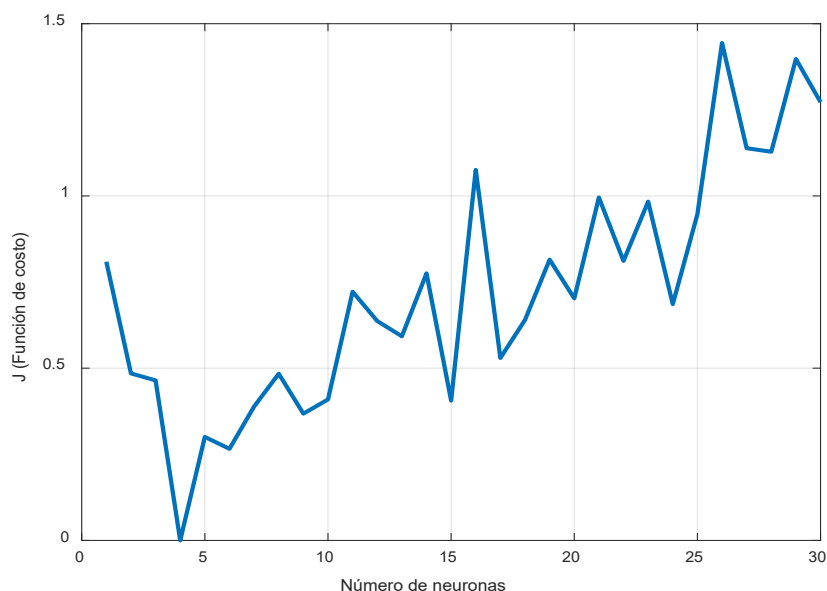


Fig.3. Variación del indicador de desempeño en función del número de neuronas, para el lazo de flujo de petróleo. Fuente: Elaboración propia

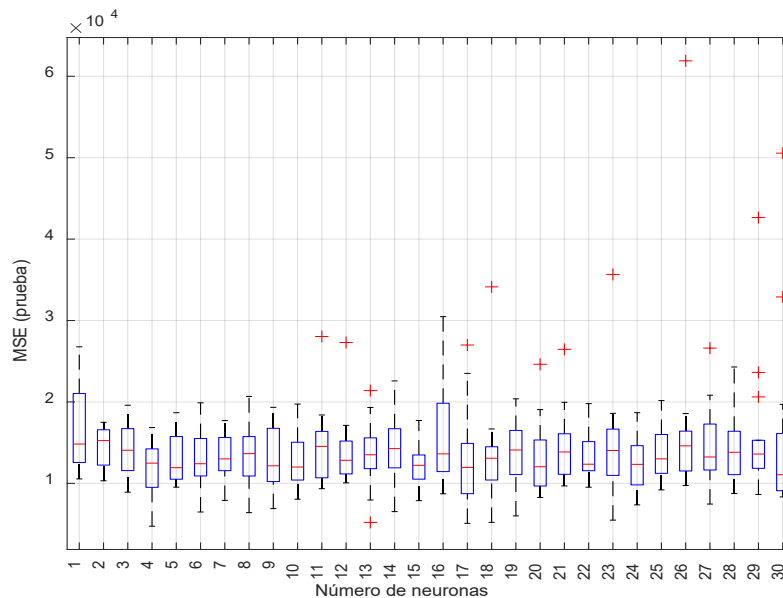


Fig.4. Error cuadrático medio en función del número de neuronas en la red NARX, para el lazo de flujo de petróleo. Fuente: Elaboración propia

Desde una perspectiva metodológica el uso combinado del MSE y el BIC permitió establecer un mecanismo de selección de modelos que equilibra explícitamente la precisión predictiva y la parsimonia estructural. A diferencia de enfoques tradicionales basados únicamente en la minimización del error, la incorporación del BIC introduce una penalización efectiva sobre el número de parámetros, reduce el riesgo de sobreajuste y favorece modelos con mayor capacidad de generalización. Este aspecto adquiere especial relevancia en entornos industriales reales, donde la variabilidad operativa y la presencia de ruido en los datos pueden comprometer la robustez de modelos excesivamente complejos, tal como se discute en la literatura reciente sobre modelación basada en datos en la industria de procesos.<sup>(17,20)</sup>

Los resultados obtenidos confirman y extienden lo reportado en trabajos basados en modelos lineales de bajo orden aplicados al mismo sistema, donde se logra una representación adecuada del comportamiento dinámico en condiciones específicas de operación.<sup>(5)</sup> Sin embargo, la presente investigación demuestra que el empleo de RNA permite capturar de manera más flexible las no linealidades inherentes al proceso, y mantiene al mismo tiempo un nivel de complejidad comparable. A su vez, se destaca la superioridad de las RNA frente a modelos clásicos, en la representación de sistemas no lineales multivariantes.<sup>(17,18)</sup>

