



CIENCIAS TÉCNICAS

Artículo original de investigación

Diseño de estrategias de control avanzado en un horno multivariable de calentamiento de petróleo

Francisco Jacas Portuondo ¹ <https://orcid.org/0000-0001-5347-1189>

Leonardo Peña Pupo ² <https://orcid.org/0000-0003-3779-9576>

Carlos Alberto Masip Rodríguez ¹ <https://orcid.org/0009-0004-0156-5967>

Miguel Rudens Forgas Brioso ³ <https://orcid.org/0000-0001-6224-4201>

¹ Tecnomática. Santiago de Cuba, Cuba

² Universidad de Turku. Centro de Investigaciones de Futuro de Finlandia. Turku, Finlandia

³ Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba

* Autor para la correspondencia: lpepup@utu.fi

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

RESUMEN

Introducción: La refinación de petróleo crudo es un proceso intensivo en energía donde los hornos de calentamiento representan los principales consumidores de combustible, como el caso del horno F-101 de la Refinería Hermanos Díaz en Santiago de Cuba, cuyo control preciso de temperatura y operación en rangos óptimos, mejoran su dinámica y eficiencia energética. **Objetivo:** Diseñar, sintonizar y evaluar mediante simulación rigurosa el desempeño de diferentes estrategias de manejo avanzado en el sistema de control de temperatura en el horno F-101 como sistema multivariable, para mejorar su comportamiento dinámico y la eficiencia energética del proceso de refinación. **Métodos:** Comparar estrategias de control avanzado- proporcional integral convencional y predictores de Smith (clásico, filtrado y modificado)- diseñadas mediante simulación rigurosa para el control de la temperatura en el horno F-101, modelado como sistema multivariable 2×2 a partir de un modelo identificado experimentalmente. **Resultados:** Partiendo del modelo dinámico del horno previamente identificado experimentalmente, caracterizado por retardos dominantes e interacciones entre variables, se evaluaron 5 estrategias de control: proporcional integral convencional (integral del error absoluto), proporcional integral derivativo (proporcional integral derivativo Tuner), predictor de Smith clásico, predictor de Smith filtrado (Normey-Rico) y predictor de Smith modificado (Rivas-Pérez). La última exhibió el mejor desempeño, con reducciones del 30 % en sobrepaso máximo, mejora del 42,3 % en tiempo de establecimiento y disminución del 45,2 % en la variabilidad de la temperatura. **Conclusiones:** Este estudio provee una base técnica para implementar control avanzado en este tipo de horno, con mayor potencial de mejora en eficiencia energética y reducción de emisiones contaminantes. Esta investigación constituye, el primer análisis comparativo sistemático de estrategias de control basadas en predictores de Smith sobre el modelo multivariable 2×2 identificado experimentalmente para el horno F-101, abriendo perspectivas para la implementación de control predictivo basado en modelo y estrategias de control con inteligencia artificial.

Palabras clave: sistema multivariable; hornos de calentamiento; predictores de Smith; control de temperatura; eficiencia energética

Design of advanced control strategies for a multivariable oil heating furnace

ABSTRACT

Introduction: Crude oil refining is an energy-intensive process where heating furnaces are the main fuel consumers, as is the case with furnace F-101 at the Hermanos. Díaz Refinery in Santiago de Cuba. Precise temperature control and operation within optimal ranges improve its dynamics and energy efficiency. **Objective:** To design, tune, and rigorously evaluate the performance of different advanced management strategies for the temperature control system in furnace F-101 as a multivariable system, to improve its dynamic behavior and the energy efficiency of the refining process. **Methods:** To compare advanced control strategies — proportional integral (absolute error integral method and proportional integral derivative Tuner) and Smith predictors (classic, filtered and modified)— designed through rigorous simulation for temperature control in furnace F-101, modeled as a multivariable 2×2 system based on an experimentally identified model. **Results:** Based on the previously identified experimental dynamic model of the crude oil heating furnace, characterized by dominant delays and interactions between variables, five control strategies were evaluated: conventional proportional integral tuned using the absolute error integral method, proportional integral with the proportional integral derivative Tuner tool, classic Smith predictor, filtered Smith predictor (Normey-Rico), and modified Smith predictor (Rivas-Pérez). The latter exhibited the best performance, with a 30% reduction in maximum overshoot, a 42.3% improvement in settling time, and a 45.2% decrease in temperature variability. **Conclusions:** This study provides a technical basis for implementing advanced control in this type of furnace, offering the greatest potential for improving energy efficiency and reducing pollutant emissions. This research constitutes the first systematic comparative analysis of control strategies based on Smith predictors for the 2×2 multivariable model experimentally identified for furnace F-101, opening perspectives for the implementation of model predictive control and control strategies with artificial intelligence.

Keywords: multivariable system; heating furnaces; Smith predictors; temperature control; energy efficiency

INTRODUCCIÓN

La industria de refinación de petróleo destina importantes recursos a la introducción de nuevas tecnologías, con el objetivo de aplicar enfoques modernos en la matriz productiva y maximizar las ventajas del desarrollo en un contexto internacional exigente. ⁽¹⁾ El horno F-101 es un equipo crítico en la planta de refinación del petróleo crudo de la Refinería Hermanos Díaz (Santiago de Cuba), encargado de mantener la temperatura del crudo dentro de límites operativos a pesar de variaciones en la referencia y perturbaciones en la carga. El control preciso de la temperatura de salida es fundamental

para garantizar las especificaciones del producto final y la eficiencia operativa del proceso. ⁽²⁾

El sistema presenta características desafiantes desde la perspectiva del control automático: retardos de tiempo significativos debidos a la inercia térmica, interacciones multivariables entre lazos de control, y perturbaciones frecuentes en composición de carga y propiedades del combustible. El control de temperatura en hornos tubulares ha sido objeto de investigación continua. Se presenta un resumen comparativo del estado del arte relevante, que permite contextualizar la novedad del presente trabajo.

