

Modelado de un horno tubular de calentamiento de petróleo crudo

Modelling of the tubular furnace for the heating crude oil

Francisco Jacas-Portuondo¹ <https://orcid.org/0000-0001-5347-1189>

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

Miguel Rudens Forgas-Brioso² <https://orcid.org/0000-0001-6224-4201>

Mónica Mulet-Hing² <https://orcid.org/0000-0002-1836-3593>

¹ Tecnomática, UEB Santiago de Cuba, CUPET, Santiago de Cuba, Cuba

² Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Santiago de Cuba, Cuba

*Autor para correspondencia. Correo electrónico: leonardo.pena@uo.edu.cu

RESUMEN

Este trabajo muestra los resultados obtenidos en el estudio realizado en uno de los Hornos de Calentamiento de la Refinería de petróleo "Hermanos Díaz" de Santiago de Cuba. Se realiza una evaluación de las principales variables y perturbaciones que intervienen en el proceso de calentamiento del petróleo crudo, y se elabora un modelo matemático multivariable del Horno F-101. Además, se analiza la pertinencia y el impacto económico y medio ambiental de la obtención de un mejor comportamiento dinámico del horno que implica una disminución considerable de los consumos energéticos. El objetivo de la obtención del modelo matemático multivariable es el diseño de futuras estrategias de control que permitan incrementar la eficiencia energética de este proceso tecnológico, considerado el mayor consumidor de combustible del proceso de refinación. Los resultados obtenidos a través de simulación numérica, permitieron obtener por primera vez, un modelo multivariable con un ajuste (FIT) superior al 90 %. El modelo obtenido se aproximó a uno con estructura de primer orden con retraso de transporte, tomando en consideración las recomendaciones de la literatura especializada para este tipo

de procesos. La validación del modelo con mediciones de alta precisión, permitió obtener un error de modelado de hasta un 4,44 %. Finalmente, partiendo del modelo obtenido, se evalúan las limitaciones del sistema de control existente y se proponen futuras investigaciones sobre el desempeño de estos sistemas de control.

Palabras clave: modelo matemático; Identificación experimental; Hornos tubulares de calentamiento de crudo; eficiencia energética en hornos tubulares.

ABSTRACT

This work shows the results obtained in the study carried out in one of the Heating Furnaces of the "Hermanos Díaz" Oil Refinery in Santiago de Cuba. An evaluation of the main variables and disturbances involved in the crude oil heating process is carried out, and a multivariable mathematical model of the F-101 furnace is elaborated. Furthermore, the relevance and economic and environmental impact of obtaining a better dynamic behaviour of the furnace, which implies a considerable reduction in energy consumption, is analysed. The objective of obtaining the multivariable mathematical model is to design future control strategies to increase the energy efficiency of this technological process, which is considered to be the largest fuel consumer in the refining process. The results obtained through numerical simulation allowed us to obtain, for the first time, a multivariable model with a fit (FIT) of over 90 %. The model obtained approximated one with a first-order structure with transport delay, taking into account the recommendations of the specialised literature for this type of process. The validation of the model with high precision measurements allowed obtaining a modelling error of up to 4, 44%. Finally, based on the model obtained, the limitations of the existing control system are evaluated and future research on the performance of these systems is proposed.

Keywords: mathematical model; experimental identification; tubular furnaces for heating oil; energy efficiency in tubular furnaces.

Recibido: 06/09/2024

Aceptado: 12/12/2024

Introducción

La problemática actual en una Empresa de Refinación está dada en elevar su eficiencia industrial y específicamente la energética. La etapa de Calentamiento del crudo que realiza el horno F101^(1, 2) es una de las más importantes en el proceso de refinación, debido a que de esta depende que se alcance la temperatura óptima (350 °C) de entrada a la torre de destilación atmosférica, lográndose una adecuada destilación y la obtención de los destilados medios, los cuales poseen un alto valor comercial. Se estima,⁽³⁾ que en los hornos de las refinerías, como el que se muestra en la figura 1, se consume cerca del 70% del combustible del proceso, por lo que es pertinente realizar acciones de eficiencia energética en ellos.



Fig. 1- Horno tubular F 101de la Refinería “Hermanos Díaz”

Hasta la fecha, se reporta en la literatura científica especializada que el control convencional en hornos de calentamiento no resulta adecuado para satisfacer las necesidades de sus plantas.^(2, 4, 5) Los problemas de control típicos encontrados en los hornos son: sustanciales retrasos de la respuesta dinámica, presencia de no linealidades, considerables interacciones dado el carácter multivariable, topología de la estructura interior del horno y problemas de operación. Por estas razones se precisa obtener el modelo matemático del horno de calentamiento y vaporización F101, ^(6, 7) siendo el objetivo principal de este trabajo la identificación experimental del

horno F101, para realizar futuros análisis de las estructuras de control multivariables existentes y mejorar la eficiencia industrial y energética del horno.

