

IDENTIFICACIÓN EXPERIMENTAL DEL SUBPROCESO DE POSTCOMBUSTIÓN EN UN HORNO DE REDUCCIÓN DE NÍQUEL

EXPERIMENTAL IDENTIFICATION OF THE POSTCOMBUSTION PROCESS IN A NICKEL REDUCTION FURNACE

MERCEDES RAMÍREZ MENDOZA

E-mail: mramirez@fie.uo.edu.cu
Universidad de Oriente

RESUMEN: Se ha desarrollado un modelo matemático en el espacio de estado, que refleja de forma satisfactoria el comportamiento dinámico del subproceso de postcombustión de un horno de múltiples hogares destinado a la reducción de níquel mediante el esquema carbonato-amoniaco. Este modelo se utilizará para el diseño de un algoritmo de control de la temperatura del hogar 4, la cual influye decisivamente sobre la estabilidad del perfil de temperatura del horno. Se empleó como herramienta de cálculo el "Toolbox" de Identificación de Sistemas del programa MATLAB.

Para su obtención se realizaron varios experimentos en diferentes puntos de operación del proceso, atendiendo al carácter no lineal del mismo.

Palabras clave: Modelación matemática, reducción, mineral laterítico, identificación de sistemas, modelos en el espacio de estado.

ABSTRACT: A mathematical model in the state space, which reflects in a satisfactory way the dynamic behavior of the secondary combustion subprocess of a multiple hearth furnace dedicated to the nickel reduction by means of the ammoniacal leaching process, has been developed. This model will be used for the design of a control algorithm of the temperature of the hearth 4, which influences decisively over the stability of the temperature profile of the roaster. The System Identification Toolbox of the MATLAB program was used as calculation tool.

To find the model several experiments were carried out in different process operation points taking into account the non-linear character of it.

Key words: Mathematical modeling, reduction, laterite ore, system identification, state space models.

INTRODUCCIÓN

En el proceso Caron para la obtención de níquel a partir del mineral laterítico, uno de los equipos más importantes es el horno de reducción (Castellanos, 1986), el cual se destina a la reducción selectiva de los óxidos de níquel y cobalto a sus correspondientes formas metálicas, que los hace aptos para la lixiviación carbonato-amoniaco.

Esta tecnología resulta adecuada para procesar minerales serpentínicos y lateríticos, pero durante la reducción se producen pérdidas notables debido a la formación de estructuras cristalinas de espinelas de hierro, olivinos y piroxenos que atrapan al níquel y al cobalto en forma de óxidos y en menor grado en estado metálico, y a la aparición de altos contenidos de hierro metálico en el mineral reducido, lo que trae como consecuencia que disminuya la extracción de níquel y cobalto en el proceso de lixiviación. (Miranda y otros, 1998). Estas pérdidas se incrementan cuando se viola el perfil de temperatura y/o el perfil gaseoso dentro del horno, de ahí la importancia del control de la temperatura en el mismo.

El proceso tecnológico de reducción del níquel es un proceso muy complejo, cuya dinámica no lineal, distribuida y variable en el tiempo hace difícil la obtención por la vía físico-química, de un modelo matemático preciso, utilizable para fines de control. El presente trabajo tiene como objetivo la obtención de un modelo dinámico mediante la aplicación de técnicas de identificación experimental, el cual se utilizará en el diseño de un algoritmo de control automático para el subproceso de postcombustión que ocurre en el horno de reducción. El control de la postcombustión está vinculado directamente con el control de la temperatura del hogar 4, lo que es de primordial importancia para el logro de una mayor eficiencia en el funcionamiento del horno y para la disminución de la contaminación ambiental.

