



### III Conferencia Internacional de Desarrollo Energético Sostenible CIDES 2023

#### Identificación experimental de un horno tubular de precalentamiento para futuros análisis de estrategias de control

#### *Experimental identification of a tubular preheating furnace for future control strategy analysis*

Francisco Jacas Portuondo<sup>1</sup>, Leonardo Peña Pupo<sup>2</sup>, Miguel Rudens Forgas Brioso<sup>3</sup>

1- MSc. Francisco Jacas Portuondo. Tecnomática, UEB Santiago de Cuba, CUPET, Cuba,  
[fjacas@tm.cupet.cu](mailto:fjacas@tm.cupet.cu)

2- Dr.C. Leonardo Peña Pupo. Universidad de Oriente. Departamento de Ingeniería en  
Automática, Cuba, [leonardo.pena@uo.edu.cu](mailto:leonardo.pena@uo.edu.cu)

3- Dr.C. Miguel Rudens Forgas Brioso. Universidad de Oriente. Departamento de  
Ingeniería Eléctrica, Cuba, [mforgas@uo.edu.cu](mailto:mforgas@uo.edu.cu)

#### **Resumen:**

Este trabajo muestra los resultados obtenidos en el estudio realizado en uno de los Hornos Tubulares de Calentamiento de la Planta Combinada # 2 de la Refinería "Hnos. Díaz" de Santiago de Cuba, donde se hace un análisis de las principales variables y perturbaciones que intervienen en el proceso de calentamiento y vaporización del petróleo crudo, así como se caracteriza dinámicamente el Horno F 101, con el objetivo de obtener la modelo multivariable que ilustre el comportamiento de dicho Horno para facilitar así, el análisis futuro de diferentes estrategias de control en dicho objeto tecnológico. Los resultados obtenidos a través de simulación numérica se muestran en gráficas y curvas de respuestas, lo que permite concluir sobre el desempeño del futuro sistema de control. Se analiza además el impacto económico y medio ambiental del empleo de estas técnicas y su pertinencia, con la obtención de un mejor comportamiento dinámico del sistema de control y una disminución de los consumos energéticos.



**IV Convención Científica Internacional UCLV 2023**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**"Identificación experimental de un horno tubular de precalentamiento para**  
**Futuros análisis de estrategias de control"**

**Abstract:**

*This work shows the results obtained in the study carried out in one of the Heating oil Tubular Furnaces of the Combined Plant # 2 of the "Hnos. Díaz" Refinery in Santiago de Cuba, where an analysis is made of the main variables and disturbances acting in the heating and vaporization process of crude oil, as well as the dynamic characterization of Furnace F 101. The objective of obtaining the multivariable representation of the states that illustrate the behavior of this Furnace to facilitate the analysis of different control strategies in this technological object. The results obtained through numerical simulation are shown in graphs and response curves, which allow concluding on the performance of the future control system. The economic and environmental impact of the use of these techniques is also analyzed, as well as their relevance in obtaining a better dynamic behavior of the control system and a decrease in energy consumption.*

**Palabras Clave:** Identificación experimental, Control de procesos, Hornos tubulares de calentamiento de crudo, Eficiencia energética en hornos tubulares

**Keywords:** *Experimental identification, Process control, Tubular furnaces for heating oil, Energy efficiency in tubular furnaces*

## **1. 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 desempeña el horno F101 (Zhang, Cao, Li, & Gao, 2014), (Cantero, 2021) 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 (Materán, 2018) 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.



**IV Convención Científica Internacional UCLV 2023**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**"Identificación experimental de un horno tubular de precalentamiento para**  
**Futuros análisis de estrategias de control"**



Figura 1. Horno tubular F 101 de la Refinería "Hnos 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 (Cantero, 2021), (Feliu-Batlle, Rivas-Perez, & Castillo-García, 2021). 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 esta razón se precisa conocer el modelo matemático del horno de calentamiento y vaporización F101 (Isidori, 1995), (Mazaira & Lusson, 2000). El objetivo principal de este trabajo es 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 (Peña Pupo, Fariñas Wong, Domínguez Abreu, & Fong Barrio, 2020), (Peña-Pupo, Martínez-García, García-Vílchez, Fariñas-Wong, & Núñez-Álvarez, 2021) y específicamente desde el punto de vista del control avanzado en hornos de calentamiento (Góngora et al., 2020), (Zhang, Cao, et al., 2014), (Zhang, Cao, et al., 2014), (Zhang, Xue, & Gao, 2014), (Li, Ji, Wei, & Yi, 2023).