Algunas investigaciones recientes refieren la pertinencia e importancia de alcanzar estándares internacionales de eficiencia energética ^(8, 9) y específicamente desde el punto de vista del control avanzado en hornos de calentamiento.^(1,10, 11, 12) En [11] se realiza una revisión de evaluaciones de eficiencia energética en hornos de fundición que puede ser extendida a hornos de refinación de combustible. Asimismo, algunas técnicas para analizar interacciones multivariables son analizadas.^(13, 14) El modelado de un horno de precalentamiento de combustible basado en optimización, empleando algoritmos genéticos se describe en la literatura, ⁽¹⁵⁾ siendo de utilidad práctica para la presente investigación un caso de estudio que puede ser empleado para la validación.⁽¹⁶⁾

Desde el punto de vista del control multivariable en hornos tubulares verticales de la industria del petróleo, se destaca un trabajo en el que se presenta la simulación de un horno y se analiza la eficiencia térmica del mismo.⁽¹⁷⁾ Otros trabajos emplean lógica fuzzy y sistemas expertos como algoritmos de control en estos hornos.^(18, 12) La decisión de mejorar el comportamiento dinámico del horno F101 mediante el análisis de la estructura de los lazos de control existentes y la propuesta de mejoras, se realizará posteriormente en futuros trabajos de investigación.

Los principales factores que afectan la eficiencia energética en los hornos de procesos son los elevados porcentajes de aire en exceso, la acumulación de hollín en las secciones de convección, las altas temperaturas de los gases de combustión, longitud de la llama del quemador por encima de la longitud de diseño y la temperatura del metal de los tubos en la zona de radiación.⁽³⁾ Estos factores deben tomarse en consideración en el diseño de los sistemas de control de los hornos.⁽¹⁹⁾

Desde el punto de vista de operación, algunas investigaciones refieren las principales acciones para mejorar la eficiencia energética en la operación de los hornos: el mantenimiento regular de los quemadores, los intercambiadores de calor y el sistema de control, con el fin de minimizar el exceso de aire en la combustión, limitándolo a 2-3 % de oxígeno.^(20, 21, 19, 3)

Se hace notar que se trabaja en otras acciones de mejoras energéticas como son el precalentamiento del aire utilizado en la combustión a través del gas de salida del horno, la modernización tecnológica de los quemadores y la utilización de esquemas avanzados de control en la combustión.

El objetivo específico de la investigación es el modelado matemático del horno F-101 considerándolo como un sistema multivariable.

El artículo se estructura de la forma siguiente: en el apartado 2 se describe el sistema de control distribuido PCS7 instalado, el funcionamiento horno F-101 con las principales variables de referencia, se presenta por primera vez el modelado matemático como un sistema multivariable 2x2, se analizan modelos reportados en la literatura y se realiza la identificación experimental efectuando variaciones de la temperatura del crudo en la salida del horno en cada uno de los pasos obteniendo el modelo matemático. En el apartado 3 se analizan los resultados obtenidos en la identificación experimental comparándolo con el comportamiento real del proceso obteniendo un índice FIT adecuado del modelo como un sistema 2x2 y se plantean las limitaciones de la estructura de control existente, lo que redundaría en una baja eficiencia energética. En el apartado 4 se muestran las conclusiones

Materiales y métodos

La disponibilidad real de un sistema de control distribuido SIMATIC PCS 7 en la Refinería "Hermanos Díaz", como se muestra en la figura 2, posibilita obtener la información necesaria para del proceso de identificación experimental que garanticen mayor confiabilidad, precisión y mejores condiciones para el tratamiento de los datos experimentales medidos aplicando métodos de observación y experimentación.

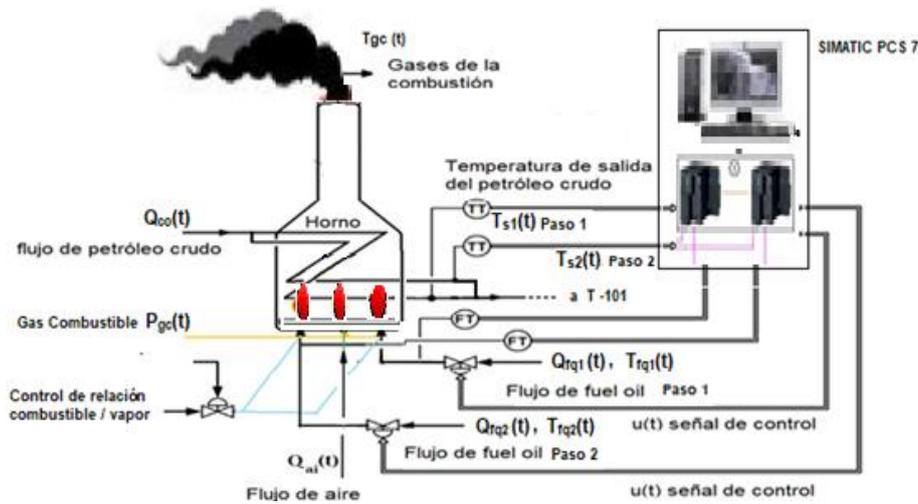


Fig. 2- Esquema del Sistema de Control Distribuido instalado.

Descripción del proceso tecnológico

El petróleo crudo es enviado por las bombas P 103 a la etapa de destilación atmosférica, en la cual pasa por dos corrientes a través de los intercambiadores de calor, para luego entrar en el horno tubular cilíndrico F 101, como se muestra en la figura 3. A la entrada del horno F 101 llega el petróleo crudo a una temperatura de 224 °C pasando por este en cuatro corrientes, en las cuales se han instalado reguladores de flujo para mantener estable la carga de entrada al horno. Estas corrientes se unen para formar dos pasos en cada uno de los cuales el petróleo crudo se calienta hasta 350 °C antes de ser introducido en la torre atmosférica.

