

# Adquisición de datos para el análisis y síntesis en Ingeniería de Control: Modelaje y Diseño de un controlador digital para un horno rotatorio

## Resumen

Este artículo presenta una metodología para la obtención de modelos matemáticos de procesos industriales. Dichos modelos son necesarios para el correcto diseño de reguladores industriales. La metodología es ilustrada sobre un proceso industrial real, presentándose los resultados más importantes así como sus implicaciones.

## Introducción

En Colombia existe un gran interés por aplicar sistemas de control automático adecuados a los procesos industriales con el fin de mejorar la calidad del producto y reducir sus costos de producción, dentro del contexto de internacionalización de nuestra economía.

Tradicionalmente, esta labor venía cumpliéndose con la ayuda de controladores de tipo PID (Proporcional, integral, derivativo). Sin embargo, dichos reguladores tienen limitaciones importantes, dado que no pueden garantizar en la mayoría de los casos el funcionamiento óptimo, esto es costos de operación reducidos con buena calidad del producto.

La tecnología digital actual, permite con gran facilidad la implantación de controladores óptimos de gran sofisticación, que en principio pueden responder a las necesidades de calidad y costo. Existen de otra parte, un número importante de metodologías de desarrollo de estrategias de control, muchas de ellas plasmadas en programas de computador. Sin embargo, para su utilización es necesario contar con un modelo

matemático adecuado siendo este el punto delicado del problema.

Para obtener dichos modelos existen dos posibles alternativas mayores:

1) Modelo de conocimientos: Con la ayuda de la física y las matemáticas, así como con el conocimiento de los materiales involucrados, se pueden desarrollar modelos matemáticos normalmente complejos y no lineales.

2) Modelo caja negra: Suponiendo, que el proceso es una caja negra, se trata de encontrar un modelo matemático adecuado a las necesidades que *represente al proceso que se desea modelar.*

El presente artículo, presenta en la próxima sección, una metodología basada en las posibilidades anteriores, la cual trata de reunir las ventajas de los dos métodos enumerados anteriormente. La sección tercera presenta brevemente el control digital, mientras que en la sección cuarta se describe el proceso sobre el cual se trabajó; la sección quinta, presenta los resultados obtenidos. Finalmente, se presentan las conclusiones y los alcances de la metodología.

## Metodología de la Obtención de Modelos

Recordando, las dos alternativas de obtención de modelos se tiene:

1) Modelo de conocimientos.

2) Modelo caja negra.

La primera metodología, es usualmente complicada, pues implica un conocimiento profundo del proceso y de las leyes físicas, químicas y matemáticas que lo describen, así como una muy buena caracterización de los materiales que lo componen. Esto lleva a la realización de estudios, normalmente largos y costosos.

El resultado así obtenido, es usualmente complejo: un modelo matemático de orden elevado, no-lineal y en consecuencia prácticamente inutilizable para

**MAURICIO DUQUE:** Ingeniero Eléctrico, Uniandes. Doctor en Automática, INPG, Grenoble, Francia. Profesor de Ingeniería Eléctrica, Uniandes.

Area de especialización Control Automático.

**EDITH CHARRY** (estudiante)

**MARTIN GONZALEZ** (estudiante)

propósitos de control.

Con el fin de utilizarlo, es necesario simplificarlo y linealizarlo. Esta labor no es trivial, y usualmente las hipótesis que deben hacerse, llevan a resultados de un margen de aplicabilidad muy reducida.

Ante esta metodología, la utilización de técnicas clásicas de sintonización de controladores PIDs, resultan más prácticas y seguras.

El segundo camino, esto es el de la caja negra, parte del desconocimiento total del proceso. Este es visto como una caja negra, con entradas y salidas. Al proceso se le aplica a las entradas una señal adecuada, realizándose una adquisición de dichas entradas y de las salidas resultantes.

