

## Modelación del proceso de postcombustión en un horno de reducción de níquel(\*)

M. Ramírez-Mendoza\*

**Resumen** En los hornos de hogares múltiples se llevan a cabo procesos multivariables muy complejos que solamente pueden modelarse con gran incertidumbre. En este artículo se hace un esbozo de los experimentos realizados en un horno industrial para la obtención de un modelo dinámico del proceso de postcombustión, para propósitos de diseño de sistemas de control automático. El desarrollo adecuado de este proceso debe influir, decisivamente, en el logro de un mayor rendimiento y de un perfil de temperatura óptimo en el equipo. Las pruebas de validación clásicas arrojaron excelentes resultados y el modelo obtenido representó satisfactoriamente el comportamiento del proceso, lo que posibilitó la simulación del sistema de control automático que se prevé utilizar para mantener la temperatura en los valores establecidos y disminuir la contaminación ambiental.

**Palabras clave** Reducción. Horno de hogares múltiples. Modelo matemático. Identificación de sistemas. Mineral laterítico. Postcombustión.

### Modeling of the post combustion process in a nickel reduction furnace

**Abstract** Very complex multivariable processes are carried out in multi-hearth furnaces which can only be modeled with great uncertainty. A sketch of the experiments carried out in an industrial roaster to obtain a dynamic model of the postcombustion process for automatic control design purposes is presented in this paper. The appropriate development of this process influences decisively in the achievement of a bigger efficiency and a good temperature profile. The classic validation tests produced excellent results and the model obtained represented the behavior of the process satisfactorily. This made possible the simulation of the automatic control system that will be used to maintain the temperature in the established values and to diminish the environmental contamination.

**Keywords** Reduction. Multi-hearth furnace. Mathematical modeling. System identification. Laterite ore. Postcombustion.

### 1. INTRODUCCIÓN

Durante el proceso de reducción de menas oxidadas de níquel, se pretende maximizar la transformación de este metal y del cobalto a estado de valencia cero, mientras se minimiza la reducción del hierro. Este proceso tiene lugar en un horno de hogares o soleras múltiples y constituye una de las etapas más importantes dentro de la tecnología carbonato-amoniaco para la obtención de níquel<sup>[1 y 2]</sup>, pues de ella depende la cantidad y calidad del producto final que se obtiene.

El trabajo experimental se desarrolló en uno de los hornos de la Fábrica de Nicaro, pionera en la

obtención de níquel en Cuba, los cuales se modernizaron en 1996.

La materia prima que alimenta a los 11 hornos de reducción es mineral laterítico, previamente secado y triturado, con las siguientes características:

- Humedad = 4-5 %
- Tamaño = 83-86 % con menos de 0,074 mm
- Níquel  $\geq 1,16$  %
- Cobalto = 0,08-0,1 %
- Hierro  $\geq 35$  %
- SiO<sub>2</sub>  $\leq 12$  %
- MgO  $\leq 8$  %
- C  $\geq 2$  %

(\*) Trabajo recibido el día 26 de abril de 2001 y aceptado en su forma final el día 15 de noviembre de 2001.

(\*) Facultad de Ingeniería Eléctrica Universidad de Oriente, Avda. de Las Américas s/n, Santiago de Cuba, 90900, Cuba. E-mail: mramirez@fie.uo.edu.cu

Las lateritas niquelíferas, extremadamente variables en su composición tanto química como mineralógica, están compuestas por una mezcla de óxidos de hierro (limonita) y silicatos de magnesio, que son de naturaleza serpentínica. El material suministrado posee, como fases mineralógicas fundamentales, las siguientes<sup>[3]</sup>:

- Goetita  $[\text{FeOAl}(\text{OH})_4]$
- Garnierita  $[(\text{Mg}, [\text{Ni}, \text{Fe}])_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$
- Hematita  $[\text{Fe}_2\text{O}_3]$
- Lizardita  $[(\text{Fe}, \text{Mg}, [\text{Ni}])_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_2]$
- Magnetita  $[\text{Fe}_3\text{O}_4]$

Esta composición influye directamente en los resultados de la reducción y en función de ella se establece el régimen de calentamiento. Los tecnólogos del proceso metalúrgico realizan considerables esfuerzos por minimizar la variabilidad de la composición química del material que se alimenta al horno, para mantener, así, los parámetros de operación sin saltos significativos.

Mantener el perfil de temperatura establecido y lograr una concentración de reductores adecuada dentro del horno constituyen dos aspectos fundamentales para elevar el rendimiento metalúrgico de dicho proceso, por lo que resulta necesario el control de la llamada postcombustión.