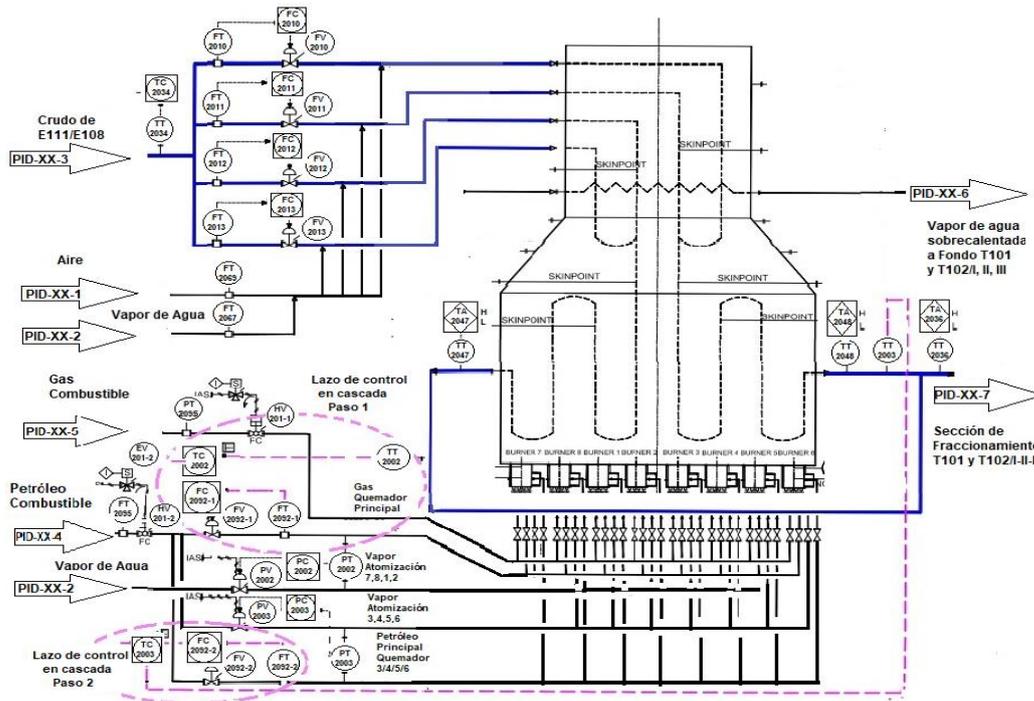


Fig. 3- Esquema general del Horno tubular F 101 de la Refinería “Hermanos Díaz”

La temperatura del petróleo a la salida de cada paso del horno se controla con dos lazos de control en cascada, una para el paso 1 y otro para el paso 2 como se muestra en la figura 4.

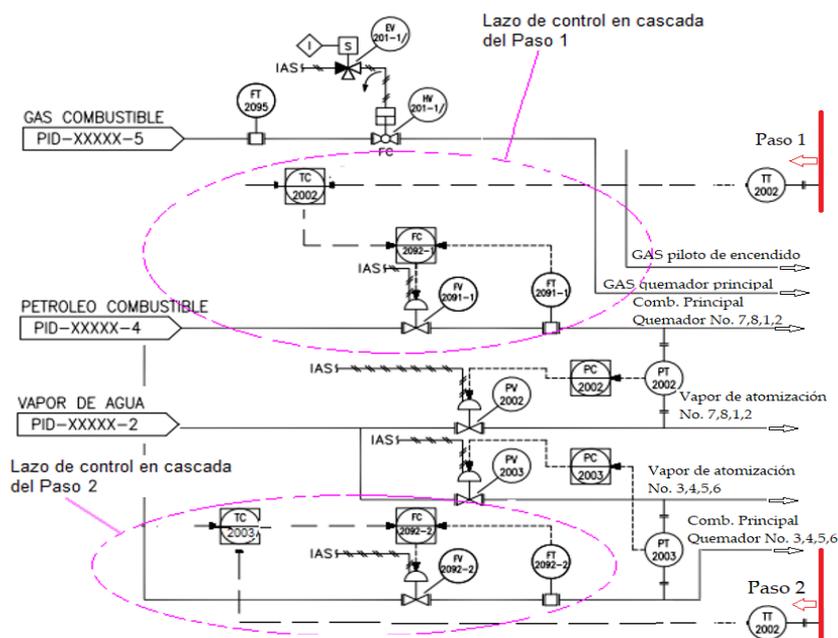


Fig. 4- Lazos de control en cascada de combustible al horno F 101 de la Refinería

Ambas cascadas actúan sobre las válvulas de suministro de combustible líquido a los quemadores del horno F101.

En el paso 1 la temperatura de salida del flujo del petróleo crudo es medido y se controla con el regulador TC-2002 que trabaja en cascada con el control de flujo del combustible a los quemadores, FC-2092-1.

En el paso 2 la temperatura de salida del petróleo crudo es medida y se controla con el regulador TC-2003 que trabaja en cascada con el control de flujo del combustible líquido a los quemadores, FC-2092-2.