Con esta información, y utilizando métodos matemáticos basados en optimización, se comienza a ensayar con diferentes modelos. Para cada modelo propuesto, se encuentran sus coeficientes, los cuales se suponen inicialmente desconocidos. Dicha labor se realiza tratando de que el modelo escogido se aproxime lo más que se pueda al comportamiento del proceso real.

A continuación estos modelos así obtenidos, son sometidos a una validación, la cual deberá dar como resultado el modelo o los modelos que mejor representen al proceso.

cada método es descrito en la figura 2.

En esta metodología es necesario un conocimiento moderado del proceso. A partir de dicho conocimiento, se estructura un conjunto reducido de modelos sobre el cual realizar el proceso descrito en el método de la caja negra. Al final, el conocimiento del proceso, es uno de los criterios utilizados en la validación y selección del modelo o modelos.

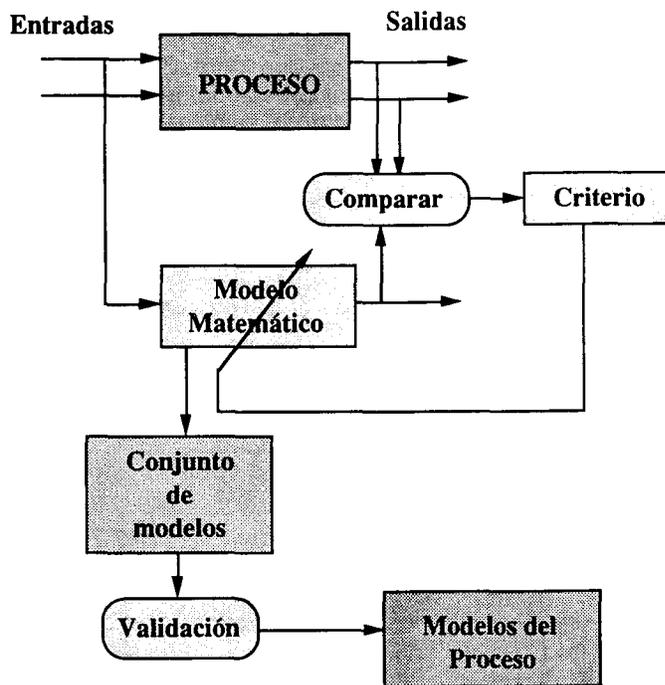


Figura 1: Método de la Caja Negra

La figura 1 esquematiza la metodología caja negra.

El inconveniente de este método es la elevada cantidad de modelos a ser utilizados en el proceso, así como la pérdida total de sentido físico de éste.

Una tercera alternativa, que pretende utilizar las ventajas de

## El Control por Computador (Control Digital)

Como se anotó en la introducción, la literatura disponible en la materia es abundante. La labor del

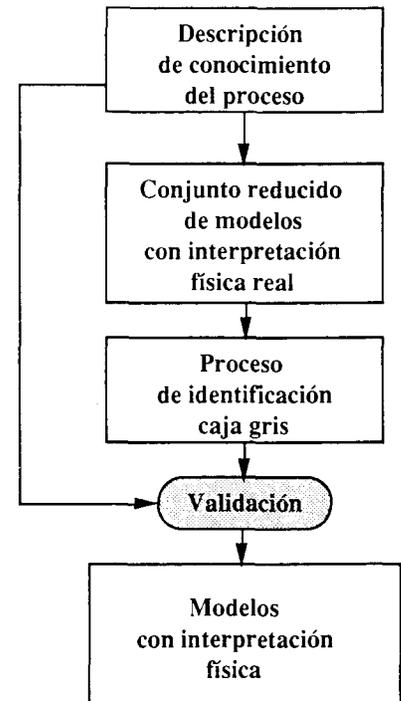


Figura 2: Metodología Caja Gris Propuesta

ingeniero de control es la adecuada selección de la estrategia de control que mejor se adapte al proceso y a sus requerimientos.

La figura 3 muestra un esquema de control digital típico.