Desde el punto de vista práctico, la obtención de modelos compactos tiene implicaciones directas para su implementación en esquemas de control avanzado. En particular, arquitecturas de baja dimensión reducen significativamente el cos-

to computacional, y facilitan su integración en estrategias de control predictivo basado en modelos (MPC) o en sistemas de optimización en tiempo real, en línea con las tendencias actuales de digitalización en la industria de procesos. Asimismo, la estabilidad observada en las métricas de error a lo largo de múltiples corridas de entrenamiento refuerza la confiabilidad del modelo para su uso en aplicaciones industriales, donde la reproducibilidad constituye un requisito fundamental.<sup>(17,24,25)</sup>

Por otra parte, el análisis de la evolución del MSE y del BIC, en función del número de neuronas, permitió identificar claramente la aparición de redundancia estructural en arquitecturas más complejas. Este comportamiento es consistente con lo reportado en la literatura, donde se señala que el incremento indiscriminado de la complejidad del modelo no garantiza mejoras en el desempeño predictivo y puede inducir problemas de sobreajuste y pérdida de capacidad de generalización.<sup>(18,19)</sup> En este sentido, los resultados obtenidos refuerzan la importancia de adoptar enfoques de selección basados en parsimonia, especialmente en contextos industriales caracterizados por alta variabilidad y ruido en los datos.

Finalmente, es importante señalar que, aunque los resultados obtenidos son robustos para el conjunto de datos analizados, el alcance del trabajo se circunscribe a un período específico de operación y a una configuración SISO de los lazos de control. En este sentido, futuras investigaciones podrían explorar la extensión del enfoque propuesto hacia modelos multivariantes (MIMO), así como la integración de arquitecturas neuronales más avanzadas, tales como redes recurrentes

profundas o modelos híbridos físico-basados, los cuales han mostrado resultados prometedores en la modelación de procesos dinámicos complejos.<sup>(25,26)</sup>