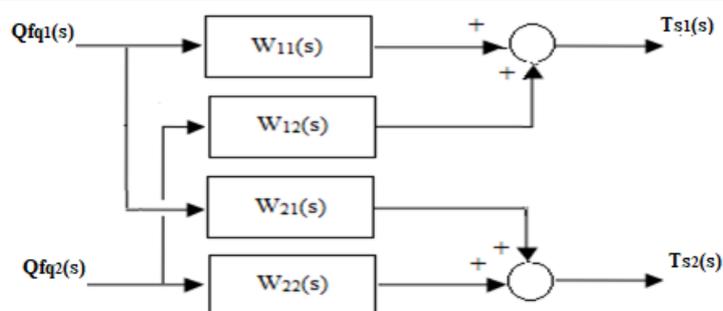
En ambos pasos la atomización del combustible líquido se garantiza por controles de relación de vapor, para obtener una combustión completa.

En el Horno F 101 se analiza por primera vez como un sistema multivariable 2x2, se observa en el trabajo estable del mismo que al ocurrir una variación en una de las señales de entrada (flujo de combustible a los quemadores), no solamente se afecta su propia señal de salida de temperatura, sino también la señal de salida de temperatura del otro paso, por lo que se puede decir que existe fuerte interacción entre las variables del proceso.⁽²²⁾

Dada la importancia del horno F 101 en la etapa de destilación atmosférica, desde el punto de vista energético y económico, es relevante obtener un modelo matemático con alta precisión, con el propósito de determinar en futuros trabajos, las mejores condiciones de operación, minimizando los sobreconsumos ante perturbaciones que garanticen un incremento de la eficiencia energética.

Modelado matemático del horno

El comportamiento dinámico del horno que incluye fenómenos térmicos y de fluídica dinámica abarcan de forma implícita a procesos de transferencia de calor y masa, quedando descritos por medio de la combinación de elementos de retrasos de transporte de primer o segundo orden y elementos de tiempo muerto. Los efectos combinados de las señales (de control y perturbaciones) de entrada sobre las salidas de control, pueden ser representados por el esquema de la figura 5.



. Fig. 5- Esquema del Modelo del Horno de Calentamiento

donde:

$Q_{fq1}(s)$ Flujo de fuel oíl a los quemadores de la sección del Paso 1(m^3/h).

$T_{s1}(s)$ Temperatura del crudo calentado en el Paso 1 ($^{\circ}C$)

$Q_{fq2}(s)$ Flujo de fuel oíl a los quemadores de la sección del Paso 2 (m^3/h)..

$T_{s2}(s)$ Temperatura del crudo calentado en el Paso 2 ($^{\circ}C$).

$W_{11}(s)$ Función de transferencia entre las temperatura del paso 1 y el flujo de combustible a los quemadores del paso 1 ($m^3/h/^{\circ}C$).

$W_{22}(s)$ Función de transferencia entre las temperatura del paso 2 y el flujo de combustible a los quemadores del paso 2 ($m^3/h/^{\circ}C$).

$W_{12}(s)$ Función de transferencia entre la temperatura de salida del paso 1 y el flujo de combustible a los quemadores del paso 2 (reflejo de las interacciones entre los pasos) ($^{\circ}C/ m^3/h$).

$W_{21}(s)$ Función de transferencia entre la temperatura de salida del paso 2 y el flujo de combustible a los quemadores del paso 1 (reflejo de las interacciones entre los pasos) ($^{\circ}C/ m^3/h$).

Los parámetros fundamentales del horno se mantuvieron en un ambiente controlado como se muestra en la tabla 1 que es un resumen de las variables de referencia destacando en cada una de ellas los valores máximo, mínimo y promedio.

Tabla 1- Variables de Referencia en el horno.

TABLA RESUMEN				
Variables de referencia	Máximo	Promedio	Mínimo	Unidad de Medida
TT-2034	201,30	199,81	196,60	$^{\circ}C$
FT-2092-1	0,672	0,611	0,572	m^3/h
TT-2002	346,60	343,42	336,30	$^{\circ}C$
FT-2092-2	0,914	0,805	0,789	m^3/h
TT-2003	328,60	324,43	317,20	$^{\circ}C$
TT-2036	343,30	341,06	334,70	$^{\circ}C$

Identificación experimental

La identificación del modelo se realizó con el apoyo del sistema de control distribuido SIMATIC PCS 7 a partir de mantener al horno en condiciones operacionales estables y perturbar la entrada de un paso del horno (flujo de fuel-oíl a los quemadores) con una señal escalón conocida, observándose el comportamiento de la temperatura a la salida de la materia prima con los otros parámetros constantes en ese paso y observando el grado de influencia en el otro paso. Luego se repite el proceso en el otro paso. En la tabla 2 se muestran las variables registradas en el proceso de identificación.

Tabla 2- Variables registradas.

Variabes	Denominación
Ts ₁	Temperaturas de salida de la materia prima del paso 1 (°C)
Ts ₂	Temperatura de salida de la materia prima del paso 2 (°C)
Qfq ₁	Flujo de fuel- oíl a los quemadores del paso 1 (m ³ /h).
Qfq ₂	Flujo de fuel- oíl a los quemadores del paso 2 (m ³ /h).
Tfq ₁ y Tfq ₂	Temperaturas de fuel- oíl a los quemadores (°C).
Qc	Flujo de entrada de materia prima (m ³ /h).