**IV Convención Científica Internacional UCLV 2023**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**"Identificación experimental de un horno tubular de precalentamiento para**  
**Futuros análisis de estrategias de control"**

Los hornos de refinería, también llamados calentadores de fuego directo (Fired Heaters) son equipos en los cuales se suministra calor a un fluido de proceso principalmente mediante radiación y por convección a partir de la circulación de los gases calientes productos de la combustión de un combustible en su interior. El tipo de calentador se describe normalmente por la configuración estructural, la configuración de la bobina del tubo radiante o la forma y disposición del quemador. De acuerdo a la configuración estructural se clasifican en: Cilíndrico, caja, cabina, caja multicelda. De acuerdo a la configuración de bobina de tubo radiante pueden ser: vertical, horizontal, helicoidal y en arco. Teniendo en cuenta el arreglo o disposición de los quemadores pueden ser: hacia arriba (Upfired), hacia abajo (Downfired) y de pared (Wallfired).

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 llama de diseño y la temperatura del metal de los tubos en la zona de radiación (Materán, 2018). Estos factores deben tomarse en consideración en el diseño de los sistemas de control de los hornos (Chaudhuri, 2016).

Desde el punto de vista de operación, algunas investigaciones refieren (Brendan, 1997), (Carlborg & Iredahl, 2016), (Chaudhuri, 2016), (Materán, 2018) las principales acciones para mejorar la eficiencia energética en la operación de los hornos: el mantenimiento regular de los quemadores, así como de los intercambiadores de calor y del sistema de control, con el fin de minimizar el exceso de aire en la combustión, limitándolo a 2-3% de oxígeno. El precalentamiento del aire, donde el gas de salida del horno es usado para precalentar el aire de combustión. La modernización tecnológica en los quemadores y la utilización de esquemas avanzados de control en la combustión.

## **2. Metodología**

Partiendo de la disponibilidad real de un sistema de control distribuido y el sistema supervisorio (SCADA) en toda la Refinería "Hnos Díaz", se puede obtener información



**IV Convención Científica Internacional UCLV 2023**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**"Identificación experimental de un horno tubular de precalentamiento para**  
**Futuros análisis de estrategias de control"**

necesaria para del proceso de identificación experimental que garanticen mayor confiabilidad, precisión y mejores condiciones para el tratamiento de los datos experimentales medidos. Las señales registradas fueron en cada paso las siguientes:

- Temperaturas de salida de la materia prima ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- Temperaturas de fuel- oíl a los quemadores ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- Flujo de entrada de materia prima ( $\text{m}^3/\text{h}$ ).
- Flujo de fuel- oíl a los quemadores ( $\text{m}^3/\text{h}$ ).

La identificación del modelo se realizó a partir de las mediciones obtenidas a la salida del proceso (temperatura de materia prima). Se excitó 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. Para la evaluación dinámica del horno F101 (Figura 3) se investigan sobre los requerimientos técnicos de los hornos en las plantas de refinación de crudo, las características y requerimientos de las estructuras de control aplicadas en hornos tubulares de calentamiento y vaporización.

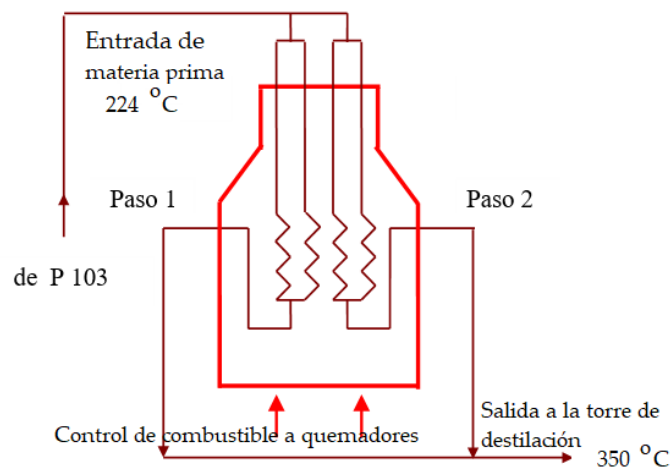


Figura 3. Esquema general del Horno tubular F 101 de la Refinería "Hnos Díaz".