La revisión del estado del arte revela que la mayoría de las propuestas se han centrado en esquemas de control simple entrada simple salida (SISO) bajo entornos de simulación, empleando métodos que abarcan desde la simulación dinámica no lineal hasta controladores proporcional integral derivativo (PID)- experto difusos (expert fuzzy).^(3,4) Asimismo, se han explorado diversas configuraciones del predictor de Smith (PS), tanto en su versión convencional como en variantes modificadas para el rechazo de perturbaciones o enfoques robustos.^(5,6,7) Aunque existen investigaciones orientadas a la validación en plantas reales, como la aplicación de control regulador lineal cuadrático, (por sus siglas en inglés LQR: Linear-Quadratic Regulator) en hornos de coque o la identificación experimental múltiple entrada múltiple salida (MIMO en inglés) en espacio de estado, estas suelen restringirse a una única estrategia de control.^(7,8) Frente a este panorama, el presente trabajo propone una validación integral mediante simulación rigurosa del horno F-101, evaluando comparativamente una amplia gama de esquemas avanzados —incluyendo proporcional integral (PI) por integral del error absoluto (IAE en inglés), ajuste PI-PID, ajuste por PS clásico, PS filtrado y PS modificado— bajo una estructura MIMO 2 × 2.

Del análisis comparativo se desprende que la mayoría de los trabajos previos abordan el control del horno como sistema SISO y se centran en un único esquema de control. El trabajo de referencia, Jacas Portuondo *et al.*, constituye un antecedente directo, al identificar experimentalmente el modelo MIMO del horno F-101; sin embargo, no evalúa comparativamente diferentes estrategias de control avanzado sobre dicho modelo.⁽⁹⁾

Las contribuciones originales del presente trabajo se articulan en 3 niveles: Este trabajo aplica, por primera vez para el horno F-101 una evaluación comparativa sistemática de 5 estrategias de control -PI-IAE, PI-PID Tuner, predictor de Smith clásico, filtrado (Normey-Rico) y modificado (Rivas-Pérez)- sobre el modelo MIMO 2x2 identificado experimentalmente a partir de datos reales de planta.

La evaluación se realiza mediante simulación rigurosa en lazo cerrado, empleando tanto criterios de seguimiento de referencia como de rechazo de perturbaciones, lo que permite un análisis cuantitativo comparativo que no ha sido reportado para este sistema específico en la literatura consultada. Los resultados establecen una base técnica cuantificada sobre el modelo MIMO del F-101, que habilita trabajos futuros de implementación de control predictivo basado en modelo (MPC), reguladores lineales cuadráticos (LQR), observadores

de estado de Kalman e integración de inteligencia artificial en la modelización y control del proceso.

El objetivo de la presente investigación fue evaluar, mediante simulación rigurosa, diversas estrategias de control avanzado aplicadas al sistema de control de temperatura del horno F-101 (modelado como un sistema multivariable 2 × 2), con el fin de mejorar su comportamiento dinámico y la eficiencia energética del proceso de refinación de petróleo.

MÉTODOS

La refinación de petróleo crudo se realiza en la unidad de destilación atmosférica, donde el proceso de calentamiento de la materia prima desempeñado por el horno F-101 es uno de los más importantes en esta etapa.^(10,11) El horno F-101 es tubular vertical de tiro forzado con 2 pasos de tubos en paralelo, cada uno equipado con quemadores independientes que permiten el control individual de temperatura.⁽¹²⁾ El crudo precalentado ingresa al horno a 220 °C y debe ser elevado hasta 350°C para su ingreso óptimo a la torre de destilación T-101, lográndose un adecuado despojamiento de los derivados del petróleo con alto valor comercial.

El horno F-101 se representa como un sistema multivariable, donde los flujos de combustible hacia los quemadores actúan como entradas y las temperaturas de salida del petróleo crudo como salidas. El comportamiento dinámico del sistema se caracteriza por un retraso en la respuesta debido a la inercia térmica del horno y al tiempo que tarda el calor en transferirse desde los quemadores hasta el fluido.⁽¹³⁾ El modelo matemático analizado refleja el comportamiento dinámico del horno, incluyendo fenómenos térmicos y de fluidica, y queda descrito mediante la combinación de elementos de retrasos de transporte de primer orden y tiempo muerto.⁽¹⁴⁾

Representación del sistema

El horno se puede analizar como una caja negra de 2 entradas y 2 salidas. Las variables manipuladas son Q_{fq1} y Q_{fq2} (flujos de combustible, m³/h) y las variables controladas son T_{s1} y T_{s2} (temperaturas de salida, °C). La aproximación lineal del modelo del horno se expresa como (1):

donde $W_{11}(s)$, $W_{22}(s)$ son funciones de transferencia entre las temperaturas T_{s1} , T_{s2} y los flujos Q_{fq1} , Q_{fq2} , y $W_{12}(s)$, $W_{21}(s)$ las funciones de transferencia cruzada.

Representación del modelo

Para el análisis del sistema se propone la estructura de un modelo de primer orden con retardo (P1Ds), expresado como (2):

$$[T_{s1}; T_{s2}] = [W_{11} \ W_{12}; W_{21} \ W_{22}] \cdot [Q_{fq1}; Q_{fq2}] \quad (1)$$

$$W(s) = K \cdot e^{(-Td \cdot s)} / (\tau s + 1) \quad (2)$$

donde $K(^{\circ}\text{C}/(\text{m}^3/\text{h}))$ es la ganancia estática del proceso, τ (min) la constante de tiempo y T_d (min) el retardo de transporte. Los parámetros se obtienen de la respuesta del proceso a lazo abierto mediante la curva de reacción del proceso.

Supuestos del modelo:

El modelo P1Ds asume: a) linealidad del proceso en el punto de operación considerado ($T_{s1} = 350^{\circ}\text{C}$, $Q_{fq1} \approx 0,5 \text{ m}^3/\text{h}$); b) estado estacionario de los parámetros en el rango de operación analizado; c) separabilidad de los lazos para la obtención de la respuesta de cada elemento de la matriz de transferencia; y d) dominio del primer polo, de forma que la dinámica de orden superior puede ser absorbida por el retardo equivalente. Estas hipótesis son estándar en la identificación de sistemas industriales de refinación. ⁽¹⁴⁾

Al registrar la respuesta de las temperaturas de salida del horno ante perturbaciones aplicadas en cada entrada [amplitud (0,05 a 0,10) m^3/h], se empleó la herramienta de identificación de MATLAB 2022b para obtener la representación del modelo resultando en la matriz de transferencia: ^(9,15)

$$\begin{bmatrix} T_{s1} \\ T_{s2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{44,04}{(2,73s + 1)} e^{-3,54s} & \frac{29,81}{(6,31s + 1)} e^{-4,5s} \\ \frac{11,09}{(7,25s + 1)} e^{-5s} & \frac{117,45}{(3,64s + 1)} e^{-4s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{fq1} \\ Q_{fq2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Los parámetros identificados muestran coherencia física: las ganancias directas (W_{11} , W_{22}) son significativamente mayores que las cruzadas (W_{12} , W_{21}), indicando que cada quemador afecta principalmente la temperatura de su propio paso. Los retardos (3,5 a 5,0) min son consistentes con el tiempo de residencia del crudo en los tubos. El índice de ajuste R^2 promedio fue 0,94 para los lazos directos, y 0,87 para los lazos cruzados, considerado satisfactorio para aplicaciones de control. ⁽⁹⁾