Se denomina postcombustión al proceso que ocurre como consecuencia de la inyección de aire secundario en el horno, con el objetivo de quemar los elementos reductores ( $\text{CO}$  y  $\text{H}_2$ ) en exceso. Esto resulta importante para la recuperación de energía y para el control de la composición de los gases de salida. Además, contribuye a preservar la integridad mecánica del horno. El calor desprendido por la combustión con aire secundario representa, aproximadamente, el 50 % del total generado.

El proceso de reducción es de gran complejidad, lo que hace difícil la obtención de un modelo matemático, utilizable para fines de control, basado en los fenómenos físicos, químicos y termodinámicos que ocurren.

Anteriormente, en este proceso se utilizaron varias estrategias de control automático, sin éxito, lo que se atribuyó al carácter no lineal del comportamiento de la temperatura frente al flujo de aire de postcombustión en estado estacionario.

Entre los antecedentes sobre los trabajos de automatización más importantes realizados en el proceso que se estudia se encuentran:

- La automatización instalada por la firma inglesa Kent Instruments Limited, en 1973<sup>[4]</sup>, basada en la regulación de la temperatura en los hogares 4, 10 y 15 con reguladores de acción Proporcional-Integral-Derivativa, PID, y que en el caso del hogar H-4, muy probablemente, no resultó adecuada debido a la presencia de la no-linealidad antes mencionada.
- La concepción del sistema de control *extremal* que trata de mantener la temperatura en el valor máximo planteada por Angulo<sup>[5]</sup>, que no tuvo éxito debido a que requería de la medición de la composición de los gases, tarea aún no resuelta adecuadamente debido a las características críticas que presenta la atmósfera en el interior del horno.
- La concepción de un regulador de polos asignados desarrollada por Selva<sup>[6]</sup>, que no arrojó buenos resultados ya que requería del empleo de un algoritmo de identificación en línea con elevados requerimientos de velocidad y memoria del ordenador de control, de lo que no se dispuso entonces.
- Después de la modernización realizada en la Fábrica en 1996, se instaló un sistema de automatización con instrumentos de la firma SIEMENS<sup>[7]</sup> que, para el control de la temperatura del hogar H-4, utilizó un regulador compacto PID que tampoco ofreció un comportamiento satisfactorio. Actualmente, el control del perfil de temperatura se encuentra en manos de un operador.

Ante esta problemática, el presente trabajo tiene como objetivo prioritario la obtención de un modelo dinámico mediante la aplicación de técnicas de identificación experimental, el cual se utilizará para simular el sistema de control automático del proceso de postcombustión que se prevé utilizar.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO TECNOLÓGICO

### 2.1. Descripción del reactor

El proceso de reducción tiene lugar en un horno de soleras múltiples tipo Herreshoff<sup>[2]</sup>, compuesto por 17 hogares numerados de arriba hacia abajo desde el 0 hasta el 16, encerrados en un cilindro metálico de 21,3 m de altura y 6,7 m de diámetro, revestido interiormente por material refractario (Fig. 1).

El mineral se introduce en el horno por el hogar 0, tras ser dosificado por un sistema de pesaje automatizado. Posteriormente, fluye a

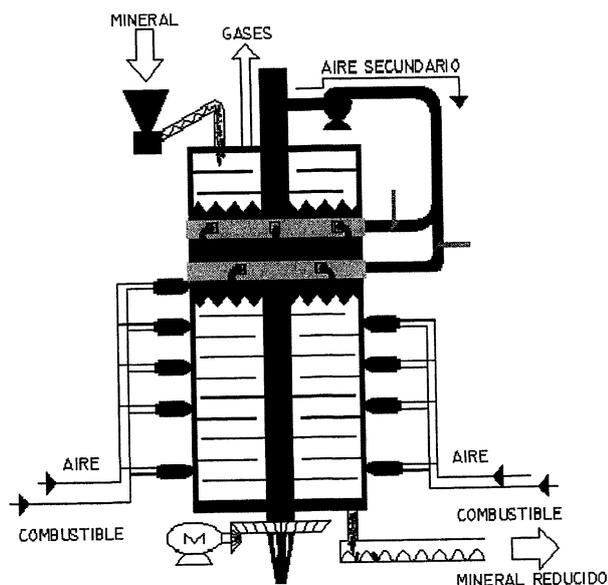
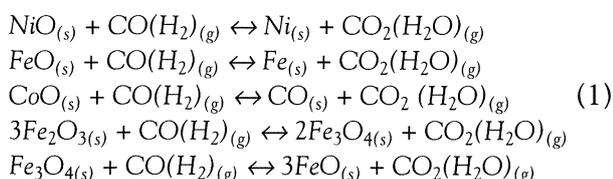


Figura 1. Horno de reducción.