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO TECNOLÓGICO

El proceso de reducción tiene lugar en un horno de soleras múltiples tipo Herreshoff (Habashi, 1997), compuesto por 17 hogares numerados de arriba hacia abajo desde el 0 hasta el 16; el mismo consiste en un cilindro metálico de 21,3 m de altura y 6,7 m de diámetro que

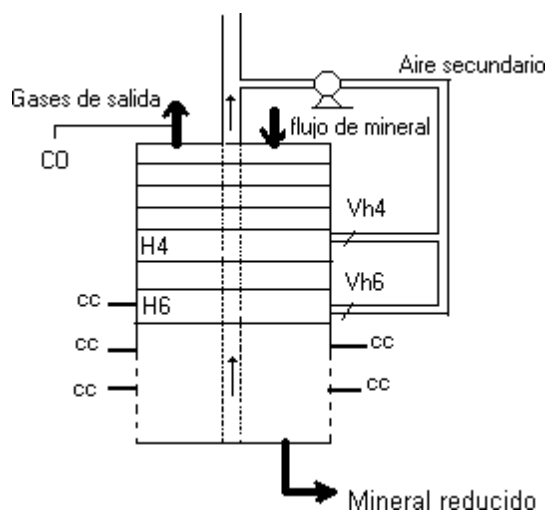


Figura 1. Diagrama esquemático del horno de reducción.

está cubierto interiormente por material refractario (Fig. 1). El mineral se introduce al horno por el hogar 0, luego de ser pesado en una romana en la cual se ajusta el tonelaje fijado para la operación.

Los hogares se encuentran separados por bóvedas de ladrillos refractarios y la comunicación entre ellos se realiza mediante aberturas existentes en las mismas, de forma tal que el mineral va recorriendo todo el interior del horno en forma de zigzag; en el caso de los hogares pares lo hace por las aberturas que se encuentran en la periferia, y en los hogares impares 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 rotatorio que atraviesa interiormente el perfil longitudinal del horno, unido a él se encuentran cuatro brazos por cada hogar, los cuales están provistos de dientes que van removiendo toda la cama del mineral establecido en el hogar, guiándolo hacia el hogar inferior. Por dicho eje circula aire, 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 secundaria que allí ocurre. De esa forma se aprovecha el calor que se transfiere de las paredes del eje al aire y dicho eje se protege de la aparición de fisuras o grietas debido al excesivo calor.

La fuente fundamental de elementos reductores (CO y H_2 como elementos mayoritarios), es el petróleo aditivo, el cual se mezcla con el mineral antes de ser suministrado al horno; de esta forma es posible obtener una reducción uniforme, con menor temperatura, tiempo de retención y concentración de gases reductores.

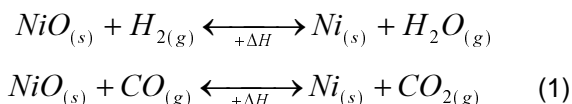
El horno posee 9 cámaras de combustión con quemadores de alta presión (de Tecnología PRIOR), para la combustión incompleta del petróleo, las cuales además de generar calor para lograr el perfil de temperatura, enriquecen la atmósfera reductora. Dichas cámaras están situadas en forma transversal en la parte norte y sur del horno en los hogares 8, 10, 12 y 15, en tanto que en el hogar 6 sólo hay una ubicada en el lado norte. El hor-

no trabaja con una ligera presión positiva para evitar la entrada de aire que reoxidaría al mineral, lo que se logra manteniendo determinada diferencia de presión entre los hogares 0 y 16.

En los primeros hogares el mineral sufre un proceso de calentamiento y deshidratación (H-0/H-4), le sigue una zona de transición (Reducción Parcial + Disociación, H-5/H-9), mientras que la reducción fuerte comienza en H-10 (Chang, 1999).

Los gases que salen del horno arrastran consigo partículas de mineral en forma de polvo, de las cuales las más gruesas se recuperan por 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, éste es descargado por el hogar 16 y enviado a un enfriador a través de un transportador de tornillo sin fin.