Análisis de estabilidad: El modelo presenta 4 polos ubicados en el semiplano izquierdo del plano complejo, confirmando estabilidad en lazo abierto. Los retardos puros no afectan la estabilidad en lazo abierto, pero son críticos para el diseño del controlador en lazo cerrado. ⁽¹⁶⁾

Análisis de interacciones multivariables: Para cuantificar las interacciones y definir el emparejamiento adecuado de variables se aplicó el método de la matriz de ganancias relativas (RGA) de Bristol: $\Lambda = K^{\circ} (K^{-1})^T$. Para el modelo del F-101: $K = [44,04; 29,81; 11,09; 117,45]$ y la RGA resulta $\Lambda = [0,762; 0,238; 0,238; 0,762]$. Los elementos diagonales

dominantes ($\lambda_{11} = \lambda_{22} = 0,762$) confirman que el emparejamiento natural ($Q_{fq1} \rightarrow T_{s1}$, $Q_{fq2} \rightarrow T_{s2}$) es apropiado, con interacciones moderadas manejables mediante controladores descentralizados.

Validación del modelo: La validación del modelo se realizó mediante simulación comparativa entre la respuesta del modelo identificado y la respuesta registrada en planta bajo condiciones de operación no utilizadas en la identificación. El índice de ajuste (FIT) se calculó como $\text{FIT} = 100(1 - \|y - \hat{y}\|/\|y - \bar{y}\|)$, obteniéndose valores de 91,3 % y 94,2 % para los lazos directos (W_{11} , W_{22}) y de 95,7 % y 96,2 % para los lazos cruzados (W_{12} , W_{21}), lo que corrobora la adecuación del modelo para el diseño de los controladores evaluados. La validación experimental en planta real no fue posible en el marco de esta investigación por restricciones operativas de la refinación; esta limitación se reconoce explícitamente en la discusión.

Estructuras de control

El horno F-101 presenta una configuración singular, donde se analizan diferentes estructuras de control en el lazo de temperatura (figura 1): A) realimentación simple; B) predictor de Smith convencional (PS); C) predictor de Smith filtrado (Normey-Rico) (PSF); D) predictor de Smith modificado (Rivas-Pérez) (PSM).

Controladores proporcionales integrales derivativos

En la industria, los controladores PID son ampliamente utilizados por su simplicidad y efectividad. El controlador PID en el dominio del tiempo se describe por (4):

donde $u(t)$ es la señal de control, $e(t)$ la desviación entre el punto de ajuste $r(t)$ y la variable de proceso medida $y(t)$, y K_p , K_i , K_d las ganancias proporcional, integral y derivativa. En la investigación se implementa un controlador PI (5):

$$C(s) = \frac{K_p(T_i s + 1)}{T_i s} \quad (5)$$

donde $T_i = K_p/K_i$ es el tiempo de integración.

Estrategias de control. Estructura proporcional integral con realimentación simple

El horno F-101 presenta una estructura de control con realimentación simple, muy utilizada en el control de procesos tecnológicos, en los mismos la salida del proceso se

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

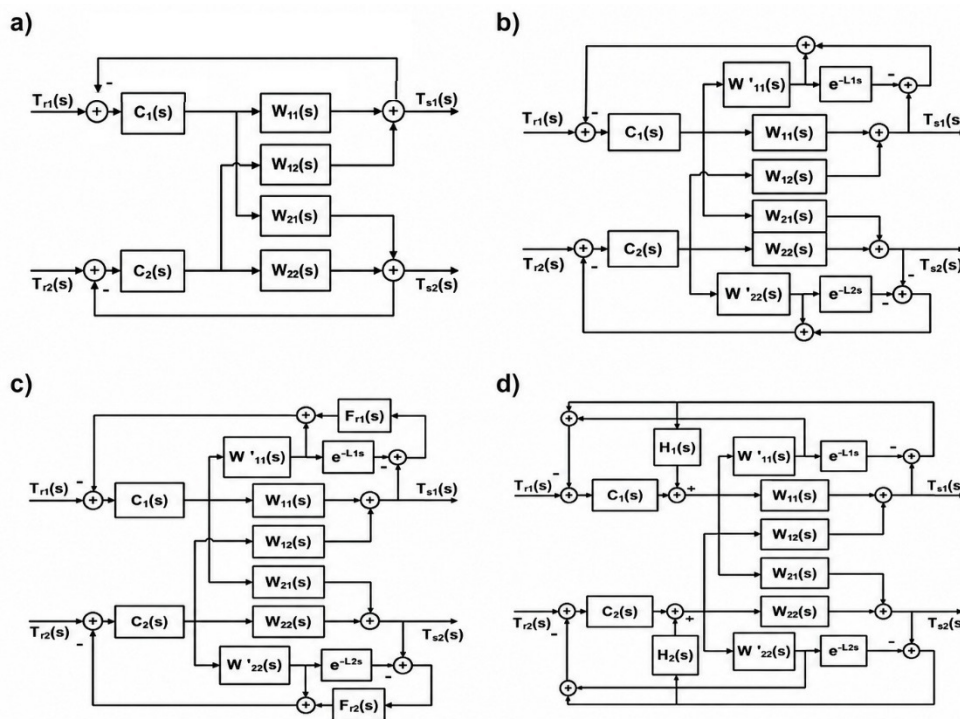


Fig. 1. Estructuras de control propuesta en el horno F-101: donde: $T_{r1}(s)$, $T_{r2}(s)$ temperaturas de referencia; $T_{s1}(s)$, $T_{s2}(s)$ temperaturas de salida; $C_1(s)$, $C_2(s)$ controladores; $W_{11}(s)$, $W_{22}(s)$ son funciones de transferencia directa respectivamente de los pasos 1 y 2; $W_{12}(s)$, $W_{21}(s)$ funciones de transferencia cruzada 1-2 y 2-1; $W_{11}^*(s)$, $W_{22}^*(s)$ modelos aproximados del proceso $W_{11}(s)$ y $W_{22}(s)$; e^{-L1s} , e^{-L2s} retardos puros de los lazos 1 y 2; $F_{r1}(s)$, $F_{r2}(s)$ filtros de la perturbaciones externas de los lazos 1 y 2; $H_{1(s)}$, $H_{2(s)}$ compensadores de los lazos 1 y 2.