El petróleo crudo es enviado por las bombas P 103 a la etapa de destilación atmosférica, en la cual pasan por dos corrientes a través de los intercambiadores de calor E 106 -E 111 (no mostrados en la Figura 3), para luego entrar en el horno tubular cilíndrico F 101.



IV Convención Científica Internacional UCLV 2023  
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas  
"Identificación experimental de un horno tubular de precalentamiento para  
Futuros análisis de estrategias de control"

A la entrada del horno F 101 llega el petróleo crudo a una temperatura de 224 °C pasando por este en cuatro corrientes (Figura 3). En cada una de estas corrientes 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 de destilación atmosférica. 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 otra para el paso 2 (Figura 4). Estas cascadas actúan sobre las válvulas de suministro de combustible líquido al horno F101.

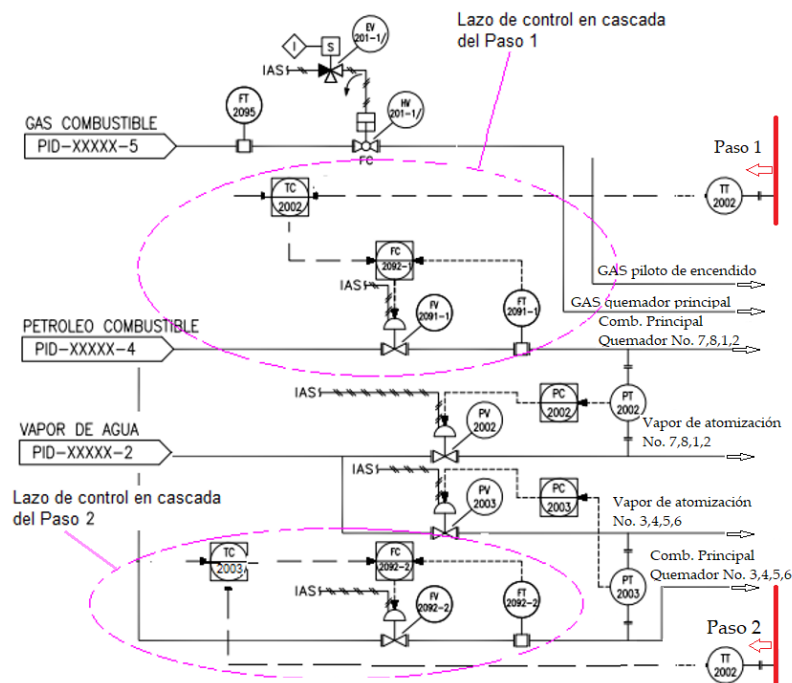


Figura 4. Lazos de control en cascada de combustible al horno F 101 de la Refinería "Hnos Díaz".

El Horno F 101 (Figura 3.) se analiza 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 afecta la señal de salida de temperatura del otro paso, por lo que se puede decir que existe fuerte interacción multivariable entre las variables del proceso (Gerov, Jovanovic, & Jovanovic, 2021).



**IV Convención Científica Internacional UCLV 2023**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**"Identificación experimental de un horno tubular de precalentamiento para**  
**Futuros análisis de estrategias de control"**

Debido a la importancia que posee el horno F 101 en la etapa de destilación atmosférica, desde el punto de vista energético y económico, se evaluará en futuros trabajos, con el propósito de determinar las mejores condiciones de operación, disminuyendo los tiempos de establecimiento ante perturbaciones que garanticen un incremento de la eficiencia energética.

Las características dinámicas que exhibe el sistema de fenómenos térmicos y fenómenos de fluídica dinámica las cuales abarcan de forma implícita a procesos de transferencia de calor y masa, quedarán 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 paramétrico de la Figura 4.