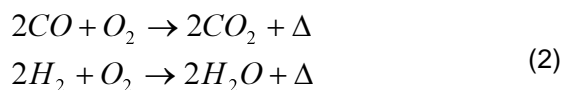
Durante la reducción del mineral tienen lugar gran cantidad de reacciones químicas reversibles; las más importantes son las reacciones de reducción con hidrógeno y monóxido de carbono en estado gaseoso que se muestran mediante las ecuaciones siguientes:



Estas reacciones dependen de un conjunto de variables y parámetros cuya interacción en el proceso tecnológico determina los valores de la cantidad de níquel extractable como principal indicador de calidad (Tavío, 1999). 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 se alcanza la mayor temperatura de los hogares superiores y del horno en su conjunto.

Descripción del subproceso de combustión con aire secundario en el hogar 4

En este hogar se suministra aire secundario con un doble propósito; el primero de carácter económico, ya que:



Como puede verse se producen reacciones exotérmicas, y se liberan calorías las cuales se utilizan en el calentamiento de los hogares superiores (4, 3, 2, 1, 0).

El segundo motivo es de carácter social y económico, pues al ponerse en contacto estos gases con las chispas que se producen frecuentemente en los electrofiltros por efecto electromagnético se pueden producir explosiones, de manera que cuando se detectan valores de la concentración por encima de los límites permisibles, se les

da salida a los gases directamente a la atmósfera con las consiguientes pérdidas por arrastre y la contaminación ambiental asociada. A través de la combustión que tiene lugar en H4 y H6 deben quemarse los reductores en exceso, para evitar así la situación anterior.

Los fenómenos físico-químicos que tienen lugar en el hogar 4 son relativamente complicados, si tenemos en cuenta los fenómenos de transferencia de calor que ocurren en el mismo así como cierto grado de reducción de mineral. Angulo (1982) ofrece un análisis de estos fenómenos.

Debido a que la cantidad de reductores puede variar de forma no controlada, la relación entre la temperatura de este hogar 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; esta característica estática ha impedido el funcionamiento exitoso de los reguladores PID instalados para el control automático de la temperatura de dicho hogar.

Al analizar este comportamiento, notamos que si se opera en la zona dada por la abertura de la válvula entre el 50 y el 70 % el sistema tiene ganancia positiva y si se opera de 70 a 100 % tiene ganancia negativa.

OBTENCIÓN DE UN MODELO APROXIMADO DEL PROCESO MEDIANTE LA IDENTIFICACIÓN EXPERIMENTAL

No es difícil darse cuenta de que la obtención de un modelo matemático que describa el proceso desde el punto de vista fenomenológico sería en extremo complicada, pues los procesos físico-químicos involucrados conducirían a sistemas de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, consecuentemente no lineales y variables en el tiempo, por ello optamos por la identificación experimental para obtener modelos aproximados para diferentes puntos de operación (Nath *et al.*, 1998; Torres, 1999).

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 señales binarias pseudoaleatorias SBPA, las cuales constituyen una aproximación al ruido blanco, con características especiales. Las SBPA son secuencias periódicas que se codifican mediante ceros y unos, y que tienen un período igual a: $N = 2m - 1$, donde m es el orden de la secuencia.

Aguado (1995) ofrece detalles prácticos sobre la utilización de este tipo de señal.

El trabajo experimental se desarrolló en el horno 13 de la planta de Hornos de Reducción de la empresa niquelífera Comandante René Ramos Latour, de Nicaro.

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), el cual permite la medición de todas las variables de interés para el estudio y análisis del subproceso de postcombustión.