realimenta a la entrada del controlador, lo que posibilita el ajuste de su comportamiento dinámico en cada uno de los pasos. ^(18,17) Se evaluaron 2 métodos de sintonización:

- a) Sintonización por la integral del error absoluto (IAE): El criterio IAE evalúa el desempeño integrando el error en valor absoluto:

$$IAE = \int_0^T |e(t)| dt \quad (6)$$

Para calcular los parámetros del controlador PI se usan las fórmulas propuestas por Rovira en 1969 considerando disturbios. A partir del desarrollo de algoritmos de optimización para minimizar la integral del error para varias razones entre tiempo muerto y la constante de tiempo del proceso se les brindaron solución a estas fórmulas (a y b -1 y 2)

$$\text{donde } Kc = \frac{a_1}{K} \left(\frac{L}{\tau} \right)^{b_1};$$

$$a_1 = 0,758; b_1 = -0,861 \text{ y } Ti = \frac{\tau}{a_2 + b_2 \left(\frac{L}{\tau} \right)};$$

$$a_2 = 1,02; b_2 = -0,323$$

los parámetros de ajuste obtenidos: para el lazo 1: $K_c = 0,0014$ y $T_i = 4,54$ min y para el lazo 2: $K_c = 0,006$ y $T_i = 5,47$ min.

- Sintonización con PID Tuner de MATLAB: Método interactivo que permite ajuste automático de parámetros. Resultados: lazo 1: $K_c = 0,008$, $T_i = 2,48$ min; lazo 2: $K_c = 0,005$, $T_i = 4,28$ min.

Diseño de estrategias de control avanzado

Diferentes investigaciones abordan el inconveniente de los procesos con retardo dominante, siendo uno de los retos a tener en cuenta la estrategia de control a emplear para obtener ahorros energéticos y la reducción de los contaminantes al medio ambiente. ⁽¹⁹⁾ En el horno F-101 es posible aplicar diferentes estrategias de control para alcanzar estos propósitos, se destacan el empleo de estrategias predictivas, adaptativas, redes neuronales, novedosas como la regulación lineal y otras inexploradas, pudiéndose seleccionar: el predictor de Smith clásico; el predictor de Smith filtrado. (Normey-Rico) o el predictor de Smith modificado (Rivas-Pérez). ⁽²⁰⁾ Considerando estas estructuras de control, se investiga el comportamiento del horno F-101 utilizando estos predictores, partiendo de sus singularidades. ^(21,22)

El predictor de Smith constituye el compensador de tiempo muerto más utilizado en el control de sistemas con retardo de tiempo dominante, por su elevada efectividad y simple implementación⁽²³⁾ Esta estructura mejora el desempeño de controladores PI/PID al separar la dinámica del proceso de su retardo en el lazo de realimentación.

Sintonización por asignación de polos: El método de sintonización por asignación de polos se utiliza para ajustar los parámetros de un controlador con el objetivo de ubicar en posiciones deseadas los polos del sistema de lazo cerrado, dado que el proceso se representa por un modelo de primer orden (ecuación 1) y se controla con un controlador PI (ecuación 5), a continuación, se describe la función de transferencia de lazo cerrado del control (7):

$$M_{yr}(s) = \frac{K_p K (T_i s + 1)}{T_i \tau s^2 + T_i (1 + K_p K) s + K_p K} \quad (7)$$

El sistema de control se representa por el polinomio característico siguiente (8):

$$P(s) = s^2 + \frac{(1 + K_p K)}{\tau} s + \frac{K_p K}{T_i \tau} \quad (8)$$

Si se lleva a la forma siguiente (9):

$$P(s) = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \quad (9)$$

se obtienen los parámetros: $K_p = (2\zeta\omega_n \tau - 1)/K$; $T_i = (2\zeta\omega_n \tau - 1)/\omega_n^2$. Con $M_p = 1\%$ se determina $\zeta = 0,8261$, y considerando el tiempo de establecimiento a lazo cerrado como el 70 % del tiempo de establecimiento a lazo abierto (4τ), se obtienen: $\omega_{n1} = 0,0084$ rad/s, $\omega_{n2} = 0,0063$ rad/s. Parámetros resultantes: C_1 : $K_c = 0,029$; $T_i = 1,83$ min; C_2 : $K_c = 0,011$; $T_i = 2,44$ min.

El diseño del predictor de Smith filtrado con la adición de un filtro de primer orden; fue propuesta por Normey-Rico y Camacho para eliminar polos lentos y aumentar la robustez frente a errores de modelado. Dado que el sistema de control de temperatura en el horno puede ser analizado de manera independiente y se representa según la ecuación (2), se elige un filtro de primer orden, que se describe mediante la siguiente ecuación (10):

$$F_r(s) = \frac{\beta s + 1}{T_f s + 1} \quad (10)$$

donde: T_f es la constante de tiempo del filtro y actúa como un parámetro de diseño, un valor cercano a cero de T_f indica que la respuesta al rechazo de perturbaciones será lenta, mientras que un valor más alejado de cero proporcionará una respuesta más rápida, para este análisis se calcula T_f por la siguiente ecuación (11):

$$T_f = \frac{\theta}{2} \quad (11)$$

es el retraso de transporte, es la constante de tiempo del proceso y τ es la constante de tiempo a lazo cerrado deseada y β es una constante que se determina por la siguiente ecuación (12):

$$\beta = \left[1 - \left(1 - \frac{T_f}{\tau} \right) \left(1 - \frac{\tau_c}{\tau} \right) e^{-\frac{\theta}{\tau}} \right] \tau \quad (12)$$

A continuación, se muestran los parámetros obtenidos para el paso 1 $\beta_1 = 2,698$; $T_{f1} = 1,77$; $\tau = 2,40$ y para el paso 2 y $\beta_2 = 3,575$, $T_{f2} = 2,00$, $\tau = 3,21$. Con los parámetros calculados, se plantean las funciones de transferencia de los filtros correspondientes a cada lazo de control (13) y (14).