Las mediciones obtenidas de las variables de referencia son utilizadas para la determinación de los parámetros del modelo matemático apoyándose en el software AIDEA [23] empleando el algoritmo LDFIL descrito en [24], los resultados fueron comprobados utilizando las herramientas del MATLAB.2018b

Resultados y discusión

Resultados de la identificación experimental del proceso

El comportamiento dinámico del horno F101 al perturbar el paso 1 con una variación en el flujo de combustible de 0,2 m³/h muestra una variación en la temperatura del paso 1 y el efecto multivariable sobre el paso 2 como se muestra en la figura 6.

La figura 7 muestra el comportamiento dinámico del horno F101, al ser perturbado el paso 2 con una variación en el flujo de combustible de 0,18 m³/h. observando una variación de temperatura en el paso 2 y el efecto en el paso 1 ocasionando que la temperatura incremente su valor de salida.

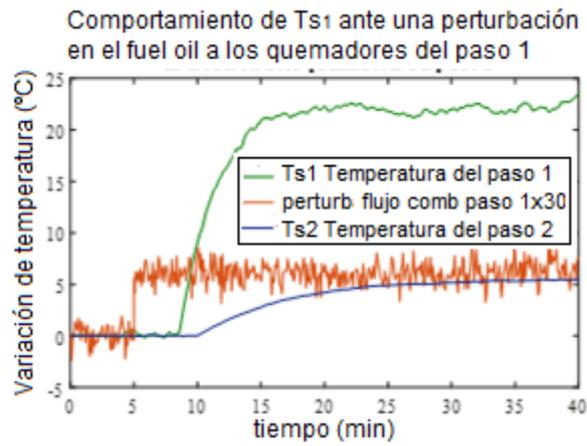


Fig. 6- Respuesta del Horno al excitar el P1 con una variación en el flujo de combustible

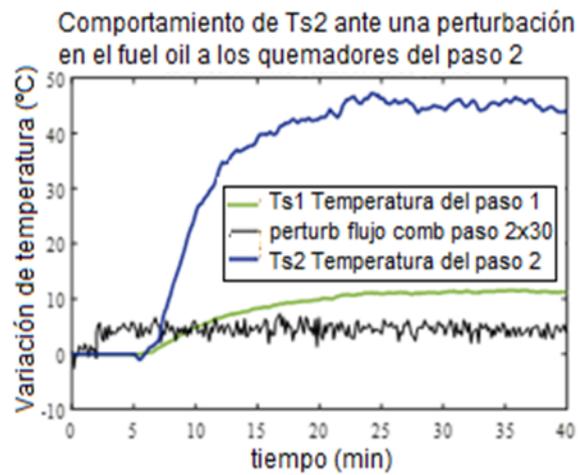


Fig. 7- Respuesta del horno al excitar el P2 con una variación en el flujo de combustible

Se demostró que en los límites de pequeñas desviaciones del régimen normal de funcionamiento, las funciones de transferencia, que relacionan la temperatura de salida con el flujo de combustible puede ser aproximada según la ecuación 1. ⁽⁴⁾

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{k e^{T_d s}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \quad (1)$$

La identificación experimental se aplicó en los dos pasos del horno obteniéndose diferentes juegos de datos como resultado de mediciones, los cuales sirvieron para obtener el modelo matemático que representa el comportamiento dinámico del horno, con la ayuda del AIDEA ^(23, 24) y

MATLAB R2018b. Los resultados se muestran en la tabla 3, siendo la función de transferencia genérica la ecuación (2).

$$w(s) = \frac{k(Ts+1)e^{-T_d s}}{(T_1s+1)(T_2s+1)} \quad (2)$$

Tabla 3- Valores de los parámetros del modelo general de acuerdo a la ecuación 2.

PARTICULARIZANDO EL SISTEMA	K (%/%)	T (MIN.)	T ₁ (MIN.)	T ₂ (MIN.)	T _D (MIN.)	GENERALIZANDO EL SISTEMA
W _{T1} (s)	8,037	1,500	1,250	2,730	3,540	W _{T1} (s)
W _{F1} (s)	5,290	1,250	0,000	1,500	0,000	
W _{T2} (s)	8,320	0,500	0,430	3,640	4,000	W _{T2} (s)
W _{F2} (s)	14,110	0,430	0,000	0,500	0,000	
W ₂₁ (s)	11,090	0,000	7,250	0,000	5,000	W ₂₁ (s)
W ₁₂ (s)	29,810	0,000	6,310	0,000	4,500	W ₁₂ (s)

Se puede obtener un modelo análogo simplificado de primer orden considerando retraso de transporte, ⁽²⁵⁾ según la ecuación 3 se muestra en la tabla 4.

$$w(s) = \frac{ke^{-T_d s}}{(T_1s+1)} \quad (3)$$

Tabla 4- Valores de los parámetros del modelo general, correspondiente a la ecuación 3.