Se realizaron varios experimentos, aplicando secuencias de orden 5 a la abertura de las válvulas reguladoras

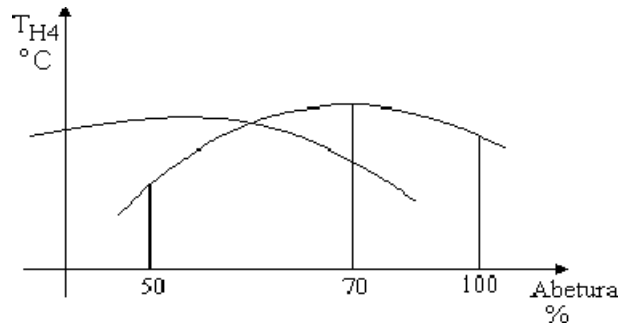


Figura 2. Relación entre abertura de válvula y temperatura en H4 a estado de régimen.

del flujo de aire a los hogares 4 y 6, haciendo varias réplicas con el propósito de lograr una longitud adecuada de la señal de entrada y se tomaron los registros históricos correspondientes a las variables siguientes: temperatura de los hogares 4 y 6 (Th4 y Th6), y flujo de aire secundario (Fa). El tiempo elemental escogido fue de 30 segundos atendiendo a las constantes de tiempo previamente estimadas mediante respuesta a escalón y el período de muestreo fue de 3 s.

Puesto que en este contexto las señales se registran en forma discreta, al inicio se obtuvieron modelos de tipo discreto, con período de muestreo constante. Por otro lado, teniendo en cuenta que para la solución de los problemas tratados por la teoría de control en la contemporaneidad —y en general por la llamada teoría de los sistemas— es ya práctica corriente la de representar matemáticamente la dinámica de los sistemas en el llamado espacio de estado, el sistema examinado se describió mediante ecuaciones diferenciales de primer orden en forma vectorial-matricial que, para el caso lineal, responden a una descripción usual como la siguiente:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(t)x(t) + B(t)u(t) \\ y(t) &= C(t)x(t) + D(t)u(t) \end{aligned} \tag{3}$$

donde:

- $\dot{x}(t)$: vector de estado
- $u(t)$: vector de excitaciones
- $y(t)$: vector de salida
- $A(t)$: matriz del sistema
- $B(t)$: matriz de excitación
- $C(t), D(t)$: matrices de salida

Esta representación se logró luego de convertir los modelos discretos obtenidos inicialmente a su equivalente continuo, ya que durante el proceso de experimentación realizado las variables cambian su valor sólo en intervalos discretos de tiempo. En tales casos, el tiempo, en lugar de recorrer valores dentro del conjunto de números reales, lo hace en el conjunto de los naturales y se simboliza con k , suele entonces escribirse el modelo

como:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= f[x(k), u(k), k] \\ y(k) &= g[x(k), u(k)] \end{aligned} \quad (4)$$

Tales sistemas se describen mediante ecuaciones de diferencia finitas.

En particular la estructura mencionada se aplicó para simple entrada simple salida (SISO), considerando como variables de entrada y salida las relacionadas con anterioridad. Evidentemente, esta estructura de modelo es del tipo caja negra. En cada caso se determinó el modelo que relaciona el cambio en la temperatura de H4 y en la temperatura de H6 con el cambio en el flujo de aire del hogar donde se aplicó la secuencia, atendiendo al carácter multivariable del sistema completo en el que debe considerarse la interacción entre las variables.

Las consultas realizadas a los tecnólogos expertos y las observaciones durante períodos de operación normal permitieron seleccionar las condiciones de operación durante los experimentos siguientes:

Composición química del mineral	Características del petróleo
Ni: 1,15-1,3 %	Viscosidad a 100 °C. menor de 40 cs
Fe: 38-42 %	Valor Calórico Superior: mayor que 9 795,33 kcal/kg
Co: 0,08-0,1 %	
MgO: menor 8 %	
SiO: menor 12 %	
Flujo de mineral 20 - 25 t/h	
Fineza media: 0,074 mm	

Para obtener el modelo de la planta utilizamos el "Toolbox" de Identificación del paquete profesional de programas MATLAB (versión 5.0), el cual contiene herramientas para la obtención de modelos matemáticos de sistemas dinámicos basados en los datos entrada-salida observados. El basamento teórico de los métodos aplicados puede encontrarse en Ljung (1987).