Las ventajas del control digital son enormes. A continuación se citarán las más importantes:

- 1) Bajo costo, como resultado del costo actual de la tecnología digital.
- 2) Confiabilidad

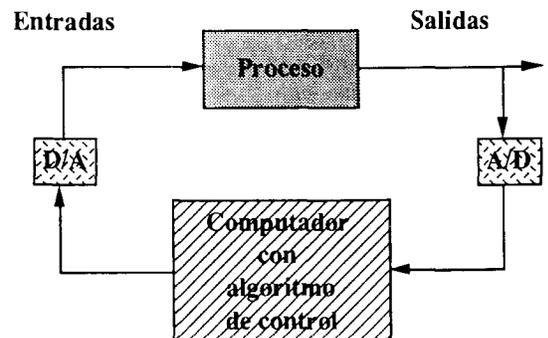


Figura 3: Esquema Básico de Control Digital

3) Flexibilidad, dado que el cambio de controlador implica únicamente un cambio de algoritmo.

4) Integración, dadas las capacidades de comunicación entre computadores.

Estas y muchas otras razones, hacen que el controlador de tipo PID, vaya quedando relegado a la historia de los sistemas de control, y que una nueva generación de controladores digitales diseñados a la medida del proceso sea en la actualidad la mejor solución.

## Caso de Estudio: Un Horno Rotatorio

El Horno Rotatorio de Cerro Matoso S.A. es un sistema dinámico cuyo proceso térmico es de naturaleza no lineal y estocástica. Este Horno forma parte de la planta de proceso de producción de Ferroniquel y es utilizado para la calcinación del mineral ferroso extraído de la mina.

Este proyecto, se desarrolló conjuntamente entre la Universidad de los Andes y Cerro Matoso S.A., dentro del marco de un proyecto de grado. Sus objetivos: ilustrar la metodología antes descrita y diseñar una estrategia para el algoritmo de control digital.

Los pasos que se siguieron son:

- 1) Encontrar modelos matemáticos que describan adecuadamente el proceso térmico, basados en las señales reales producidas en el horno.
- 2) Con base en estos modelos, diseñar un regulador digital que optimice el funcionamiento del

proceso.

3) Simular en computador el comportamiento del regulador digital diseñado.

La metodología seguida para este estudio fue:

- 1) Estudio del proceso térmico del Horno Rotatorio: Encaminado a proponer modelos físicos simples a ser utilizados en el proceso de identificación.
- 2) Muestreo de las principales variables del proceso y clasificación en archivos de acuerdo a los diferentes puntos de operación en que puede trabajar el Horno. En este caso particular, no se utilizarán extra-señales, tomando la información del proceso en funcionamiento normal.
- 3) Cálculo de modelos que se ajusten al proceso normal real, utilizando métodos matemáticos adecuados (Identificación Paramétrica).
- 4) Diseño y Simulación en computador de Reguladores Digitales lineales óptimos, para optimización del consumo de

y rota permanentemente para facilitar el flujo de material. La figura 4 presenta un mímico del proceso. El horno es alimentado con mineral de determinada composición química, porcentaje de humedad y porcentaje de carbón. El mineral dentro del horno se calienta por medio de una llama ubicada en el extremo de la descarga que permite ir elevando lentamente la temperatura siguiendo un perfil determinado necesario para el cumplimiento de las funciones del horno.

El objetivo del control es mantener un determinado perfil de temperatura a lo largo del horno, fijado por ciertas condiciones del proceso. Para esto están instalados diez conjuntos de termocuplas en diferentes puntos, los cuales están enviando la señal de temperatura del mineral a un cuarto de control, donde se toma la decisión de modificar la intensidad de la llama variando el flujo de gas que alimenta el quemador como se ve en la figura No. 4.