Modelos del horno de calentamiento de 1er orden con retardos	
Modelos	Descripción
$W_{11}(s) = \frac{44,04}{2,73s + 1} e^{-3,54s}$	Función de transferencia entre la temperatura de salida del paso 1 y el flujo de combustible a los quemadores del paso 1 (m ³ /h /°C).
$W_{22}(s) = \frac{117,45}{3,64s + 1} e^{-4,0s}$	Función de transferencia entre la temperatura de salida del paso 1 y el flujo de combustible a los quemadores del paso 1 (m ³ /h /°C).
$W_{21}(s) = \frac{11,09}{7,25s + 1} e^{-5,0s}$	Función de transferencia entre la temperatura de salida del paso 2 y el flujo de combustible a los quemadores del paso 1 (m ³ /h /°C).
$W_{12}(s) = \frac{29,81}{6,31s + 1} e^{-4,50s}$	Función de transferencia entre la temperatura de salida del paso 1 y el flujo de combustible a los quemadores del paso 2 (m ³ /h /°C).

Los resultados obtenidos en la funciones de transferencias multivariables en cada caso se comparan con la respuesta del sistema en las figuras 8, 9, 10,11.

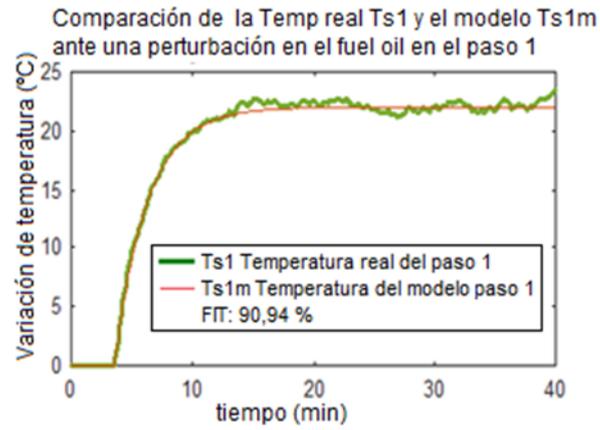


Fig. 8- Comparación de T_{s1} y T_{s1m}

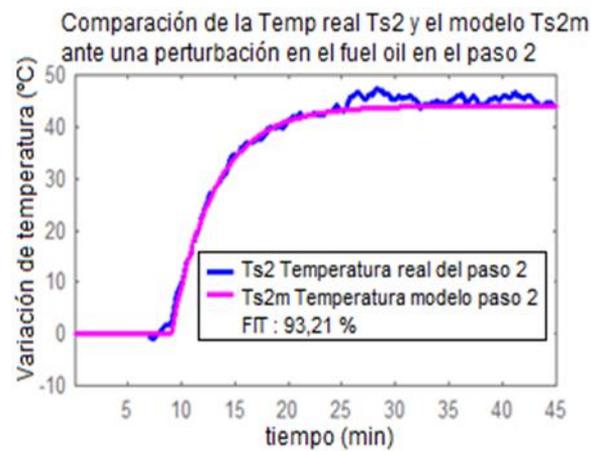


Fig. 9 - Comparación de T_{s2} y T_{s2m}

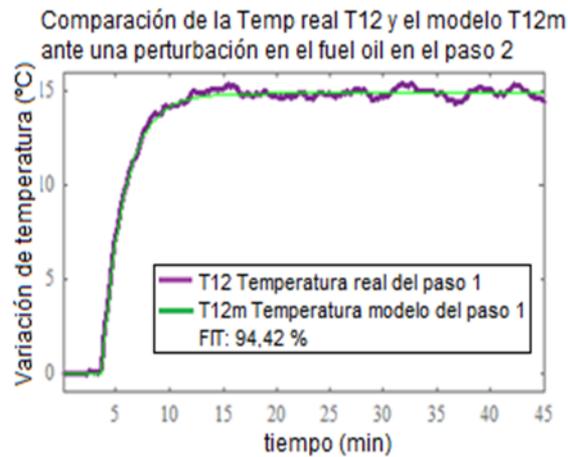


Fig. 10 - Comparación de T_{12} y T_{12m}

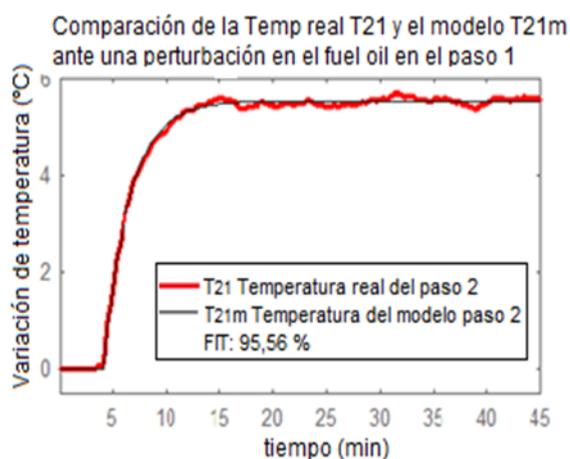


Fig. 11- Comparación de T_{21} y T_{21m}

El análisis comparativo entre los resultados obtenidos en las gráficas del comportamiento del sistema real y el modelo obtenido de 1er orden con retraso se muestra en la tabla 5.

Tabla 5 - Valores del por ciento de FIT.

Sistema	FIT (%)
W_{11} (s)	90,94
W_{22} (s)	93,21
W_{21} (s)	95,56
W_{12} (s)	94,42

Los resultados muestran la calidad del modelado matemático realizado al horno con alta precisión (FIT por encima del 90 %), adaptabilidad, integración en los modelos obtenidos por lo que se puede considerar que el modelo multivariable del horno está validado.