Ya en el ambiente del programa MATLAB se siguieron los pasos siguientes para procesar los datos de cada experimento: se cargaron los datos de las mediciones en 900 instantes, tomados a intervalos de 3 segundos, correspondientes a la variable de entrada *u*, Flujo de aire secundario (Fa) y salida *y*, temperatura del hogar 4 (Th4) en un caso y temperatura del hogar 6 (Th6) en el otro caso; pero seleccionando para su ulterior procesamiento sólo los primeros 500 valores. Estos datos se compactaron en una única matriz *z*. En la figura 3 se muestra un ejemplo de los gráficos temporales obtenidos en uno de

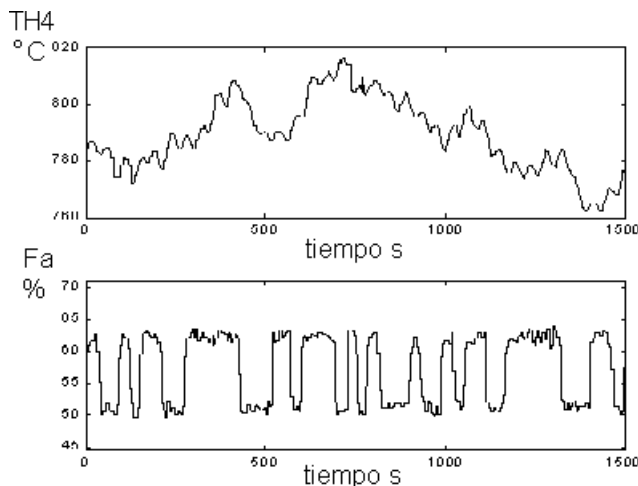


Figura 3. Ejemplo de la respuesta temporal obtenida durante un experimento.

los experimentos. En la parte superior se muestra el transcurso de la variable de salida (Th4) y en la parte inferior aparece la SBPA aplicada sobre el flujo de aire (Fa).

Tras un análisis preliminar de los datos, el paso siguiente consistió en suprimir los niveles constantes y hacer que la media de los datos fuera cero por medio del comando *dtren*. A continuación se aplicó el comando *n4sid*, destinado a la obtención de modelos en el espacio de estado por el método de los subespacios y tras la realización de algunos ajustes en sus parámetros, se obtuvo el modelo, originalmente expresado en la llamada estructura THETA, propia de este "Toolbox". En todos los casos el mejor modelo estimado fue de 2do. orden. Seguidamente, se calculó un estimado del error de predicción con el comando *pem*.

Un ejemplo de las matrices resultantes del procesamiento de los datos de un experimento realizado en la zona de ganancia positiva se ofrece a continuación, luego de la conversión del modelo discreto a continuo mediante el comando *d2c*.

Para Th4

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} -0,3536 & 0,3542 \\ -0,3131 & 0,3125 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} -0,0534 \\ 0,0406 \end{bmatrix} \\ C &= [0,06376 \quad -0,02213], D = [0,00334] \end{aligned}$$

Para Th6

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} -0,3517 & 0,3519 \\ -0,3150 & 0,3148 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} -0,0509 \\ 0,0480 \end{bmatrix} \\ C &= [0,0636 \quad -0,0220], D = [0,00318] \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta que el modelo viene con un estimado de su propia incertidumbre, con el comando *step* se calcularon y graficaron 10 respuestas diferentes correspondientes a posibles modelos derivados de la distribución del sistema real. También se obtuvo la respuesta frecuencial con el comando *bodeplot*, de esta forma se pudo realizar un estimado del espectro de ruido del modelo.