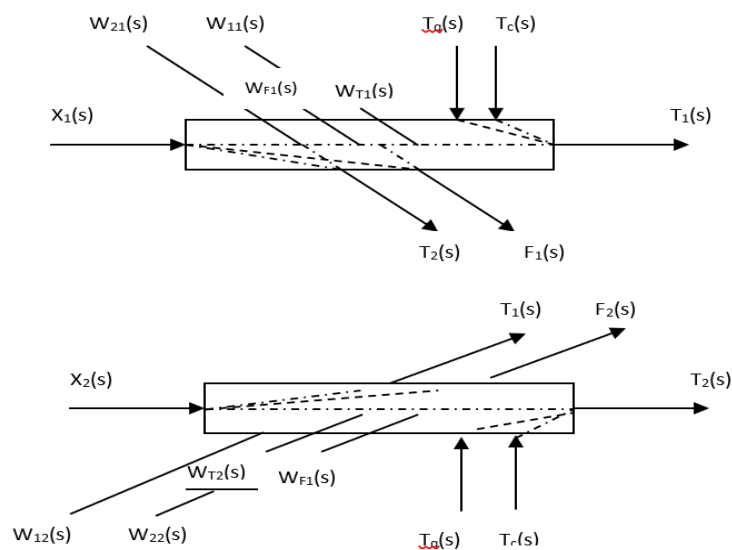


Figura 4. Esquema Paramétrico del Modelo del Horno de Calentamiento y vaporización. (Autores, 2023)

Donde:

- $X_1(s)$  Posición de válvula del Paso 1 (%).
- $F_1(s)$  Flujo de fuel oíl a los quemadores de la sección del Paso 1(m<sup>3</sup>/h).
- $T_1(s)$  Temperatura del crudo calentado en el Paso 1 (°C)
- $X_2(s)$  Posición de válvula del Paso 2 (%).
- $F_2(s)$  Flujo de fuel oíl a los quemadores de la sección del Paso 2 (m<sup>3</sup>/h)..





**IV Convención Científica Internacional UCLV 2023**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**"Identificación experimental de un horno tubular de precalentamiento para**  
**Futuros análisis de estrategias de control"**

$T_2(s)$  Temperatura del crudo calentado en el Paso 2 ( $^{\circ}C$ ).

$W_{F1}(s)$ ,  $W_{F2}(s)$  Funciones transferentes entre los flujos y posiciones de válvula ( $\%/m^3/h$ ).

$W_{T1}(s)$ ,  $W_{T2}(s)$  Funciones transferentes entre las temperaturas y los flujos de combustible a los quemadores ( $^{\circ}C/m^3/h$ ).

$W_{11}(s)$ ,  $W_{22}(s)$  Funciones transferentes entre las temperaturas y las posiciones de válvula de los flujos ( $\%/^{\circ}C$ ).

$T_q(s)$  Temperatura de entrada del crudo a calentar en el Paso 1 y en el Paso 2 ( $^{\circ}C$ ).

$T_c(s)$  Temperatura del fuel oil a la entrada de los quemadores de la secciones de los pasos 1 y 2 ( $^{\circ}C$ ).

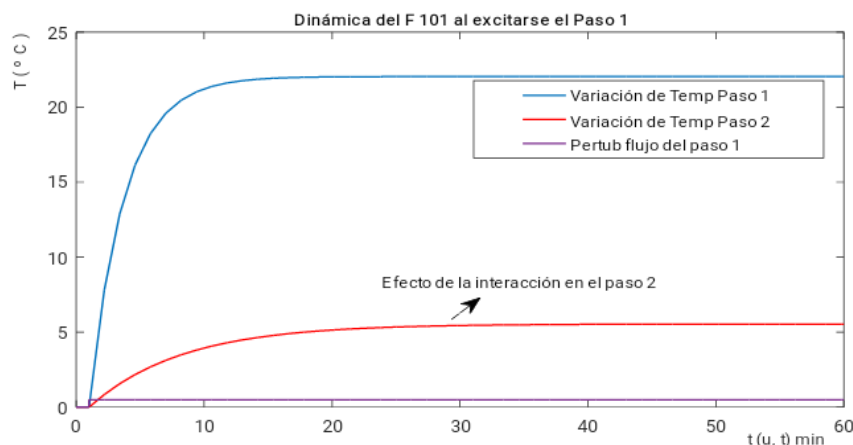
$W_{12}(s)$ ,  $W_{21}(s)$  Funciones transferentes entre las posiciones de válvula y las temperaturas de salida de los pasos opuestos (reflejo de las interacciones entre los pasos) ( $^{\circ}C/\%$ ).

Los parámetros fundamentales del horno se mantuvieron en un ambiente controlado. Fue excitado el flujo de combustible en cada uno de los pasos obteniéndose perfiles térmicos que sirvieron como base de para la identificación experimental del proceso. Para la determinación de los parámetros del modelo matemático se utilizó el software AIDEA (Arafet, Chang, & Dominguez, 1992) y fue comprobado en MATLAB empleando el algoritmo LDFIL descrito en (Aguado, 2000).