Existen diversas causas por las

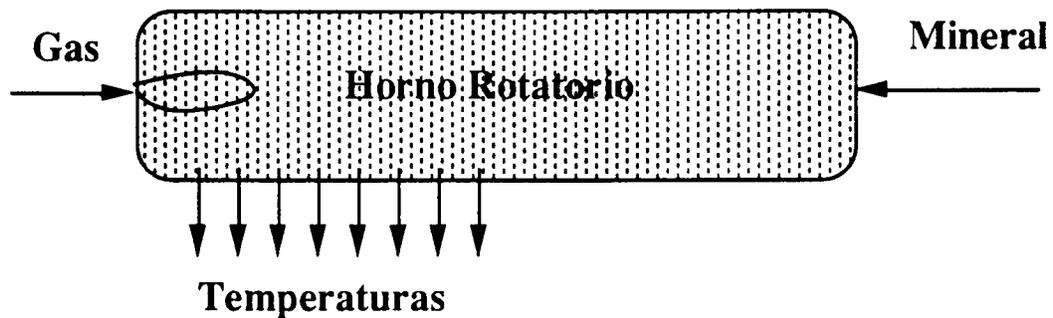


Figura 4: Esquema Físico Horno Rotatorio

energía, con minimización de la variación de temperatura.

### Descripción del Proceso.

El Horno Rotatorio tiene aproximadamente 180 m de longitud, por 6 m de diámetro, está inclinado hacia la descarga

que la temperatura del mineral se salga del perfil deseado como son: cambios de la composición química, cambios en el porcentaje de humedad del mineral, pérdidas de continuidad en la cantidad de mineral introducido en el horno.

## Selección del Modelo

Dadas las especificaciones deseadas, después de evaluar varias alternativas, se escogió una representación en variables de estado, la cual permite una descripción física de la variación de la temperatura en los puntos de interés del horno.

El modelo escogido, permite describir el proceso de percloración. La dimensión del modelo, será dada por el número de puntos de control de la temperatura. En el caso particular, se seleccionaron diez temperaturas, razón por la cual el modelo será de diez variables de estado, una por cada temperatura.

Como variable de control se tomó el flujo de gas del quemador ( $m^3/min$ ) y como perturbación medible, se agregó la alimentación del mineral del Horno (tons/hora). (Figura 4).

La estructura del modelo en tiempo discreto es la siguiente:

$$\underline{x}(i+1) = A\underline{x}(i) + B\underline{u}(i)$$

Donde A es la Matriz de estado de dimensión (10x10) y B es la matriz de entrada de dimensión (10 x2). El vector  $\underline{u}$  contiene las entradas al proceso (gas y mineral) y el vector  $\underline{x}$  las diez temperaturas seleccionadas a lo largo del horno.

## Adquisición de datos

Las variables de entrada-salida del sistema fueron registradas durante 15 días, cada minuto y los archivos fueron clasificados de acuerdo a las condiciones de operación. Para esta etapa, se utilizaron conversores Analógico-Digitales

conectados a un computador. Los archivos se almacenaron en medio magnético.

## Identificación de modelos

Utilizando técnicas de identificación de modelos adaptadas a modelos en variables de estado, se encontró para cada archivo-punto de operación el que mejor describiera el proceso real.

Con estos modelos, se hizo una validación entre archivos, escogiéndose el de mejor comportamiento.

## Diseño del Regulador Digital

Como los objetivos de control fijados eran la minimización de combustible, así como el perfil de temperaturas a lo largo del horno, se seleccionó el siguiente criterio a minimizar:

$$J = \sum_{i=0}^T \underline{E}(i)^T Q \underline{E}(i) + \lambda u(i) \quad (\text{Criterio } LQ)$$

Donde  $\underline{E}(i)$  representa el vector de error entre el perfil deseado ( $\underline{X}^*(i)$ ) y la temperatura real ( $\underline{X}(i)$ ). Este regulador digital que minimiza la función de costos permite encontrar el flujo de gas óptimo al quemador ( $u(i)$ ), que mantenga un compromiso entre el perfil deseado de temperatura y el consumo de energía. Este compromiso se logra con la ayuda de la matriz Q y el escalar  $\lambda$ .