## Conclusiones

Los resultados demostraron que la arquitectura óptima para ambos lazos corresponde a un modelo NARX con 4 neuronas en la capa oculta, que proporciona el mejor equilibrio entre precisión predictiva y complejidad estructural, de acuerdo con el criterio BIC. Este estudio confirma que el aumento de la complejidad del modelo no garantiza mejoras en la capacidad de generalización, y resalta la importancia de enfoques de selección basados en parsimonia. Asimismo, la estabilidad observada en los errores de prueba, indica que el modelo propuesto es robusto frente a variaciones en el proceso de entrenamiento, lo cual es esencial para aplicaciones industriales. Finalmente, los resultados obtenidos validan el uso de modelos neuronales parsimoniosos como herramientas efectivas para la representación de sistemas no lineales, con potencial aplicación en estrategias avanzadas de control y optimización.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Angulo-Palma HJ, Salazar I, Saldana M, et al. New Model to Predict Nickel Extraction from Lateritic Ores During the Roasting-Reduction of the Caron Process. *Minerals* [Internet]. 2026 marzo [citado 21 may 2026];16(3):278. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/min16030278>
- Lv W, Makuza B, Wang F. A Review of Direct Reduction-Magnetic Separation Process for Ferronickel Production from Nickel Laterite. *Journal of Sustainable Metallurgy* [Internet]. 2025 noviembre [citado 21 may 2026];11:3-28. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s40831-024-00950-y>
- Acquah G, Skinner W, Abaka-Wood G, et al. Extraction of Nickel and Cobalt from Complex Low-Grade Lateritic Ores: Challenges and Opportunities. *Minerals* [Internet]. 2026 marzo [citado 21 may 2026];16(3):287. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/min16030287>
- Zevgolits EN, Daskalakis KA. The Nickel Production Methods from Laterites and the Greek Ferronickel Production among Them. *Materials Proceedings* [Internet]. 2021 [citado 21 may 2026];5(1):104. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/materproc2021005104>
- . Natural Resources Canada. Nickel facts [Internet]. Ottawa (ON): Government of Canada; 2025 [citado 28 mar 2026]. Disponible en: <https://natural-resources.canada.ca/minerals-mining/mining-data-statistics-analysis/minerals-metals-facts/nickel-facts>
- . Palma HJA, Toro N, Castillo J, et al. New Evidence of the Effect of Post-Combustion During Roasting/Reduction of Nickel-Bearing Lateritic Ores. *Processes* [Internet]. 2025 agosto [citado 21 may 2026];13(8):2602. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/pr13082602>
- Angulo-Palma HJ, Legrá Legrá Á, Urgellés AL, et al. Use of a Mixture of Coal and Oil as an Additive for Selective Reduction of Lateritic Ore by the Caron Process. *Hemijiska Industrija* [Internet]. 2024 febrero [citado 21 may 2026]; 78(1):17-27. Disponible en: <https://doi.org/10.2298/HEMIND230118017A>
- Rojas Vargas A, Magaña Haynes ME, del Toro Álvarez D, et al. Nickel Mining: Studying the Kinetics and Modeling of Extraction Process from Laterite Ore. *South African Journal of Chemical Engineering* [Internet]. 2025 julio [citado 21 may 2026];53:362-72. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2025.06.002>
- Castaño F, Rubio FR, Ortega MG. Modelado de Secaderos Rotatorios en Isocorriente. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* [Internet]. 2009 octubre [citado 14 feb 2026];6(4):32-43. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S1697-7912\(09\)70106-2](https://doi.org/10.1016/S1697-7912(09)70106-2)
- Fedorova ER, Morgunov VV, Pupysheva EA. Effect of variation of internal diameter along the length of a rotary kiln on material movement. *Non-Ferrous Metals* [Internet]. 2024 julio [citado 7 may 2026];56(1):28-34. Disponible en: <https://doi.org/10.17580/nfm.2024.01.05>
- Fedorova E, Morgunov V, Lobko K, et al. Review: Axial Motion of Material in Rotary Kilns. *Eng* [Internet]. 2025 mayo [citado 7 may 2026];6(6):106. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/eng606106>
- Kukharova T, Medvedeva E, Novozhilov I. Modeling of a Temperature Field Control System for a Carburizing Shaft Furnace. *Processes* [Internet]. 2026 abril [citado 7 may 2026];14(9):1406. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/pr14091406>
- Kukharova TV, Ilyukhina YA, Shestopalov MY. Development of a Methodology for Controlling the Process of Heating Metal Blanks in a Methodical Furnace. En: *Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering ElConRus* [Internet]. 2022 abril [citado 7 may 2026];718-21. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/ElConRus54750.2022.9755574>
- Khan MIH, Batuwatta-Gamage CP, Karim MA, et al. Fundamental understanding of heat and mass transfer processes for physics-informed machine learning-based drying modelling. *Energies* [Internet]. 2022 diciembre [citado 21 mayo 2026];15(24):9347. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/en15249347>
- Bishnu SK, Alnouri SY, Al Mohannadi DM. Computational applications using data-driven modeling in process systems: A review. *Digital Chemical Engineering* [Internet]. 2023 septiembre [citado 21 may 2026];8:100111. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.dche.2023.100111>
- Rodríguez-Durán VG, Montero-Góngora D, Columbié-Navarro AO, et al. Low-order parametric modeling and control of air-fuel loops in industrial rotary dryers: A passive system identification approach. *Drying Technology* [Internet]. 2026 mar [citado 26 mar 2026];44(6):808-23. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/07373937.2026.2638948>
- Ren YM, Alhajeri MS, Luo J, et al. A tutorial review of neural network modeling approaches for model predictive control. *Computers & Chemical Engineering* [Internet]. 2022 septiembre [citado 22 mar 2026];165:107956. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107956>
- Rashid M, Mhaskar P. Are Neural Networks the Right Tool for Process Modeling and Control of Batch and Batch-like Processes? *Processes* [Internet]. 2023 enero [citado 11 ene 2026];11(3):686. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/pr11030686>
- Wang Z, Wang H, Du Z. Deep Neural Network Model Based on Process Mechanism Applied to Predictive Control of Distillation Processes. *Processes* [Internet]. 2025 febrero [citado 11 ene 2026];13(3):811. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/pr13030811>