El predictor de Smith modificado (Rivas-Pérez) agrega una realimentación con la diferencia entre las salidas del proceso y el modelo nominal, mediante el compensador (15).^(8,24)

$$H(s) = \frac{\tau s + 1}{K(1 + \mu s)} \quad (15)$$

donde $\mu = 0,5$ min es una constante de tiempo del polo adicional, determinada por reglas heurísticas (fracción del tiempo muerto), estableciendo un compromiso entre ambos lazos $\mu = 0,5$ min, resultado similar al dado en Feliu-Batlle.⁽⁸⁾ Compensadores obtenidos (16) y (17):

RESULTADOS

El comportamiento de los diferentes esquemas de control ante variaciones en la referencia y perturbaciones en la

$$F_{r1}(s) = \frac{2,698 s + 1}{1,77 s + 1} \quad (13) ; \quad F_{r2}(s) = \frac{3,575 s + 1}{2 s + 1} \quad (14)$$

$$H_1(s) = \frac{2,73 s + 1}{44,04(1 + 0,5 s)} \quad (16) ; \quad H_2(s) = \frac{3,64 s + 1}{117,45(1 + 0,5 s)} \quad (17)$$

carga se evaluó aplicando una secuencia de cambios escalón en la referencia y una secuencia de perturbaciones en el flujo de combustible. Al aplicar la sintonización por diferentes métodos a las estructuras PI existentes en el horno (IAE y PID Tuner), estas evidencian limitaciones que provocan un comportamiento poco preciso. Las estrategias basadas en predictores de Smith demuestran mejoras sistemáticas en el comportamiento dinámico del horno. El comportamiento de las variables controladas en el paso 1 y el paso 2 del horno F-101 ante cambios en la referencia para los esquemas de control PI sintonizados por el método IAE y PID Tuner, así como los diferentes predictores de Smith se ilustran en la figura 2.

La tabla 1 resume el comportamiento del horno ante perturbaciones en la referencia de temperatura.

Se demostró que el PSM presenta una respuesta más efectiva al combinar mayor precisión, rapidez y estabilidad,

con tiempos de subida de 8 min a 10 min, de establecimiento de 11 min a 14 min y sobrepaso de 0,14 % a 0,17 % respecto a las otras estrategias evaluadas. El comportamiento de las variables controladas ante cambios en el flujo de combustible para los diferentes esquemas de control aplicados en el paso 1 y el paso 2 del horno F-101 se ilustran en la figura 3.

En la tabla 2 se resume el comportamiento del horno F 101 ante perturbaciones en la carga.

Los predictores de Smith presentan diferencias significativas en relación con el control convencional en su capacidad para rechazar perturbaciones. El PSM demuestra la capacidad superior, con tiempos de subida de 5 min a 6 min, de establecimiento de 12 min a 15 min y sobrepaso de 0,09 % a 0,11 %, lo que contribuye al ahorro de combustible y la disminución de emisiones contaminantes.

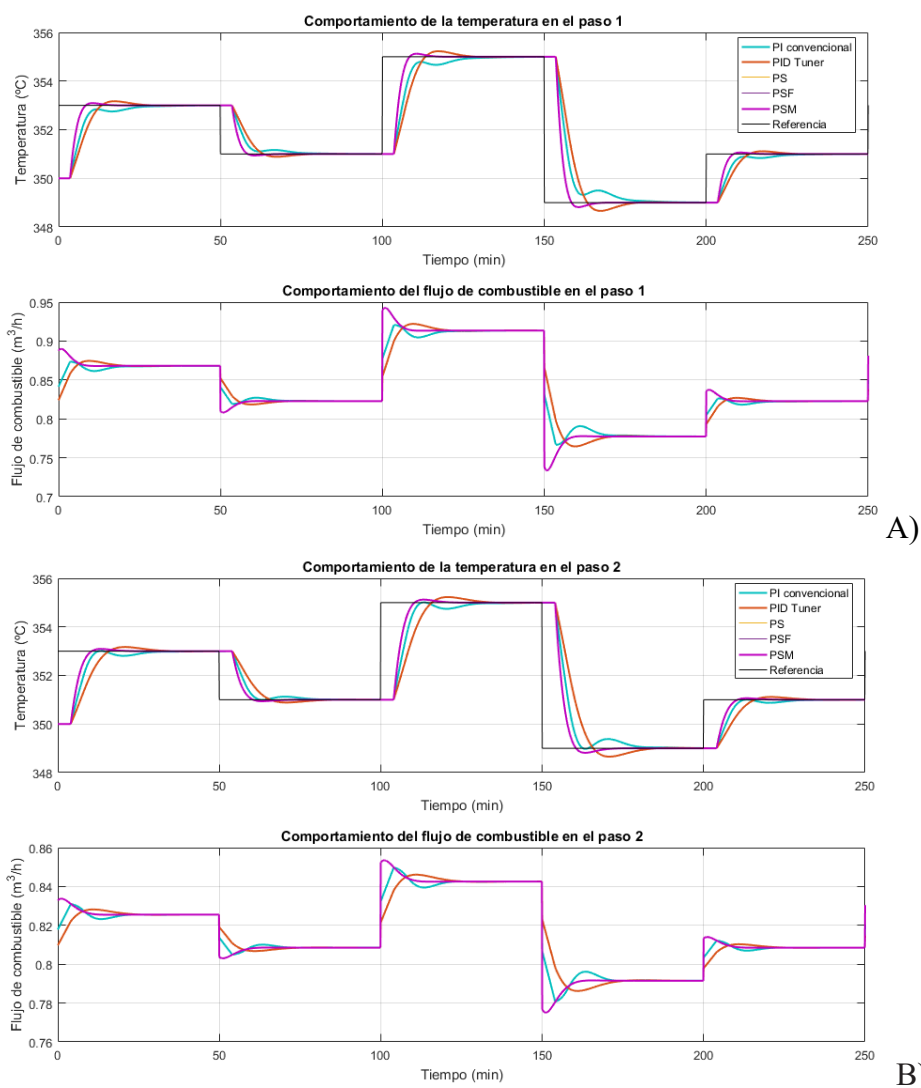


Fig. 2. Comportamiento ante cambios en la referencia: A) paso 1; B) paso 2.