Figure 1. Reduction furnace.

contracorriente con los gases reductores y, en su descenso, consecutivamente, se seca, calienta y reduce según las reacciones que se indican a continuación<sup>[1]</sup>:



La reducción se logra estableciendo condiciones, determinadas por un perfil de temperatura y una concentración de elementos reductores determinados. Con este fin, el horno posee 9 cámaras de combustión equipadas con quemadores, donde se realiza la oxidación incompleta del combustible (petróleo), ubicadas en los hogares 6, 8, 10, 12 y 15. Estas cámaras, además de generar calor, enriquecen la atmósfera reductora y en su interior ocurren reacciones que garantizan temperaturas de 1.350-1.420 °C.

La fuente fundamental de reductores (CO y H<sub>2</sub> como elementos mayoritarios) es el petróleo añadido al mineral, en proporción de 2-2,5 % en peso, mediante un dosificador en la banda transportadora que lo conduce desde la salida de los hornos de secado hasta los molinos, donde se realiza el mezclado; posteriormente, se envía a la planta de hornos de reducción. La adición de este petróleo permite una reducción uniforme con menor temperatura, menor tiempo de retención y una

concentración de reductores más baja en la fase gaseosa<sup>[1]</sup>.

Los hogares se encuentran separados por bóvedas de ladrillos refractarios y la comunicación entre éstos se realiza mediante aberturas existentes en las mismas, de tal forma que el mineral va recorriendo todo el interior del horno en forma de zigzag. En el caso de los hogares pares, cae por las aberturas que se encuentran en la periferia mientras que en los hogares impares lo hace por el centro, lo que favorece el contacto entre la fase sólida y la fase gaseosa.

El mineral es guiado en ese movimiento por un eje central rotatorio al que se acoplan cuatro brazos por hogar, los cuales están provistos de dientes orientados que son los encargados de remover y dirigir el material en su descenso. La velocidad de rotación de este eje es constante.

Por dicho eje circula aire para su refrigeración, que es succionado por el llamado ventilador de postcombustión, para enviarlo a través de un conducto a los hogares 4 y 6, para la combustión de los gases reductores que no han intervenido en las reacciones de reducción.

En los primeros hogares (H-0/H-4) el mineral sufre un proceso de deshidratación y calentamiento, le sigue una zona de transición (reducción parcial y disociación, H-5/H-9), mientras que la reducción fuerte comienza en H-10<sup>[8]</sup>.

Los gases que salen del horno arrastran consigo partículas de mineral en forma de polvo, de las cuales las más gruesas se recuperan mediante un ciclón, en tanto que las restantes partículas viajan con los gases a través de un conducto que va a una batería de precipitadores electrostáticos donde se recupera un 98 % del material sólido restante. El mineral recuperado por los ciclones cae por gravedad al horno a través del hogar 0, mientras que el recuperado por los electrofiltros se almacena en los silos de mineral. Una vez reducido el mineral, se descarga por el hogar 16 y se envía a un enfriador, mediante un transportador de tornillo sinfín.

El grado de reducción por las reacciones del proceso depende de un conjunto de variables y parámetros, cuya interacción en el proceso tecnológico determina los valores de la cantidad de níquel extraíble, como principal indicador de calidad de la marcha. Dentro de este conjunto se encuentra la temperatura, variable fundamental en los procesos pirometalúrgicos como éste y, en particular, la del hogar 4, que es donde alcanza el mayor valor, tanto respecto a los hogares superiores como en el horno en su conjunto.

## 2.2. Descripción del proceso de combustión con aire secundario en los hogares 4 y 6

En los hogares 4 y 6 del horno se suministra aire secundario con un doble propósito: el primero, de carácter económico, ya que los efectos exotérmicos de las reacciones de combustión de los agentes reductores producen una disminución del consumo de petróleo.

El segundo motivo es de carácter social y económico, ya que si estos gases se encuentran en concentraciones superiores a las permisibles (CO: 3,5 %; H<sub>2</sub>: 2,5 %), al ponerse en contacto con las chispas que se producen frecuentemente en los electrofiltros por efecto electromagnético, pueden producirse peligrosas explosiones. Por ello, cuando se detectan valores de la concentración por encima de los límites establecidos, se da salida a los gases directamente a la atmósfera con las consiguientes pérdidas por arrastre y la contaminación ambiental asociada.