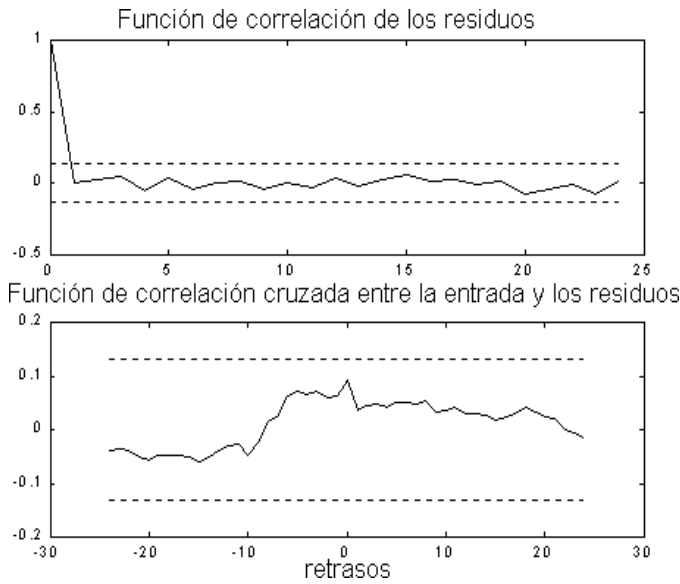


Figura 4. Prueba de residuos para el modelo estimado de Th4.

Por último se validó el modelo, para lo cual realizamos el análisis de los residuos (errores de predicción) teniendo en cuenta que se realizaron ciertas suposiciones con respecto al ruido (Ljung & Guo, 1997).

Para el ejemplo escogido, el resultado de esta prueba se muestra en las figuras 4 y 5; en la parte superior de las mismas puede observarse que los residuos constituyen una secuencia de ruido blanco, pues su función de correlación se encuentra dentro de los niveles de confianza del 99 % y, a continuación, aparece la función de correlación cruzada entre los residuos y la entrada donde se aprecia su independencia pues ésta no se sale de los intervalos de confiabilidad.

Finalmente, en la figura 6, puede observarse la comparación de la salida del modelo con la salida medida para un horizonte de predicción ∞ . Para ello, se tomó una parte de los datos originales que no fueron empleados para construir el modelo y se empleó el comando *com-*

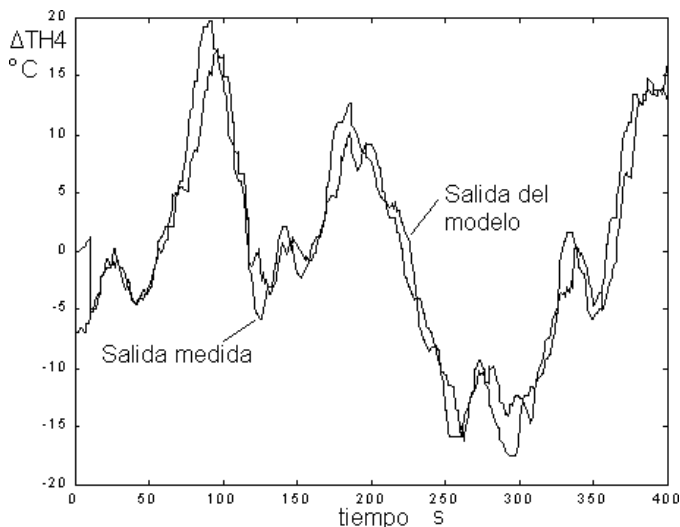


Figura 6. Comparación del modelo con el sistema real.