La principal ventaja de este regulador es la factibilidad de implementación puesto que se desarrolla con operaciones matemáticas elementales con las variables de proceso (sumas y multiplicaciones), permitiendo su utilización en tiempo real. En este caso particular, son necesarias del orden de 15 sumas y 15 productos.

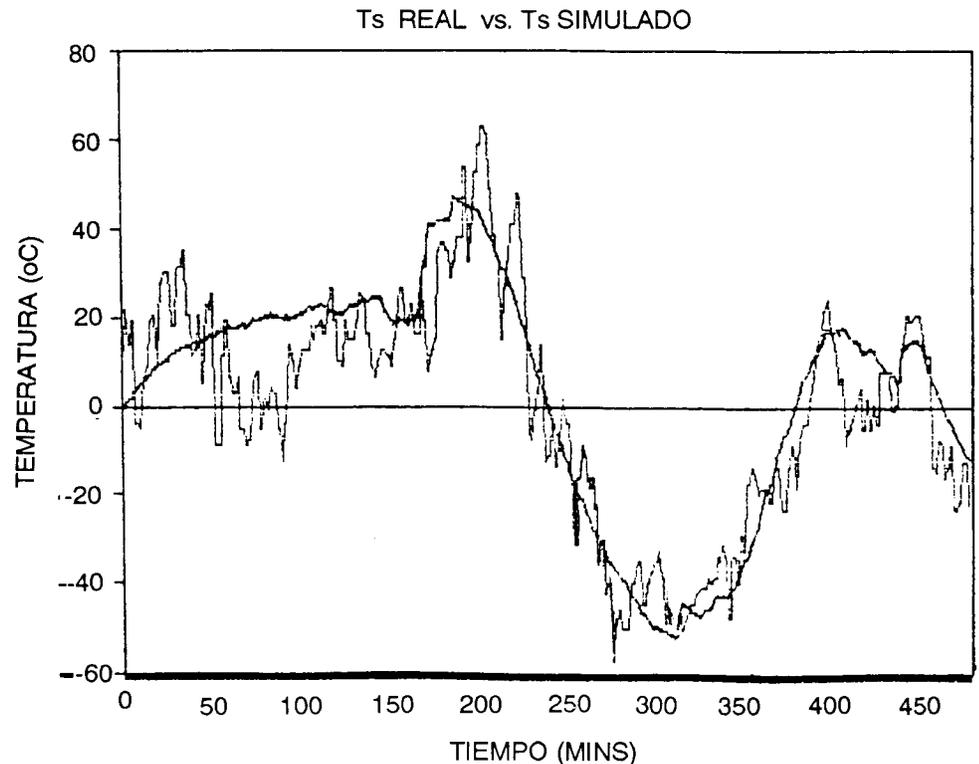


Figura 5 : Señal real vs. señal simulada por un modelo en variables de estado.

## Simulación

Con el fin de realizar una simulación lo más cerca del proceso real, el ruido existente en los registros fue caracterizado estadísticamente y pseudo-generado en el momento de las simulaciones.

## Resultados Experimentales

### Etapa de identificación

La figura No. 5 muestra un resultado típico de la validación de un modelo en Variables de Estado. La gráfica representa ocho horas de operación del horno. Se muestra la señal real de una termocupla comparándola con una señal simulada a partir

de un modelo identificado, el cual utiliza el flujo de gas y la alimentación de mineral como variables de entrada y tiene como salidas las temperaturas a lo largo del Horno. Se puede observar que en tendencia el modelo se ajusta adecuadamente a los datos reales, teniendo como diferencias las perturbaciones (Observar las escalas).