Los fenómenos físico-químicos que tienen lugar en los hogares 4 y 6 son relativamente complicados si se tienen en cuenta, tanto los fenómenos de transferencia de calor que ocurren en los mismos como la naturaleza de los minerales portadores de níquel presentes en los distintos yacimientos utilizados. Un análisis de estos fenómenos aparece en la Tesis de Selva<sup>[5]</sup>.

Debido a que la cantidad de reductores puede variar de forma no controlada, la relación entre la temperatura de H-4 y la abertura de la válvula de regulación del aire a estado de régimen suele ser de la forma que se ilustra en la figura 2. El carácter no lineal de esta relación ha sido, indudablemente, una de las causas que han impedido el funcionamiento exitoso de los sistemas de control lineal clásico instalados para la regulación automática de la temperatura de dicho hogar. Actualmente, dicha regulación se realiza de forma manual.

## 3. OBTENCIÓN DE UN MODELO APROXIMADO DEL PROCESO MEDIANTE LA IDENTIFICACIÓN EXPERIMENTAL

Teniendo en cuenta que las variables de interés son aquellas que se pueden usar para el control, el sistema puede considerarse como una caja negra cuyas variables son:

Variables de entrada

FaH4 flujo de aire suministrado al hogar 4 (H4)

FaH6 flujo de aire suministrado al hogar 6 (H6)

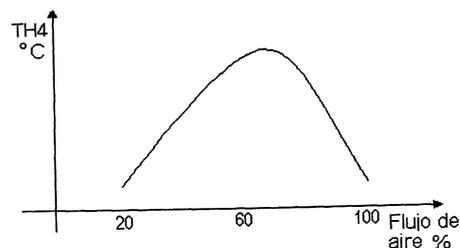


Figura 2. Relación entre la temperatura y el flujo de aire de H4 en estado estacionario.

Figure 2. Relation between the temperature and the air flow of H4 at stationary state.

Fp flujo de petróleo suministrado a las cámaras de combustión

Variables de salida

Fm flujo de mineral alimentado al horno

TH4 de los gases en el hogar 4

TH6 temperatura de los gases en el hogar 6

No es difícil adivinar que la obtención de un modelo matemático que describa el proceso desde el punto de vista fenomenológico sería extremadamente complicado, pues los procesos físico-químicos involucrados conducirían a sistemas de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, no lineales y variables en el tiempo<sup>[5 y 9]</sup>. Por ello, se optó por la identificación experimental<sup>[10]</sup> para obtener modelos empíricos aproximados para diferentes puntos de operación.

En este caso, para la modelación matemática formal de este subproceso, se utilizó un método de identificación experimental consistente en aplicar, como excitación al sistema, secuencias binarias pseudo-aleatorias (SBSA), las cuales tienen propiedades similares a las del ruido blanco.

Las señales aleatorias poseen, con respecto a otras, como el escalón, la ventaja de que su amplitud puede ser muy pequeña, reduciéndose por tanto el grado de perturbación que se introduce en la planta objeto de identificación. Por otra parte, estas señales pueden superponerse a los valores normales de la variable de entrada, independientemente de las variaciones de ésta, sin que se afecte sensiblemente al proceso de identificación<sup>[11]</sup>.

Las SBSA son señales periódicas, cuyas integrales de correlación se aproximan satisfactoriamente a la función Delta de Dirac y se codifican mediante secuencias de ceros y unos que satisfacen una ecuación de diferencias del tipo:

$$x(t) = a_m D^m x(t) (+) a_{m-1} D^{m-1} x(t) (+) \dots (+) a_1 D x(t) \quad (2)$$

donde:

$D$  : Operador de retardo, de manera que  $D^m x(t) = x(t-m)$

$(+)$  : Operador de suma módulo 2.

$x(t)$  : Variable binaria que asume valores 0 ó 1.

$a_i$  : Coeficientes binarios que asumen también valores 0 ó 1.

$m$  : Orden de la secuencia.

Las SBSA son secuencias periódicas con un período igual a:

$$N = 2^m - 1 \quad (3)$$

La utilización práctica de estas secuencias consiste en la asignación de dos valores de la variable de control; por ejemplo, posiciones de una válvula, que corresponden al 0 y al 1. Estos dos valores deben ser simétricos con respecto a la posición normal del elemento de control, de manera que el efecto neto o promedio de la perturbación introducida al final del experimento sea cero.