Comportamiento del proceso con el control existente

Con el modelo obtenido y las estructuras de control PI que se tienen a fin de obtener un producto final de más calidad, se ajustaron los reguladores de las cascadas de los pasos del horno empleando control óptimo según se refiere en documentación del proyecto de modernización.⁽²⁶⁾ A continuación, fueron sometidas sus entradas a perturbaciones en escalón con amplitud indicada en la gráfica, mostrándose el comportamiento dinámico dado en la figura 12.

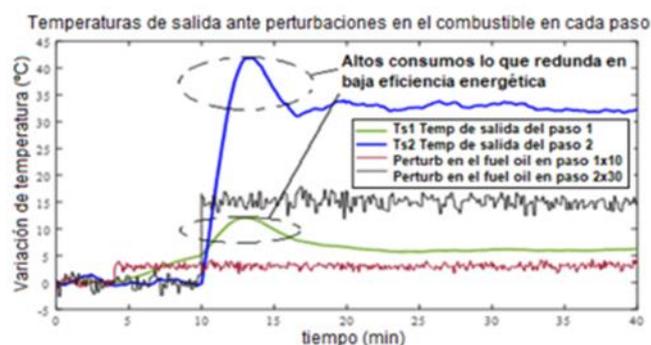


Fig. 12- Comportamiento de la temperatura del horno en cada uno de los pasos, con un controlador PI ante una perturbación en escalón en las entradas de combustible

Nota: se utiliza la misma leyenda en las figuras 12 y 13.

Para demostrar la consistencia de la estructura de control existente, se sometió el sistema a perturbaciones senoidales en las entradas, mostrándose el comportamiento dinámico en la figura 12. En las figuras 12 y 13 se aprecian limitaciones de los algoritmos de control PI existentes en el horno F101 que propician un alto consumo de portadores energéticos y un bajo índice de calidad del producto final.

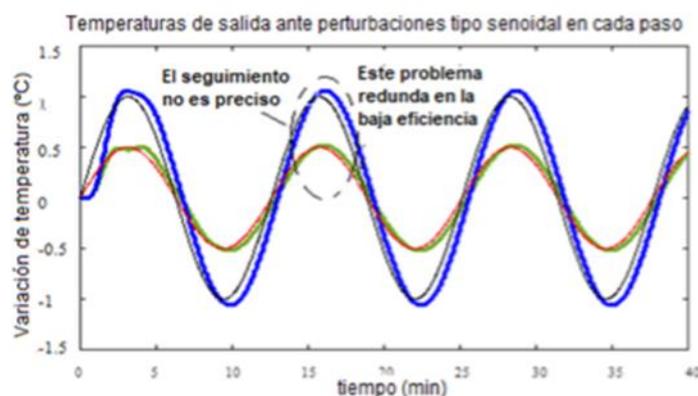


Fig. 13- Comportamiento de la temperatura del horno en cada uno de los pasos con un controlador PI ante una perturbación senoidal en la entrada de combustible

Específicamente, en el paso 2 se aprecia un excesivo sobrepaso y un tiempo de establecimiento largo. Estas características, unidas a que el seguimiento mostrado en la figura 13 no es preciso, hacen concluir que el sistema de control diseñado y actualmente en uso no es óptimo desde el punto de vista energético. Por tanto, en trabajos futuros se precisa del diseño de un

sistema de control que garantice los requerimientos de control y aumenten la eficiencia energética del horno.

Conclusiones

En esta investigación se obtuvo el modelo matemático del horno de calentamiento en funciones de transferencia como un sistema multivariable 2x2 por medio de identificación experimental, a partir de mediciones precisas de las principales variables de referencia. La comparación de los modelos y el proceso real mediante simulación, mostraron la consistencia del modelo obtenido con un FIT por encima del 90 %. Sin embargo, el ajuste actual de los reguladores PI existentes en los lazos de control en cascada en los pasos del horno exhibieron limitaciones que redundan en una baja eficiencia energética del proceso. En trabajos futuros se abordará el diseño de algoritmos de control que permitan incrementar la eficiencia energética de este tipo de procesos multivariables caracterizados por ser retardos dominantes.

Referencias bibliográficas

1. 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), 1303-1311, ISSN:1751-8644, DOI:10.1049
2. ABREU N E C. Ajuste de controladores en los lazos de control de combustible en los hornos de la Refinería de Cienfuegos S.A: Marta Abreu de las Villas. Villa Clara; 2021. Informe inédito
3. MATERÁN S M. "Eficiencia energética en refinerías de petróleo una mirada a los esfuerzos y acciones llevadas a cabo por la industria de la refinación a nivel internacional y regional", *enerLAC: Revista de Energía de Latinoamérica y el Caribe*, 2018,**II** (2), 72-105, ISSN:2602-8042
4. FELIU-BATLLE V, RIVAS-PÉREZ R, CASTILLO-GARCÍA F. "Design of a PI α controller for the robust control of the steam pressure in the steam drum of a bagasse-fired boiler", *IEEE Access*, 2021,**9** 95123-95134, ISSN:2169-3536
5. JACAS P F, PEÑA P L, FORGAS B M R. Identificación experimental de un Horno Tubular de precalentamiento para futuros análisis de estrategias de control *III Conferencia Internacional de Desarrollo Energético Sostenible CIDES 2023*.