### Etapa de control digital

La figura No. 6 muestra la simulación del sistema planta+regulador en lazo cerrado, para dos termocuplas. Se fijó en este caso una referencia de  $1.300^{\circ}\text{C}$  y  $600^{\circ}\text{C}$  para que el regulador mantuviera esta temperatura en ambas termocuplas. Como se ve en esta gráfica, el regulador se encarga de variar adecuadamente el flujo de gas hasta alcanzar los niveles de temperatura especificados.

## Conclusiones Y Perspectivas

Con respecto al caso presentado, se tiene:

Los modelos obtenidos por variables de estado describieron muy bien el comportamiento variacional del proceso en los puntos de operación de interés, para bajas frecuencias. El modelo de otra parte tiene una interpretación física, pues describe parcialmente el funcionamiento interno del proceso.

El regulador calculado dado que tiene una sola

variable de control para todas las salidas, logra un buen compromiso entre optimizar el consumo de gas y mantener el perfil deseado. Además, de la utilización de la perturbación medible (Mineral), permite anticipar los efectos en la variación de éste. Su implantación, de otra parte, resulta sencilla.

Con respecto a la metodología cabe anotar:

En el país se dispone de todos los recursos, tanto técnicos como humanos para acometer el diseño de reguladores de alto desempeño para procesos de tiempo continuo.

El bajo costo de la metodología presentada, es sobradamente compensado por los beneficios obtenidos de la disminución de costos de producción (energía) y la mejora de la calidad del producto.

Desde el punto de vista investigación, es interesante desarrollar modelos físicos típicos sencillos, para los diferentes procesos presentados comúnmente en la industria en el país, con el fin de agilizar el proceso de identificación.

Una labor importante deberá ser dada a la transferencia de estas metodologías al sector productivo del país.

## Bibliografía

- (1) Charry E., González M. "Modelaje y diseño de un controlador digital para un horno rotatorio". Proyecto de grado IE-91-I-07, Universidad de los Andes, Santafé de Bogotá, 1991.
- (2) Ljung "System identification" Prentice Hall, 1989.
- (3) Matlab, The math Works, INC. 1989.

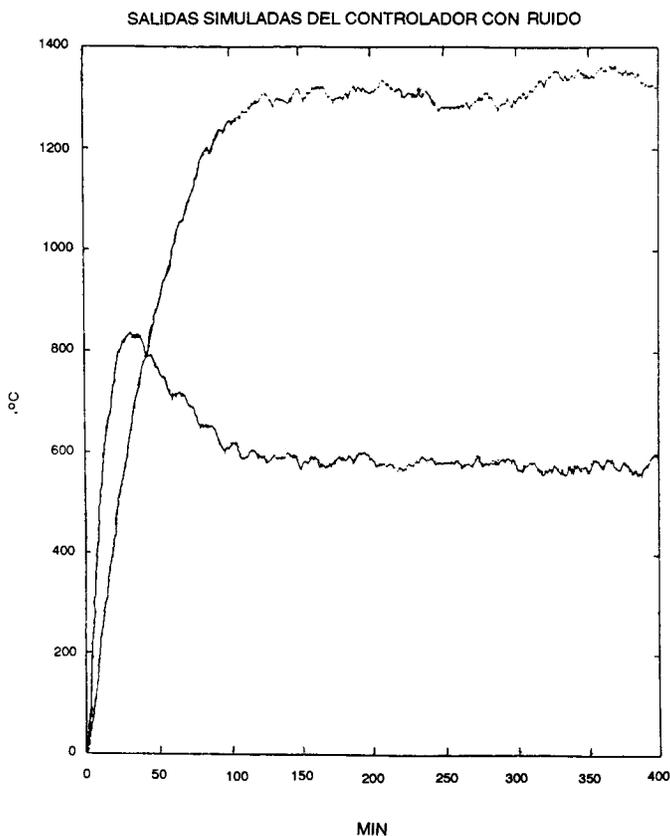


Figura No 6: Simulación del sistema Planta+regulador digital con introducción de perturbaciones aleatorias.