Para la recopilación de datos durante los experimentos realizados con el fin de identificar el proceso, se utilizó el sistema de supervisión y control EROS (sistema operativo de altas prestaciones sobre Windows), que permite la medición de todas las variables de interés para el estudio y análisis del subproceso de postcombustión.

Partiendo de las recomendaciones que aparecen en determinada bibliografía<sup>[11 y 12]</sup>, se diseñaron secuencias de orden 4 y de orden 5 y se realizaron numerosos experimentos, aplicando aquellas a la abertura de las válvulas reguladoras del flujo de aire a los hogares 4 y 6, al flujo de petróleo en las cámaras de combustión y al flujo de mineral. Se hicieron varias repeticiones con el propósito de lograr una longitud adecuada de la señal de entrada. Después, se tomaron los registros históricos correspondientes a las variables de interés para su procesamiento. Durante la recopilación de los datos se utilizaron períodos de muestreo de 3, 5 y 10 s.

Se planificaron excitaciones independientes en diferentes puntos de operación, siempre teniendo en cuenta que la producción se afectara lo menos posible. También se tuvo en cuenta que el subproceso que tiene lugar en el hogar 4 se encontrara en ambas zonas (zona de ganancia positiva y zona de ganancia negativa), tomando en consideración la medición de la concentración de monóxido de carbono en la chimenea.

Tras largas y continuas consultas con los tecnólogos expertos y observaciones durante períodos de operación normal, se seleccionaron las siguientes condiciones de operación durante los experimentos:

- Características del mineral alimentado
  - Ni: 1,16 - 1,22 %
  - Fe: 38 - 42 %
  - Co: 0,08 - 0,93 %
  - MgO: 3,0 - 4,4 %
  - SiO<sub>2</sub>: 8,2 - 10,5 %
  - Tamaño: 84,3 - 85,5 %; < 0,074
  - Flujo de mineral: 20-25 Mg/h (5,56 kg/s - 6,94 kg/s)
- Características del petróleo
  - Viscosidad a 100 °C: < 40 cs (0,039 Pa·s)
  - Valor Calórico Superior: > 41.013,046 kJ/kg

En este caso, los puntos de operación se tomaron para valores enteros del flujo de mineral comprendidos en el intervalo antes señalado.

Con respecto a los resultados de la reducción, en todos los casos el níquel extraíble alcanzó un valor superior al 80,5 %.

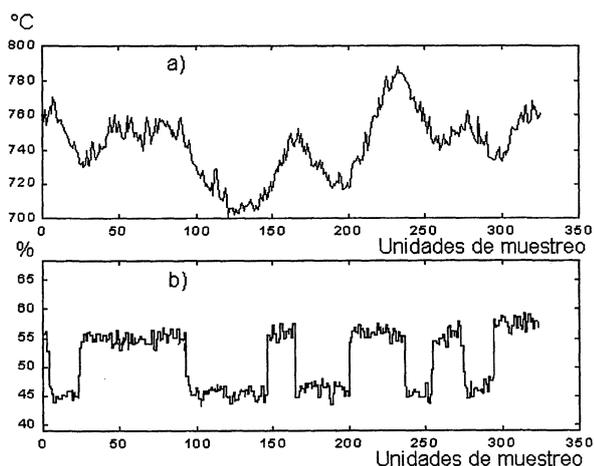
Puesto que en este contexto las señales se registran en forma discreta, inicialmente, se obtuvieron modelos de tipo discreto, con período de muestreo constante. Posteriormente, se realizó la conversión al sistema continuo equivalente. Para el procesamiento de los datos se utilizó el "Toolbox" de identificación de sistemas del paquete de programas MATLAB, el cual contiene herramientas para la obtención de modelos matemáticos de sistemas dinámicos basados en los datos entrada-salida observados.

En las figuras 3, 4, 5 y 6 se muestran las gráficas de las señales de entrada y salida de algunos de los experimentos realizados. Dos, de ellas, corresponden a la temperatura de H4 como variable de salida y las dos restantes a la temperatura de H6, en tanto que se tomaron indistintamente las cuatro variables de entrada analizadas.

Se determinaron modelos simple-entrada/simple-salida en el espacio de estado, a partir de la combinación de los comandos *n4sid* y *pem*<sup>[13]</sup> que, después, se transformaron en funciones de transferencia, que son más fáciles de asociar con la planta real.