Tabla 1. Indicadores de velocidad y estabilidad ante cambios en la referencia

Denominación del Parámetro	Horno F-101	IAE	PID Tuner	PS	PSF	PSM
Tr (min)	Paso 1	10	12	13	11	8
	Paso 2	12	15	16	13	10
Tss (min)	Paso 1	15	18	20	17	14
	Paso 2	12	15	18	16	11
Mp (%)	Paso 1	0,23	0,34	0,28	0,25	0,17
	Paso 2	0,20	0,31	0,25	0,23	0,14
Robustez (°C)	—	±0,6	±0,8	±0,7	±0,5	±0,3
Margen estabilidad	—	~45°	~35°	~45°	~50°	>60°

Tabla 2. Indicadores de velocidad y estabilidad ante cambios en la carga

Denominación del Parámetro	Horno F-101	IAE	PID Tuner	PS	PSF	PSM
Tr (min)	Paso 1	8	12	8	5	5
	Paso 2	10	15	10	10	6
Tss (min)	Paso 1	25	20	15	18	12
	Paso 2	30	25	20	22	15
Mp (%)	Paso 1	0,17	0,23	0,11	0,14	0,09
	Paso 2	0,20	0,26	0,14	0,17	0,11
Robustez (°C)	—	± 0,6	± 0,8	± 0,7	± 0,5	± 0,3
Margen estabilidad	—	~ 45°	~ 30°	~ 45°	~ 50°	60°

Implicaciones para eficiencia energética

Según la metodología API 560 pueden inferirse las varias implicaciones: ⁽¹⁸⁾

Reducción de variabilidad de temperatura: Los estándares de refinación indican que cada grado Celsius de reducción en variabilidad de temperatura puede resultar en mejoras de eficiencia del 0,5 % al 0,8 %. ⁽²⁵⁾ El PSM redujo la desviación estándar de 0,74 °C a 0,34 °C (reducción de 0,40°C), sugiriendo un potencial de mejora en eficiencia de aproximadamente 0,2 % a 0,3 %.

Minimización de sobrepasos: La reducción del 30 % en el máximo sobrepaso lograda por el PSM implica menor sobrecalentamiento innecesario del crudo y, por tanto, menor consumo de combustible. ⁽²⁶⁾

Mejor seguimiento de *setpoint*: Un control más preciso permite operar el horno más cerca de su punto óptimo de eficiencia sin riesgo de violar límites de seguridad o calidad. ⁽²⁷⁾

El empleo del PSM en el lazo de control de temperatura del horno, produce un ahorro de fueloil, lo que repercute en la reducción de los costos operativos de la planta, la disminución de la temperatura de los gases de combustión de salida de la chimenea y de la carga contaminante gaseosa a la atmósfera referidas al CO₂, NOx, CO, logrando el aumento de la eficiencia. ^(15,28,29,30)

DISCUSIÓN

La simulación rigurosa demuestra las ventajas de las estrategias basadas en predictores de Smith para el control de temperatura del horno F-101. Las mejoras observadas pueden explicarse desde fundamentos teóricos del control de procesos con retardo. Los predictores de Smith, al incorporar un modelo del proceso que predice su comportamiento futuro, cancelan el retardo del lazo de realimentación, permitiendo sintonizar el controlador PI de manera más efectiva que en los esquemas convencionales.

El predictor filtrado de Normey-Rico introduce un filtro que atenúa componentes de alta frecuencia del error de modelado, mejorando la robustez ante incertidumbres del modelo. El predictor de Smith modificado incluye un término adicional de compensación H(s) que estima y contrarresta activamente las perturbaciones en la carga antes de que afecten significativamente la variable controlada, lo que es particularmente valioso en hornos de refinación donde las perturbaciones son frecuentes.

Feliu-Batlle y Rivas-Pérez reportaron mejoras del 35 % al 40 % en tiempo de establecimiento empleando el predictor de Smith modificado (PSM) en el horno de la refinación Níco López. ⁽⁸⁾ Los resultados del presente trabajo muestran mejoras de 42 % a 45 %, ligeramente superiores, lo que puede

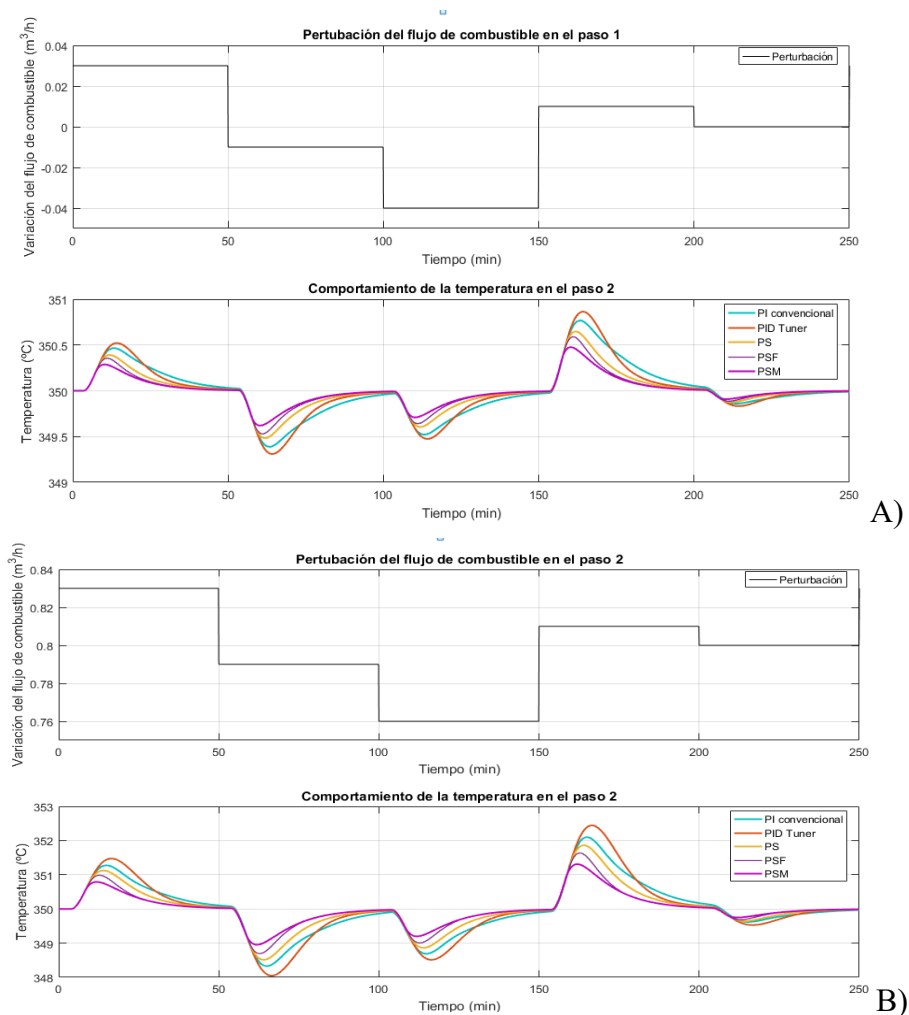


Fig. 3. Comportamiento ante cambios en la carga: A) paso 1; B) paso 2.