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1. Resultados de la identificación experimental del proceso.

La Figura 5 muestra el comportamiento dinámico del horno F101 al excitar el paso 1 con una variación en el flujo de combustible de  $0,1 m^3/h$ . Se aprecia que la temperatura del paso 1 incrementó en  $22^{\circ}C$  y el efecto multivariable sobre el paso 2 causó que la temperatura se incrementara por encima de los  $5^{\circ}C$ .





**IV Convención Científica Internacional UCLV 2023**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**"Identificación experimental de un horno tubular de precalentamiento para**  
**Futuros análisis de estrategias de control"**

Figura 5. Respuesta del Horno al excitar el paso 1 con una variación en el flujo de combustible. (Autores, 2023)

Asimismo, la Figura 6. muestra el comportamiento dinámico del horno F101, excitando el paso 2 con una variación en el flujo de combustible de 0,1 m<sup>3</sup>/h. La variación de temperatura en el paso 2 se incrementa en 60 °C y el efecto en el paso 1 hace que la temperatura incremente su valor de salida en 25 °C.

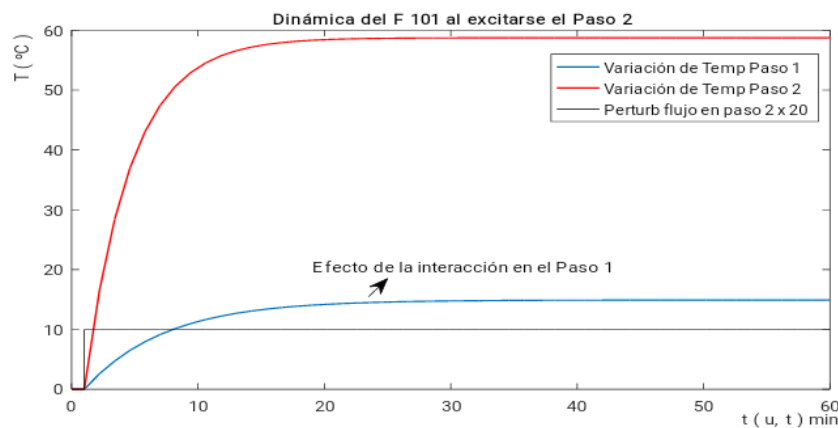


Figura 6. Respuesta del horno al excitar el paso 2 con una variación en el flujo de combustible. (Autores, 2023)

Se comprobó experimentalmente que, en los límites de las desviaciones pequeñas del régimen normal de funcionamiento, las funciones transferentes del sistema pueden ser vistas como elemento aperiódico de segundo orden con tiempo muerto o el equivalente de primer orden con retraso. En consecuencia, con lo planteado anteriormente, las funciones de transferencia del sistema, en especial la función que relaciona la temperatura de salida con el flujo de combustible puede ser aproximada como se expresa en la ecuación 1.

$$\frac{Y(S)}{U(S)} = \frac{k e^{TdS}}{(T_1S+1)(T_2S+1)} \quad (1)$$

El procedimiento de identificación experimental se aplicó en los dos pasos del horno obteniéndose diferentes juegos de mediciones, los cuales sirvieron de base para obtener el modelo matemático que representa el comportamiento dinámico del horno, con la ayuda del AIDEA (Arafet et al., 1992) y Matlab. Los resultados se muestran en el siguiente cuadro paramétrico, siendo la función de transferencia genérica la ecuación 2:



**IV Convención Científica Internacional UCLV 2023**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**"Identificación experimental de un horno tubular de precalentamiento para**  
**Futuros análisis de estrategias de control"**

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

Tabla 1. Valores de los parámetros del modelo general identificado, correspondiente a la ecuación 2.  
 (Autores, 2023)

Particularizando el sistema	k (%/%)	T (min.)	T <sub>1</sub> (min.)	T <sub>2</sub> (min.)	T <sub>d</sub> (min.)	Generalizando el Sistema
W <sub>T1</sub> (s)	8.037	1.500	1.250	2.730	3.540	W <sub>11</sub> (s)
W <sub>F1</sub> (s)	5.290	1.250	0.000	1.500	0.000	
W <sub>T2</sub> (s)	8.320	0.500	0.430	3.640	4.000	W <sub>22</sub> (s)
W <sub>F2</sub> (s)	14.110	0.430	0.000	0.500	0.000	
W <sub>21</sub> (s)	11.090	0.000	7.250	0.000	5.000	W <sub>21</sub> (s)
W <sub>12</sub> (s)	29.810	0.000	6.310	0.000	4.500	W <sub>12</sub> (s)

Un modelo análogo simplificado de primer orden considerando retraso de transporte se muestra en la Tabla 2, en correspondencia con la ecuación 3.