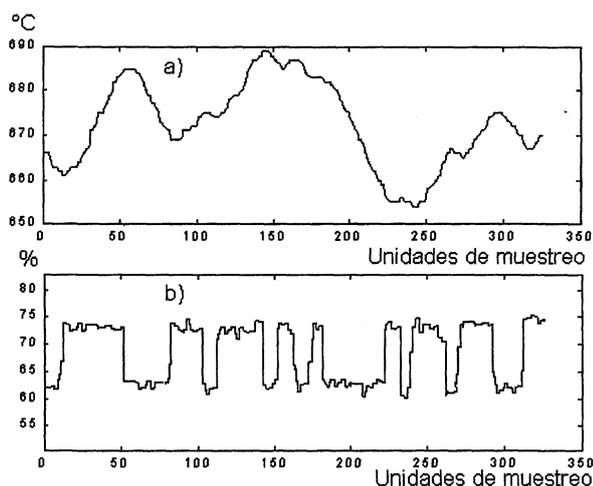
#### 4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Un ejemplo de los modelos obtenidos para un flujo de mineral de 22 Mg/h (6,11 kg/s) se ofrece a continuación:



**Figura 3.** Señales de entrada y salida para SBSA aplicada sobre el flujo de aire de H4. a) Temperatura de H4. b) Flujo de aire de H4.

Figure 3. Input and output signals for PRBS applied on the air flow of H4. a) Temperature of H4. b) Air flow of H4.



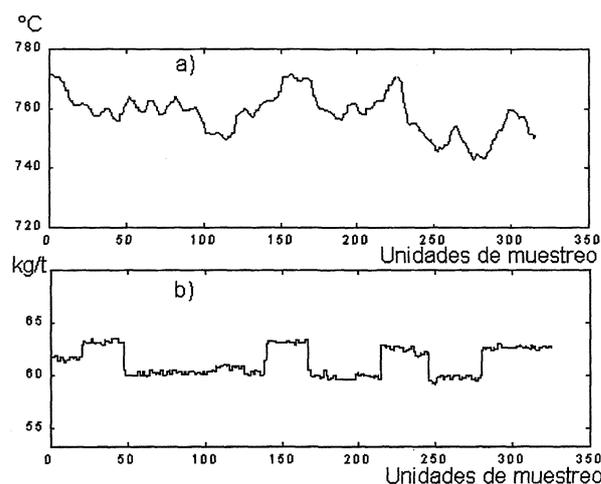
**Figura 4.** Señales de entrada y salida para SBSA aplicada sobre el flujo de aire de H6. a) Temperatura de H6. b) Flujo de aire de H6.

Figure 4. Input and output signals for PRBS applied on the air flow of H6. a) Temperature of H6. b) Air flow of H6.

$$\frac{TH4}{FaH4} = \frac{-0,0015 (s-0,79)}{(s+0,025)(s+0,019)} \quad (4)$$

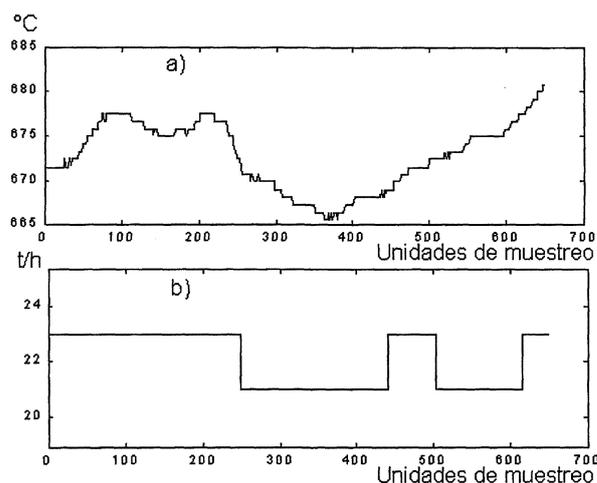
$$\frac{TH4}{FaH6} = \frac{-0,0074 (s+0,22)}{(s+0,05)(s+0,0028)} \quad (5)$$

$$\frac{TH4}{Fp} = \frac{0,041}{(s+0,013)} \quad (6)$$



**Figura 5.** Señales de entrada y salida para SBSA aplicada sobre el flujo de petróleo. a) Temperatura de H4. b) Flujo de petróleo a las cámaras.

Figure 5. Input and output signals for PRBS applied on the oil flow. a) Temperature of H4. b) Oil flow to chambers.