atribuirse a la razón θ/τ del horno F-101 ($\approx 1,3$ promedio) mayor que la reportada por dichos autores ($\approx 1,0$), amplificando los beneficios de la compensación de retardo. Zhang *et al.* ⁽¹⁶⁾ reportaron mejoras del 12 % al 15 % en variabilidad de temperatura mediante control LQR implementado en planta real; las mejoras obtenidas en simulación en el presente trabajo (45,2 %) son superiores, aunque se reconoce que la brecha entre simulación e implementación real puede ser apreciable.

Limitaciones del estudio

El presente trabajo presenta las siguientes limitaciones que deben considerarse en la interpretación de los resultados: a) los resultados se obtienen exclusivamente mediante simulación sobre el modelo identificado; la validación en planta real no fue posible por restricciones operativas de la refinería, por lo que los indicadores de mejora reportados (30 %; 42,3 %, 45,2 %) son válidos en el contexto del modelo utilizado y pueden diferir de los obtenidos en implementación real. b)

el modelo P1Ds asume linealidad en el punto de operación; variaciones significativas en las condiciones operativas (cambios en composición del crudo, flujos muy alejados del punto de operación) pueden requerir esquemas de control adaptativo; c) el análisis no considera restricciones operativas reales del sistema DCS/SCADA de la refinería, tales como saturación de actuadores, tiempos de muestreo del sistema de control o limitaciones de comunicación PROFIBUS; d) la robustez analizada es cualitativa (márgenes de fase), un análisis de robustez estructurado frente a incertidumbres paramétricas del modelo requeriría herramientas de control robusto (norma H_{∞}) que no forman parte del alcance de este trabajo.

Conclusiones

A partir del análisis del comportamiento del horno F-101 al diseñar y evaluar algoritmos de control avanzados para incrementar la eficiencia energética de este proceso multivariable caracterizado por retardos dominantes, quedó evidencia-

do que los algoritmos de control convencional PI presentan limitaciones a pesar de ser sintonizados con diferentes técnicas, causando mayor consumo energético.

Se comprobó que el uso del predictor de Smith modificado mejora el rendimiento del control multivariable de temperatura del horno, con mejor seguimiento de referencia, mayor rechazo de perturbaciones y mayor robustez. Esta estrategia permitió una reducción del sobrepaso máximo del 30 %, mejora del 42,3 % en tiempo de establecimiento (de 28,5 a 16,4) min y disminución del 45,2 % en la variabilidad de la variable controlada. Se establece una base técnica sólida para la toma de decisiones sobre la modernización del sistema de control del horno de calentamiento, representando una contribución metodológica aplicable a la industria de refinación cubana e internacional.

Líneas futuras de investigación, los resultados de este trabajo abren perspectivas en varias direcciones de investigación con integración de inteligencia artificial: a) redes neuronales informadas por física (PINN) para capturar no-linealidades del proceso de transferencia de calor en el F-101, superando las limitaciones del modelo lineal P1Ds en rangos amplios de operación; b) control predictivo basado en modelo (MPC) sobre la representación en espacio de estado del sistema MIMO, aprovechando directamente el modelo identificado para optimizar la secuencia de control con restricciones operativas explícitas. c) MPC adaptativo con actualización recursiva del modelo mediante mínimos cuadrados recursivos (RLS) o filtro de Kalman no escalonado (UKF), para mantener el desempeño ante variaciones lentas de las condiciones del proceso; d) aprendizaje por refuerzo (RL) para la optimización de políticas de control en entornos de simulación de alta fidelidad del horno, como alternativa al diseño manual de leyes de control.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Padilla DEC. Relación de la Industria 4.0 con la competitividad industrial. DERROTERO, Revista de la Ciencia y la Investigación. 2021;12(1):272.
2. Alfonso Lopez JJ. Sistema de Refinación en Cuba. Unión Cuba Petróleo (CUPET). Dirección de Refinación. Reporte Interno. Septiembre del 2023.
3. Hu Y, Tan C, Broughton J, Roach PA, Varga L. Nonlinear dynamic simulation and control of large-scale reheating furnace operations using a zone method based model. Applied Thermal Engineering. 2018;135: 41-53. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.02.022. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431117374938>
4. Dequan S, Guili G, Zhiwei G, Peng X. Application of expert fuzzy PID method for temperature control of heating furnace. Procedia Engineering. 2012;29:257-61. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705811065404>
5. Li G, Ji W, Wei L, Yi Z. A novel fuel supplies scheme based on the retrieval solutions of the decoupled zone method for reheating furnace. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2023;141:1065-72. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0735193322006947>
6. Benítez-González IO, García-Rodríguez MK, Rosario-Fernández V, Corral-Pozo CM, Rivas-Pérez R. Evaluación de estrategias de control para regular la variación de la temperatura en un horno de la refinería Níco López. 17 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura; 24-28 nov 2014; La Habana.
7. Rivas-Perez R, Feliu-Batlle V, Castillo-García FJ, Benitez-Gonzalez I. Temperature control of a crude oil preheating furnace using a modified Smith predictor improved with a disturbance rejection term. IFAC Proceedings Volumes. 2014;47(3):5760-5. Disponible en: doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.01999; <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0142331219862978>
8. Feliu-Batlle V, Rivas-Perez R. Control of the temperature in a petroleum refinery heating furnace based on a robust modified Smith predictor. ISA Transactions. 2021;112:251-70. Disponible en: doi.org/10.1016/j.isatra.2020.12.006. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896324020858>
9. Jacas Portuondo F, Peña Pupo L, Forgas Brioso MR. Identificación experimental de un Horno Tubular de precalentamiento para futuros análisis de estrategias de control. III Conferencia Internacional de Desarrollo Energético Sostenible CIDES 2023; 16 Nov 2023. Las Villas, Cuba.
10. Aguilar Malavé JS. Control predictivo basado en modelo para un sistema tipo SISO de nivel de líquido representado en variables de estados y su comparación con el control PID y control por redes neuronales artificiales. La Libertad: Universidad Estatal Península de Santa Elena; 2023, Ecuador.
11. Espin J, Castrillon F, Leiva H, Camacho O. A modified Smith predictor based-Sliding mode control approach for integrating processes with dead time. Alexandria Engineering Journal. 2022;61(12):10119-37. Disponible en: doi.org/10.1016/j.aej.2022.03.045. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016822002204>
12. Raja GL, Ali A. Enhanced tuning of Smith predictor-based series cascaded control structure for integrating processes. ISA Transactions. 2021;114:191-205. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019057820305644>
13. Mejía C, Camacho O, Chávez D, Herrera M. A modified Smith predictor for processes with variable delay. 2019 IEEE 4th Colombian Conference on Automatic Control (CCAC); october 15-19; Medellín, Colombia.
14. Materán Sánchez M. Eficiencia energética en refinerías de petróleo. enerLAC: Revista de Energía de Latinoamérica y el Caribe. 2018;11(2):72-105. Disponible en: <https://enerlac.olade.org/index.php/ENERLAC/article/view/49>
15. IEA. Energy Efficiency 2024. Paris: International Energy Agency; 2024. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2024>
16. Zhang R, Cao Z, Li P, Gao F. Design and implementation of an improved linear quadratic regulation control for oxygen content in a coke furnace. IET Control Theory and Applications. 2014;8(14):1303-11. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959152417300951>
17. Cantero Abreu NE. Ajuste de controladores en los lazos de control de combustible en los hornos de la Refinería de Cienfuegos S.A. Villa Clara: Universidad Marta Abreu de Las Villas; 2021. Cuba.