20. Carter A, Imtiaz S, Naterer GF. Review of interpretable machine learning for process industries. *Process Safety and Environmental Protection* [Internet]. 2023 febrero [citado 11 mar 2026];170:647-659. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.12.018>
21. Dambros JWV, Trierweiler JO, Farenzena M, et al. Oscillation Detection in Process Industries by a Machine Learning-Based Approach. *Industrial & Engineering Chemistry Research* [Internet]. 2019 julio [citado 6 may 2026];58:14180-14192. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b01456>
22. Dambros JWV, Trierweiler JO, Farenzena M. Industrial Datasets and a Tool for SISO Control Loops Data Visualization and Analysis. *Computers & Chemical Engineering* [Internet]. 2021 marzo [citado 6 may 2026];146:107198. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.107198>
23. Daiguji M, Yamashita Y. An Approach for Stiction Compensation in Industrial Process Control Valves. *Computers & Chemical Engineering* [Internet]. 2022 febrero [citado 6 may 2026];158:107641. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107641>
24. Pinto WG, Alguacil A, Bauerheim M. On the reproducibility of fully convolutional neural networks for modeling time-space evolving physical systems. *Data-Centric Engineering* [Internet]. 2022 abril [citado 15 mar 2026];3:e19. Disponible en: <https://doi.org/10.1017/dce.2022.18>
25. Alauddin M, Khan F, Imtiaz S, et al. Integrating process dynamics in data-driven models of chemical processing systems. *Process Safety and Environmental Protection* [Internet]. 2023 junio [citado 26 mar 2026];174:158-168. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.04.008>
26. Zarzycki K, Ławryńczuk M. Long Short-Term Memory Neural Networks for Modeling Dynamical Processes and Predictive Control: A Hybrid Physics-Informed Approach. *Sensors* [Internet]. 2023 noviembre [citado 20 marzo 2026];23(21):8898. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/s23218898>
- Curación de datos: Víctor Germán Rodríguez Durán, Deynier Montero Góngora
- Análisis formal: Víctor Germán Rodríguez Durán, Deynier Montero Góngora, Yury Valeryevich Ilyushin, Yoalbys Retirado Mediacaja
- Adquisición de fondos: Liomnis Osorio, Ángel Oscar Columbié Navarro, Alexander Mosquera Urbano
- Investigación: Víctor Germán Rodríguez Durán
- Metodologías: Víctor Germán Rodríguez Durán, Deynier Montero Góngora
- Administración de proyecto: Liomnis Osorio, Ángel Oscar Columbié Navarro, Alexander Mosquera Urbano
- Recursos: Yoalbys Retirado Mediacaja
- Software: Víctor Germán Rodríguez Durán, m Deynier Montero Góngora
- Validación: Víctor Germán Rodríguez Durán
- Visualización: Víctor Germán Rodríguez Durán, Eddy Luis Terrero Montero
- Redacción-borrador original: Víctor Germán Rodríguez Durán
- Redacción-revisión y edición: Víctor Germán Rodríguez Durán, Deynier Montero Góngora, Ángel Oscar Columbié Navarro, Eddy Luis Terrero Montero, Yury Valeryevich Ilyushin, Yoalbys Retirado Mediacaja
- ~~Alexander Mosquera Urbano~~ participó en: Adquisición de fondos, Administración de proyecto.
- ~~Yoalbys Retirado Mediacaja~~ participó en: Análisis formal, Recursos, Redacción-revisión.

#### Financiamientos

La investigación recibió fondos de los proyectos PS104HO001-057 y PS104HO001-075 del Programa Aprovechamiento integral de los recursos minerales en la industria cubana del níquel (PS104HO001-001). Además, fue financiado por los proyectos PS223LH001-047 y PS223LH001-060 del Programa Educación Superior y Desarrollo Sostenible (PS223LH001).

#### Cómo citar este artículo

Rodríguez Durán VG, Montero Góngora G, Columbié Navarro AO, Retirado Mediacaja Y, Terrero Montero EL, Valeryevich Ilyushin Y, et al.. Modelación neuronal parsimoniosa para el control del secado de minerales lateríticos. *An Acad Cienc Cuba* [Internet] 2026 [citado en día, mes y año];16:e3255. Disponible en: <http://www.revistaccuba.cu/index.php/revacc/article/view/3255>

El artículo se difunde en acceso abierto según los términos de una licencia Creative Commons de Atribución/Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0), que le atribuye la libertad de copiar, compartir, distribuir, exhibir o implementar sin permiso, salvo con las siguientes condiciones: reconocer a sus autores (atribución), indicar los cambios que haya realizado y no usar el material con fines comerciales (no comercial).<sup>©</sup> Los autores, 2026.

Recibido: 4/04/2026

Aprobado: 27/06/2026

#### Agradecimientos

Los autores agradecen a los trabajadores de la Empresa Productora de Níquel y Cobalto Comandante Ernesto Che Guevara que facilitaron el acceso a la información y el desarrollo de la componente experimental, especialmente a los del Grupo de Automática, Grupo Técnico del Laboratorio Central, y al personal técnico de la Unidad Básica de Producción Planta de Preparación de Mineral.

#### Conflictos de intereses

Ninguno de los autores manifestó la existencia de posibles conflictos de intereses que debieran ser declarados en relación con este artículo.

#### Contribuciones de los autores

- Conceptualización: Deynier Montero Góngora