**Figura 6.** Señales de entrada y salida para SBSA aplicada sobre el flujo de mineral. a) Temperatura de H6. b) Flujo de mineral alimentado al horno.

Figure 6. Input and output signals for PRBS applied on the ore flow. a) Temperature of H6. b) Ore flow.

$$\frac{TH4}{Fm} = \frac{-0,084 e^{-360s}}{(s+0,002)} \quad (7)$$

$$\frac{TH6}{FaH4} = \frac{0,00018 (s-0,013)}{(s+0,018)(s+0,00014)} \quad (8)$$

$$\frac{TH6}{FaH6} = \frac{-0,0021 (s-0,63)}{(s+0,032)(s+0,0042)} \quad (9)$$

$$\frac{TH6}{Fp} = \frac{0,0098 (s+0,0042)}{(s^2+0,028 s+0,00036)} \quad (10)$$

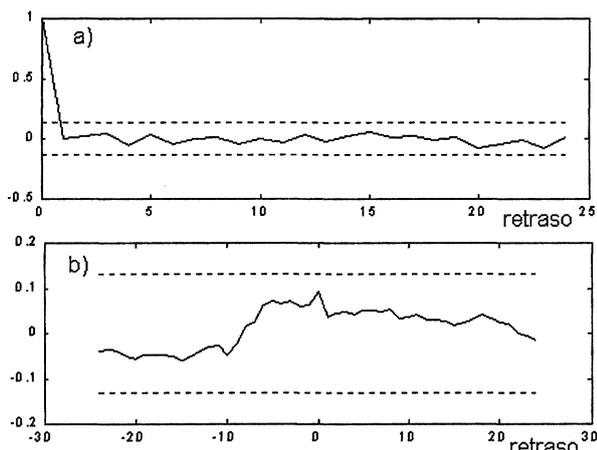
$$\frac{TH6}{Fm} = \frac{-0,0046 (s+0,019) e^{-420s}}{s^2+0,0021 s+0,00058} \quad (11)$$

donde,  $s$ , es el operador de Laplace,

En cada caso, los modelos estimados reflejaron la situación correspondiente de forma adecuada, lo que constituye una premisa importante para el diseño, donde es prácticamente imprescindible y extraordinariamente útil una fase de simulación, mucho más, cuando se pretende la introducción de sistemas novedosos o de elevado desempeño.

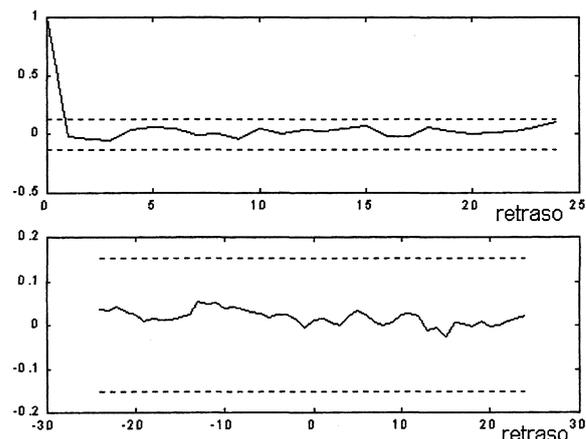
Con respecto a la validación del modelo se efectuó el análisis de los residuos (errores de predicción), teniendo en cuenta que se realizaron ciertas suposiciones en relación con el ruido<sup>[6]</sup>. Para el ejemplo escogido, parte de los resultados de esta prueba se muestran en las figuras 7 y 8. Arriba, puede observarse que los residuos constituyen una secuencia de ruido blanco, pues su función de correlación se encuentra dentro de los niveles de confianza de un 99 % y, abajo, aparece la función de correlación cruzada entre los residuos y la entrada, apreciándose su independencia, pues ésta no se sale de los intervalos de confianza.

Finalmente, en la figura 9 puede observarse la comparación de la salida del modelo con la salida



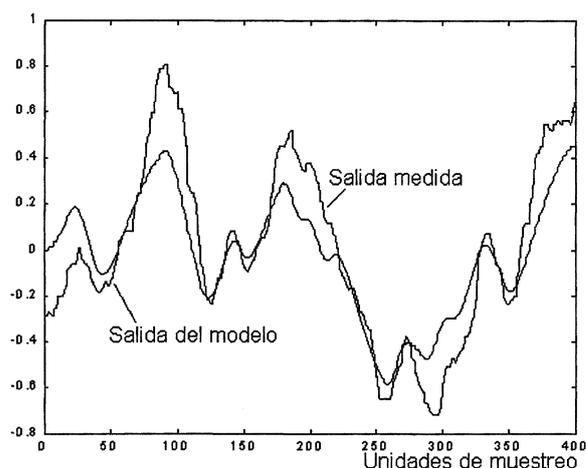
**Figura 7.** Prueba de residuos para el modelo estimado TH4 vs. FaH4. a) Autocorrelación de los residuos para la salida. b) Función de correlación cruzada entre la entrada y los residuos de la salida.