18. API. API Standard 560: Fired Heaters for General Refinery Service (5th ed., Includes Addendum 1 and 2). API Publishing Services; 2023.
19. Skogestad S, Postlethwaite I. Multivariable feedback control: analysis and design. 3rd ed. John Wiley & Sons; 2024.
20. Haratian M, Amidpour M, Hamidi A. Modeling and optimization of process fired heaters. *Applied Thermal Engineering*. 2019;157:113722. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.113722. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431117372277>
21. Asensi Martínez D. Study of multivariable control techniques using process simulators and MATLAB/Simulink. *Universidad de Alicante*, 2024;1-93.
22. Mullinger P, Jenkins B. *Industrial and process furnaces: principles, design and operation*. Butterworth-Heinemann; 2022.
23. Deshpande PB, Ash RH. *Multivariable Process Control*. Instrument Society of America; 1989.
24. Dumani Carrillo MA, Benítez Sangurima JL, Plaza D. Diseño del sistema de control de temperatura en un horno de refinería considerando perturbaciones. *ESPOL-FIEC*; 2022. Disponible en: <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/54278>
25. Anitha M, Prusty SB. System Identification and Analysis of Temperature Control System. 2023 International Conference on Advances in Electronics, Communication, Computing and Intelligent Information Systems (ICAECIS); 19-21 Apr 2023. DOI: 10.1109/ICAECIS58353.2023.10170210. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10170210>
26. Estremera Toledo E, Lussón Cervantes A, Bausa Ortiz I. Estudio comparativo en sistemas multivariados con retardo: modificaciones del Predictor de Smith y Control Predictivo. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*. 2017;38(2):49-64. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/347455295_Compensacion_del_retardo_de_tiempo_en_plantas_multivariadas_estables_y_de_fase_no_minima
27. Korupu VL, Muthukumarasamy M. A comparative study of various Smith predictor configurations for industrial delay processes. *Chemical Product and Process Modeling*. 2022;17(6):701-32. DOI: 10.1515/cppm-2021-0026. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/353554559_A_comparative_study_of_various_Smith_predictor_configurations_for_industrial_delay_processes
28. Smith CA. *Control automático de procesos: teoría y práctica*. 2da ed. México: Limusa; 2014.
29. Ghorbani M, Tavakoli-Kakhki M, Tepjakov A, Petlenkov E. Robust stability analysis of smith predictor based interval fractional-order control systems: A case study in level control process. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. 2022;10(3):762-80. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9938375>
30. EPA. AP-42: Compilation of Air Emissions Factors from Stationary Sources. United States Environmental Protection Agency; 2025. Disponible en: <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors-stationary-sources>

Recibido: 20/12/2025

Aprobado: 19/05/2026

Conflictos de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses entre ellos, ni con la investigación presentada, ni con la institución que representa.

Contribución de los autores

- Conceptualización: Francisco Jacas Portuondo, Leonardo Peña Pupo
- Curación de datos: Francisco Jacas Portuondo, Leonardo Peña Pupo
- Análisis formal: Francisco Jacas Portuondo, Leonardo Peña Pupo, Carlos Masip Rodríguez
- Adquisición de fondos: Francisco Jacas Portuondo, Leonardo Peña Pupo
- Investigación: Francisco Jacas Portuondo, Leonardo Peña Pupo, Carlos Masip Rodríguez
- Metodología: Francisco Jacas Portuondo, Leonardo Peña Pupo, Miguel R. Forgas Brioso
- Administración del proyecto: Francisco Jacas Portuondo, Leonardo Peña Pupo
- Recursos: Francisco Jacas Portuondo,
- Software: Carlos Masip Rodríguez, Francisco Jacas Portuondo
- Supervisión: Leonardo Peña Pupo, Francisco Jacas Portuondo
- Validación: Francisco Jacas Portuondo, Leonardo Peña Pupo
- Visualización: Leonardo Peña Pupo, Miguel Forgas Brioso
- Redacción – borrador original: Francisco Jacas Portuondo, Miguel Forgas Brioso
- Redacción – revisión y edición: Leonardo Peña Pupo, Francisco Jacas Portuondo,

Financiamientos

La investigación fue financiada por la Empresa de Automática, Informática, Comunicaciones y Metrología (TECNOMÁTICA), Cuba.

Cómo citar este artículo

Jacas Portuondo F, Peña Pupo L, Masip Rodríguez CA, Forgas Brioso MR. Diseño de estrategias de control avanzado en un horno multivariable de calentamiento de petróleo. *An Acad Cienc Cuba [Internet]* 2026 [citado en día, mes y año];16:e3221. Disponible en: <http://www.revistaccuba.cu/index.php/revacc/article/view/3221>

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).

© Los autores, 2026.