6. ISIDORI A. *Nonlinear Control Systems*. Third ed: Springer-Verlag 1995,
7. MAZAIRA I, LUSSON A. "Regulación Linear Mediante Modelos Cercanos", *Congreso Chileno Automática 2000*, 2000
8. PEÑA PUPO L, FARIÑAS WONG E, DOMÍNGUEZ ABREU H, FONG BARRIO J. "Ajuste del punto de operación de micro-turbinas hidráulicas a través del método de regulación de velocidad combinada", *Tecnología Química*, 2020,**40** (1), 150-168, ISSN:2224-6185
9. PEÑA-PUPO L, MARTÍNEZ-GARCÍA H, GARCÍA-VÍLCHEZ E, FARIÑAS-WONG E Y, NÚÑEZ-ÁLVAREZ J R. "Combined method of flow-reduced dump load for frequency control of an autonomous micro-hydropower in ac microgrids", *Energies*, 2021,**14** (23), 8059, ISSN:1996-1073
10. GÓNGORA D M, VAN CANEGHEM J, HAESELDONCKX D, LEYVA E G, MENDOZA M R, DUTTA A. "Post-combustion artificial neural network modeling of nickel-producing multiple hearth furnace", *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 2020,**18** (7), 20190191, ISSN:1542-6580.
11. RIDONG ZHANG A X, AND FURONG GAO. "Temperature Control of Industrial Coke Furnace Using Novel State Space Model predictive Control", 2014, DOI:10.1109.
12. 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**106572, ISSN:0735-1933
13. GARG A, TANGIRALA A K. "Interaction assessment in multivariable control systems through causality analysis", *IFAC Proceedings Volumes*, 2014,**47** (1), 585-592, ISSN:1474-6670
14. DOMÍNGUEZ A H, PEÑA P L, MULET H M. "Simulación en tiempo real de una columna de destilación para la prueba de controladores programables", *Tecnología Química*, 2002, **22**(2), 27-31.
15. HU Y, TAN C, BROUGHTON J, ROACH P A, VARGA L. "Model-based multi-objective optimisation of reheating furnace operations using genetic algorithm", *Energy Procedia*, 2017,**142**, 2143-2151, ISSN:1876-6102
16. CHUNSHENG W, YAN Z, ZEJUN L, FUXIANG Y. "Heat transfer simulation and thermal efficiency analysis of new vertical heating furnace", *Case Studies in Thermal Engineering*, 2019,**13**,100414, ISSN:2214-157X
17. HU Y, TAN C, BROUGHTON J, ROACH P A, 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, ISSN:1359-4311
18. DEQUAN S, GUILI G, ZHIWEI G, PENG X. "Application of expert fuzzy PID method for temperature control of heating furnace", *Procedia Engineering*, 2012,**29**, 257-261, ISSN:1877-7058
19. CHAUDHURI U R. *Fundamentals of petroleum and petrochemical engineering*: Crc Press 2016, ISBN:1439851611

20. BRENDAN S. "Robust Control Optimize Productivity in Refinery Operations, this Advanced controler offers yield maximizing", *Chemical Engineering*, 1997.
21. CARLBORG H, IREDAHL H. Modeling and temperature control of an industrial furnace: Linköping University; 2016.
22. GEROV R, JOVANOVIĆ T V, JOVANOVIĆ Z. "Parameter estimation methods for the fopdt model, using the lambert w function", *Acta Polytechnica Hungarica*, 2021,**18** (9), 141-159.
23. ARAFET P P, CHANG F, DOMINGUEZ H. Programa de Ayuda a la Identificación Dinámica mediante Experimentos Activos. Memorias del V Congreso Latinoamericano de Control Automático. ISPJAM 1992.
24. AGUADO B A. Temas de identificación y control adaptable: Plaza de la Revolución, Cuba: Instituto de Cibernética, Matemática y Física 2000, ISBN:978-959-7056-11-9,
25. GEROV R, JOVANOVIĆ T V, JOVANOVIĆ Z. "Parameter Estimation Methods for the FOPDT Model, using the Lambert W Function", 2021, **18**, 142-159.
26. CUPET. Tarea técnica para proyecto de ingeniería. Estudio para la mejora de la eficiencia energética del horno F-101 de la unidad de destilación atmosférica de la planta combinada #2. Reporte Interno; 2012.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no hay conflictos de interés

Contribución de los autores

Francisco Jacas Portuondo: conceptualización, metodología, software, validación, análisis formal e investigación, recursos, procesado de los datos, escritura de la versión del manuscrito, revisión y edición, visualización, supervisión y administración del proyecto, adquisición de fondos.

Leonardo Peña Pupo: conceptualización, metodología, validación, análisis formal e investigación, recursos, procesado de los datos, escritura de la versión del manuscrito, revisión y edición, visualización, supervisión y administración del proyecto.

Miguel Rudens Forgas Brioso: metodología, análisis formal e investigación, escritura de la versión del manuscrito, revisión y edición, visualización.

Mónica Mulet Hing: análisis formal e investigación, procesado de los datos, escritura de la versión del manuscrito, revisión y edición, visualización.