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

Tabla 2. Valores de los parámetros del modelo general identificado, correspondiente a la ecuación 3.  
 (Autores, 2023)

Sistema Generalizado	En forma de retrasos			En forma de polos y ceros		
	K (%/%)	T <sub>1</sub> (min.)	T <sub>d</sub> (min.)	k (%/%)	Polo a	Td (min.)
W <sub>11</sub> (s)	44.04	2.730	3.540	16.1318	0.3660	3.540
W <sub>22</sub> (s)	117.45	3.640	4.000	32.2664	0.2747	4.000
W <sub>21</sub> (s)	11.090	7.250	5.000	1.5296	0.1379	5.000
W <sub>12</sub> (s)	29.810	6.310	4.500	4.7242	0.1584	4.500

### 3.2. Representación del modelo matemático en variables de estado

Para un mejor análisis del sistema multivariable se parte de la función de transferencia generalizada expresada en forma de polos y ceros dada en la Tabla 2 y expresado en la ecuación 4. En este primer análisis no se tendrá en cuenta el aporte de los retrasos de



**IV Convención Científica Internacional UCLV 2023**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**"Identificación experimental de un horno tubular de precalentamiento para**  
**Futuros análisis de estrategias de control"**

transporte en cada uno de los estados, lo cual podrá ser considerado en posteriores simulaciones del sistema.

$$w(s) = \begin{bmatrix} \frac{16.1318}{s+0.3600} & \frac{4.7242}{s+0.1584} \\ \frac{1.5296}{s+0.1379} & \frac{32.2664}{s+0.2747} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Dado que el rango del sistema es cuatro. Este el número mínimo de integradores a utilizar en la representación del sistema mediante un diagrama de flujo de señales, para obtener de esa forma el modelo en el espacio de estado y la ecuación de salida del sistema.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (5)$$

$$y = Cx \quad (6)$$

Representando los valores numéricos de las matrices A, B y C, quedaría el modelo en el espacio de estado representado por las ecuaciones 7 y 8:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -0.366 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.1584 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.1379 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.2747 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} u \quad (7)$$

$$y = \begin{bmatrix} 16.1318 & 4.7242 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.5296 & 32.2664 \end{bmatrix} x \quad (8)$$

Donde:

x<sub>1</sub>: Temperatura del paso 1 (°C)

x<sub>2</sub>: Flujo fuel-oil paso 1 (m<sup>3</sup>/h)

x<sub>3</sub>: Flujo fuel-oil paso 2 (m<sup>3</sup>/h)

x<sub>4</sub>: Temperatura del paso 2 (°C)

Sobre la base del análisis de la característica estática y dinámica de los hornos tubulares de diversos tipos existentes en la industria se comprobó que:

- Los hornos tubulares tienen una inercia térmica grande.



**IV Convención Científica Internacional UCLV 2023**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**"Identificación experimental de un horno tubular de precalentamiento para**  
**Futuros análisis de estrategias de control"**

- Las perturbaciones que vienen de parte de la alimentación del hogar, las variaciones de la temperatura de los gases en el cuello del horno son más grandes y se producen con un retraso menor que las variaciones correspondientes a la temperatura a la salida.

A pesar de que el alcance de este trabajo no incluye el diseño de los algoritmos de control, éste formará parte del trabajo futuro de los autores. Por esta razón resulta relevante ilustrar el comportamiento de los lazos de control involucrados, su desempeño actual y posibilidades de mejora.

### 3.3. Comportamiento del proceso con la estructura de 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 (CUPET, 2012). A continuación, fueron sometidas sus entradas a perturbaciones en escalón con amplitud indicada en la gráfica, mostrándose el comportamiento dinámico dado en la Figura 7.