Figure 7. Residuals test for the estimate model TH4 vs. FaH4. a) Correlation function of residuals for the output. b) Cross correlation function between input and residuals from output.



**Figura 8.** Prueba de residuos para el modelo estimado TH6 vs. Fm. a) Autocorrelación de los residuos para la salida. b) Función de correlación cruzada entre la entrada y los residuos de la salida.

Figure 8. Residuals test for the estimate model TH6 vs. Fm. a) Correlation function of residuals for the output. b) Cross correlation function between input and residuals from output.



**Figura 9.** Salida medida menos salida del modelo simulado.

Figure 9. Measured minus simulated model output.

medida para el modelo TH4/FaH4. Para realizar la misma se utilizó una porción de los datos originales que no había sido empleada para construir el modelo (validación cruzada) y, como horizonte de predicción, se tomó infinito. Las cualidades del modelo obtenido se corresponden con las expectativas, o sea, su comportamiento se aproxima al del sistema real, exhibiendo cierto grado de imprecisión, lo que se observa en las curvas de la figura cuyo grado de ajuste fue 0,17. Este último dato constituye una medida de la diferencia entre la

salida estimada y la salida medida, considerando el ajuste cuadrático medio.

## 5. CONCLUSIONES

A pesar del gran esfuerzo realizado en la investigación de las reacciones gas-sólido que ocurren durante las operaciones de procesamiento de materiales, el conocimiento de lo que sucede en los reactores es, aún, esencialmente incompleto, particularmente, dentro del contexto de la reducción de lateritas, a la que está ligado el presente estudio. Un logro importante de este trabajo es la obtención del modelo aproximado del proceso de postcombustión sobre la base de la identificación experimental, para propósitos de diseño de sistemas de control. A pesar de que esta aproximación fue relativamente limitada, la identificación permitió, no sólo llegar a una descripción dinámica del proceso sino, también, a conocer en mayor profundidad el equipo para contribuir a un funcionamiento más eficaz.

## REFERENCIAS

- [1] J. CASTELLANOS, *Rev. Min. Geol.* 2 (1986) 77-80.
- [2] F. HABASHI, *Handbook of Extractive Metallurgy*, vol. II, Part Three, Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 1997, pp. 725-765.
- [3] L.J. MIRANDA, P.L. BLANCO y L.R. MARTÍNEZ, *Rev. Tecnol.* 1 (1999) 17-24.
- [4] Kent Instrument Ltd., *Transdata Book No. 1*, Nicaro, Oriente-Cuba, 1973
- [5] M. ANGULO, Tesis Doctoral, Facultad de Electrotécnica, ČVUT (Universidad Técnica Superior de Praga), 1982.
- [6] A. SELVA, Tesis Doctoral, Universidad de Oriente, Cuba, 1984.
- [7] *Proyecto de Modernización-Planta de Hornos de Reducción. Unión del Níquel*, Nicaro, Cuba, 1996, pp. 38-45.
- [8] A.R. CHANG, *Rev. Min. Geol.* XVI, 1 (1999) 76-82.
- [9] N.K. NATH, N. CHAKRABORTI and R. SHEKHAR, *Scand. J. Metall.* 27 (1998) 14-22.
- [10] L. LJUNG, *System Identification: Theory for the User*, Prentice-Hall, Inc., 1<sup>st</sup> Edition, New Jersey, EE. UU., 1987.
- [11] A. AGUADO, *Temas de Identificación y Control Adaptable*, Instituto de Cibernética, Matemática y Física, La Habana, Cuba, 2000, pp. 20-27.
- [12] L. LJUNG, *System Identification: Theory for the User*, Prentice-Hall, Inc., 2<sup>nd</sup> Edition, New Jersey, EE. UU., 1999, pp. 413-420.
- [13] L. LJUNG, *System Identification Toolbox for use with Matlab, User's Guide*, The Math Works Inc., 1997, pp. 4-65 a 4-67.