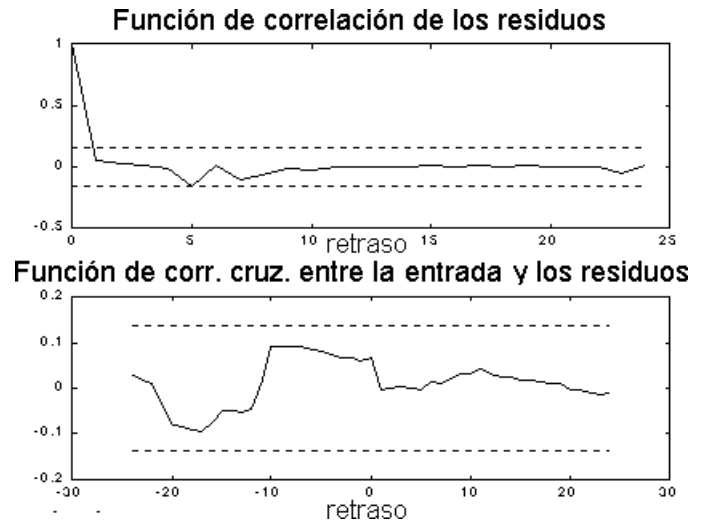


Figura 5. Prueba de residuos para el modelo estimado de Th6.

pare. Las cualidades del modelo obtenido se corresponden con nuestras expectativas, o sea, su comportamiento se aproxima al del sistema real, y exhibe cierto grado de imprecisión, lo que se observa tanto en la figura, como en las desviaciones estándar.

En la Tabla 1 se ofrecen datos de interés de experimentos realizados, como son:

- Flujo de mineral suministrado al horno.
- Variable manipulada: Flujo de aire al hogar 4 (FaH4), flujo de aire al hogar 6 (FaH6).
- Valores entre los cuales se movió la variable manipulada en la secuencia aplicada.
- Cantidad de réplicas de la secuencia que se hicieron.
- Cantidad de muestras recopiladas durante el experimento.
- Carbón en el mineral alimentado promedio en el período del experimento.
- % de níquel extractable obtenido por la planta.
- Zona en que se encontraba el horno, atendiendo a la característica estática de la figura 2.
- Ajuste cuadrático medio del modelo ofrecido por el comando *compare*, el cual se calcula dividiendo la norma de la diferencia entre la salida del modelo y la salida real entre la raíz cuadrada de la cantidad de muestras utilizadas en la comparación.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Como se planteó antes se realizaron varios experimentos para diferentes condiciones de operación, entre las cuales 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) y considerando valores de flujo de mineral comprendidos entre 20 t/h y 25 t/h, que es el rango en que operan los hornos normalmente.

El análisis de los modelos obtenidos arrojó que, en la medida que aumenta el tonelaje el sistema tiende a ser

TABLA 1. RESUMEN DE LOS EXPERIMENTOS REALIZADOS

No. Experimento	Flujo de mineral [t / h]	Variable manipulada	Niveles de la sec. [%]	Número de réplicas	Número de muestras	CMA	Níquel extractable [%]	Zona de ganancia	Ajuste del modelo
1	20	FaH4	40 - 50	2	620	2,22	78,0	Positiva	1,42
2	22	FaH4	50 - 60	3	930	3,6	80,0	Positiva	0,72
3	22	FaH4	50 - 60	3	930	1,8	79,5	Negativa	5,33
4	23	FaH4	55 - 65	2	620	2,36	78,4	Positiva	3,94
5	24	FaH4	60 - 75	3	930	1,67	79,6	Negativa	6,1
6	25	FaH4	65 - 75	3	930	4,39	78,3	Positiva	5,27
7	22	FaH6	58 - 72	2	620	2,12	78,2	Positiva	4,6
8	23	FaH6	60 - 75	3	900	2,18	80,1	Negativa	3,04
9	25	FaH6	62 - 74	3	930	2,93	79,02	Positiva	2,25

inestable y que la operación en la zona de ganancia negativa es indeseable debido a la tendencia a la inestabilidad que se pone de manifiesto.

Se observó que los residuos son completamente pequeños comparados con los niveles de las variables de salida y que son, de forma razonable, no correlacionados con la entrada y entre ellos.

Con el objetivo de verificar la utilidad de los modelos para los fines previstos se realizaron ensayos donde se aplicaron señales de tipo escalón al modelo y se compararon las respuestas con las obtenidas en el horno, aplicando señales similares; para ello se tuvo en cuenta que las condiciones de operación fueran parecidas a aquéllas bajo las cuales se realizó la identificación; también se determinó la incertidumbre de los mismos y, a partir de estos resultados, se seleccionó el más adecuado en cada caso. Con este estudio se pudo determinar, además, el grado de influencia de las variables de entrada sobre las de salida (variables para controlar).