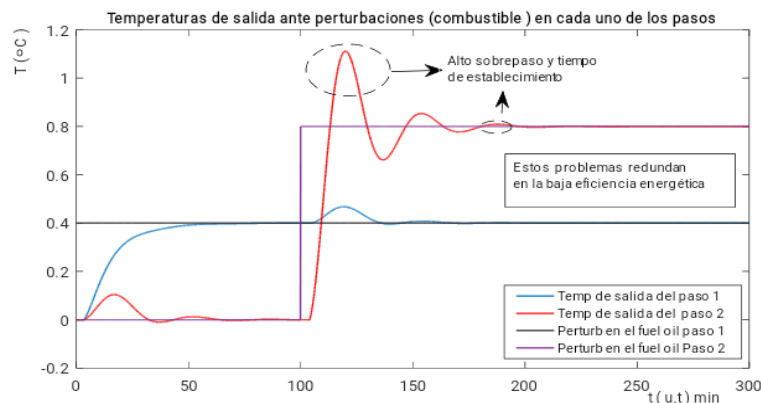


Figura 7. Comportamiento de la temperatura del horno en cada uno de los pasos, con un controlador PI ante una perturbación en escalón en la entrada de combustible.

Asimismo, 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 8. En las Figura 7 y 8 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.



IV Convención Científica Internacional UCLV 2023  
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas  
"Identificación experimental de un horno tubular de precalentamiento para  
Futuros análisis de estrategias de control"

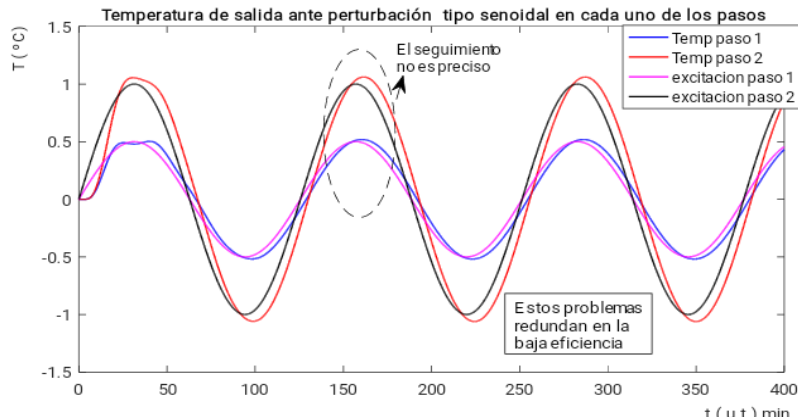


Figura 8. Comportamiento de la temperatura del horno en cada uno de los pasos, con un controlador PI ante una perturbación senoidal en la entrada de combustible.

Específicamente, en el paso 2 se aprecian un excesivo sobrepaso (superior al 40%) y un tiempo de establecimiento largo (superior a 90 min). Estas características, unidos a que el seguimiento mostrado en la Figura 8 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 garanticen los requerimientos de control y aumenten la eficiencia energética del horno.

#### 4. Conclusiones

Se obtuvo el modelo matemático del horno de calentamiento en funciones de transferencia y el espacio de estado por medio de identificación experimental. Los resultados de simulación y en el proceso real muestran la consistencia de los datos obtenidos. Sin embargo, el ajuste actual de los reguladores PI existentes en la planta muestra que estos algoritmos de control son susceptibles de mejora. Estos exhiben un comportamiento que redundan en alto consumo energético, con un sobrepaso superior al 40% y tiempo de establecimiento superior a 90 minutos.

#### 5. Referencias bibliográficas

- Aguado, B. A. (2000). *Temas de identificación y control adaptable*: Plaza de la Revolución, Cuba: Instituto de Cibernética, Matemática y Física.
- Arafet, P. P., Chang, M. F., & Dominguez, A. H. (1992). Programa de Ayuda a la Identificación Dinámica mediante Experimentos Activos. Memorias del V Congreso Latinoamericano de Control Automático. ISPJAM.
- Brendan, S. (1997). Robust Control Optimize Productivity in Refinery Operations, this Advanced controler offers yield maximizing. *Chemical Engineering*.



**IV Convención Científica Internacional UCLV 2023**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**"Identificación experimental de un horno tubular de precalentamiento para**  
**Futuros análisis de estrategias de control"**

- Cantero, A. N. E. (2021). *Ajuste de controladores en los lazos de control de combustible en los hornos de la Refinería de Cienfuegos S.A.* Universidad "Marta Abreu" de las Villas. Departamento de Control Automático. Trabajo en opción al título de Ingeniero en Automática. julio 2021.
- Carlborg, H., & Iredahl, H. (2016). *Modeling and temperature control of an industrial furnace.* (Master Thesis), Linköping University.
- Chaudhuri, U. R. (2016). *Fundamentals of petroleum and petrochemical engineering*: Crc Press.
- Chunsheng, W., Yan, Z., Zejun, L., & Fuxiang, Y. (2019). Heat transfer simulation and thermal efficiency analysis of new vertical heating furnace. *Case Studies in Thermal Engineering, 13*, 100414.
- CUPET. (2012). 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.
- Dequan, S., Guili, G., Zhiwei, G., & Peng, X. (2012). Application of expert fuzzy PID method for temperature control of heating furnace. *Procedia Engineering, 29*, 257-261.
- Domínguez, A. H., Peña, P. L., & Mulet, H. M. (2002). Simulación en tiempo real de una columna de destilación para la prueba de controladores programables. *Tecnología Química, 22(2)*, 27-31.
- Feliu-Battle, V., Rivas-Perez, R., & Castillo-García, F. (2021). Design of a PI $\alpha$  Controller for the Robust Control of the Steam Pressure in the Steam Drum of a Bagasse-Fired Boiler. *IEEE Access, 9*, 95123-95134. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3094306
- Garg, A., & Tangirala, A. K. (2014). Interaction assessment in multivariable control systems through causality analysis. *IFAC Proceedings Volumes, 47(1)*, 585-592.
- Gerov, R., Jovanovic, T. V., & Jovanovic, Z. (2021). Parameter estimation methods for the fopdt model, using the lambert w function. *Acta Polytechnica Hungarica, 18(9)*, 141-159.
- Góngora, D. M., Van Caneghem, J., Haeseldonckx, D., Leyva, E. G., Mendoza, M. R., & Dutta, A. (2020). Post-combustion artificial neural network modeling of nickel-producing multiple hearth furnace. *International Journal of Chemical Reactor Engineering, 18(7)*, 20190191.
- Hu, Y., Tan, C., Broughton, J., Roach, P. A., & Varga, L. (2017). Model-based multi-objective optimisation of reheating furnace operations using genetic algorithm. *Energy Procedia, 142*, 2143-2151.
- Hu, Y., Tan, C., Broughton, J., Roach, P. A., & Varga, L. (2018). Nonlinear dynamic simulation and control of large-scale reheating furnace operations using a zone method based model. *Applied Thermal Engineering, 135*, 41-53.
- Isidori, A. (1995). *Nonlinear Control Systems (3rd edition)*, Springer Verlag (1995), pp. 1-549. .
- Li, G., Ji, W., Wei, L., & Yi, Z. (2023). 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, 141*, 106572.
- Materán, S. M. (2018). 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, II(2)*, 72-105.
- Mazaira, M. I., & Lusson, C. A. (2000). *Regulación Linear Mediante Modelos Cercanos.* Paper presented at the IX Congreso Latinoamericano de Control Automático. CLCA, Colombia.
- Peña-Pupo, L., Martínez-García, H., García-Vílchez, E., Fariñas-Wong, E. Y., & Núñez-Álvarez, J. R. (2021). Combined method of flow-reduced dump load for frequency control of an autonomous micro-hydropower in ac microgrids. *Energies, 14(23)*, 8059.
- Peña Pupo, L., Fariñas Wong, E., Domínguez Abreu, H., & Fong Barrio, J. (2020). Ajuste del punto de operación de micro-turbinas hidráulicas a través del método de regulación de velocidad combinada. *Tecnología Química, 40(1)*, 150-168.
- Zhang, R., Cao, Z., Li, P., & Gao, F. (2014). Design and implementation of an improved linear quadratic regulation control for oxygen content in a coke furnace. *IET Control Theory and Applications, 8(14)*, 1303-1311. doi: 10.1049/iet-cta.2013.1023
- Zhang, R., Xue, A., & Gao, F. (2014). Temperature Control of Industrial Coke Furnace Using Novel State Space Model Predictive Control. *IEEE transactions on industrial informatics, 10(4)*, 2084-2092. doi: 10.1109/TII.2014.2350452