En todos los casos 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 y de elevado desempeño.

CONCLUSIONES

A pesar del significativo esfuerzo realizado en la investigación de las reacciones gas-sólido que ocurren durante las operaciones de procesamiento de materiales, el conocimiento de tales reactores es aún esencialmente incompleto, en particular dentro del contexto de la reducción de lateritas, a la cual está ligado el presente estudio con el que se alcanzaron los resultados siguientes:

- Se caracterizó el proceso objeto de control, y se determinaron las principales variables a partir de su análisis como objeto de regulación automática, resultando un sistema multivariable.
- Se obtuvo un modelo aproximado del subproceso de postcombustión sobre la base de la identificación experimental. A pesar de lo relativamente grueso de esta aproximación, la identificación permitió no sólo llegar a una descripción dinámica del proceso, sino también

conocer mejor el equipo para contribuir a su funcionamiento más eficiente.

- Se realizó la validación del modelo matemático por técnicas clásicas; se efectuó la comparación de datos experimentales obtenidos del proceso real con los datos arrojados por el modelo, y se demostró la adecuación del modelo al objeto de estudio.

AGRADECIMIENTOS

La autora desea expresar su agradecimiento a la ingeniera Georgina Tavío del Departamento de Investigación y Desarrollo de la Empresa Comandante René Ramos Latour, y a los compañeros del Grupo EROS, por la colaboración prestada durante la realización de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- AGUADO, A.: "Identificación y control de procesos industriales", IX International Congress on Research in Electrical Sciences, Torreón Coahuila, México, 1995.
- ANGULO, M.: "Control externo de la temperatura en el hogar 4 de un horno reducción de níquel", Tesis doctoral, Universidad Técnica de Praga, Checoslovaquia, 1982.
- CASTELLANOS, J.: "Elaboración de minerales oxidados de níquel por el esquema carbonato-amoniaco", *Minería y Geología* 4 (2):77-80, 1986.
- CHANG, A. R.: "Una visión sobre las reservas estratégicas de eficiencia metalúrgica en la tecnología carbonato-amoniaco", *Minería y Geología* 16 (1):76-82, 1999.
- EROS, "Manual de operación", Grupo EROS, Nicaro, Holguín, 1997.
- HABASHI, F.: *Handbook of Extractive Metallurgy*, Wiley-VCH, Weinheim, vol. II, Part. III, Germany, 1997.
- LJUNG, L.: *System Identification: Theory for the User*, 1st. Edition, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1987.
- LJUNG, L. & L. GUO: "The Role of Model Validation for Assessing the Size of the Unmodeled Dynamics", *IEEE Transactions on Automatic Control*, 42 (9): 1230-1239, 1997.
- MIRANDA, J., L. CHAVIANO Y J. R. MIRANDA: "Nuevas interpretaciones químico-mineralógicas de las menas lateríticas y serpentínicas a través del proceso pirometalúrgico en la tecnología carbonato-amoniaco", Informe de Investigación, CIL, Moa, 1998.
- NATH, N. K., N. CHAKRABORTI and R. SHEKHAR: "Reduction of Indian nickeliferous ore in a fixed bed reactor with gas flowing vertically through the bed", *Scandinavian Journal of Metallurgy (Sweden)* 27:14-22, 1998.
- TAVÍO, G.: "Optimización de la reducción de níquel en los hornos de reducción equipados con cámaras PRIOR", XVI Conferencia de Química, Santiago de Cuba, diciembre 1999.
- TORRES, G.: "Modelación matemática para predecir el comportamiento del extractable de níquel en los Hornos de Reducción", Tesis de Maestría, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, 1999.