

MODELADO Y CONTROL DE UN HORNO DE YESO ROTATIVO Y CONTINUO

F. Dorado, A. Núñez Reyes, E.F. Camacho y C. Bordóns
Escuela Superior de Ingenieros
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática
Camino de los Descubrimientos, s/n, Sevilla 41092
Teléfono: +34954487348, Fax: +34954487340
E-mail: (fdorado, amparo, eduardo, bordons)@cartuja.us.es

Resumen

En este trabajo se describe el proceso de modelado que define el comportamiento de un horno de yeso rotativo y continuo. También se detalla la estrategia de control que mejor se adapta al sistema y se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones.

Palabras Clave: Modelado, PID, GPC, MBPC.

1 INTRODUCCIÓN

El control de hornos rotativos de calcinación es un problema de gran dificultad debido a la dinámica lenta y a la gran relación ruido/señal que presentan estos tipos de procesos.

Existen diversas aplicaciones, de control avanzado, sobre hornos rotativos de cemento [5], sin embargo, la bibliografía efectiva, concerniente a hornos de yeso es muy escasa

En este artículo se describe el proceso de modelado y se propone una estrategia de control avanzado para este tipo de problemática.

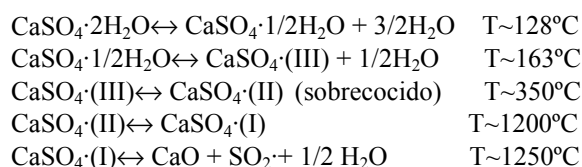
El artículo está organizado de la forma siguiente: en primer lugar se describe en el apartado 2, los fundamentos del mineral de yeso, en la siguiente sección se expone, el procedimiento que se ha seguido para la obtención del modelo paramétrico de "caja negra", que representa la dinámica del horno. A continuación se plantea la solución adoptada para la regulación del sistema, que consiste en la aplicación conjunta de un controlador básico PID y un control predictivo generalizado, basado en modelo. Y por último se exhiben los resultados obtenidos en las simulaciones, realizadas bajo Simulink, concluyendo con la justificación del trabajo

2 FUNDAMENTOS

El mineral de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) está ampliamente distribuido en la corteza terrestre. Cuando se calienta, aproximadamente a 150°C , tiene la particularidad de perder una parte del agua de hidratación transformándose en semihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$) que de nuevo al mezclarse con agua se rehidrata (fraguado) obteniéndose un producto estable, duradero y ecológico (natural).

La superficie de la España yesífera representa un 60% de la superficie total. En 1995 la producción total española fue de 10 millones de toneladas, la UE produce 30 millones Tm frente a 98 del resto del mundo. Así pues, España se sitúa en el 6º puesto mundial en la producción de yeso, por detrás de países como USA, Irán, Canadá, China y Japón.

Existen numerosos procesos industriales para la producción del yeso, y en función de éstos, las condiciones de obtención del producto, así como el tipo de material obtenido son muy variables. Sin embargo, podemos resumir las ecuaciones más importantes que se dan en el material:



Se pueden obtener 3 tipos de Anhidrita (II), dependiendo de la temperatura de cocción y del tiempo:

- ANH-II-S (Anhidrita ligeramente soluble), producida entre 300°C y 500°C
- ANH-II-U (Anhidrita insoluble), producida entre 500°C y 700°C
- ANH-II-E (Anhidrita disociada parcialmente), producida por encima de 700°C , mezcla sólida de AN-II y óxido de calcio.

En la práctica, la diferencia entre todos estos tipos estriba en el tiempo de rehidratación con agua: ANH-II-S: rápido, ANH-II-U: lento, ANH-II-E: medio (entre las dos anteriores).

En la práctica industrial, suele fabricarse dos tipos de producto: Operando a "baja" temperatura para obtener Semihidrato, y en "alta" temperatura para producir Anhidrita.

3 MODELADO DEL SISTEMA

La identificación de un sistema, en general, es una fase de vital importancia en el control automático, pues la mayoría de las técnicas de control requieren un buen modelo, o bien en la etapa de diseño del controlador o bien durante la operación del mismo.

El modelo del sistema dinámico, que aquí se plantea, está basado en datos reales de un horno de yeso. El modelo es de tipo paramétrico de "caja negra", y en el se postula una estructura matemática con parámetros modificables.

Una forma muy común de aproximar la dinámica de un proceso es mediante un sistema de primer orden más un retraso. Aunque, la realidad sin embargo es más compleja, y en gran número de aplicaciones lo que realmente se tiene son multitud de sistemas de primer orden "en cadena", de tal forma que la respuesta equivalente del sistema es la de uno de muy alto orden, además de los retardos que pudiera tener la planta.

Por lo que, la estructura matemática elegida para la aproximación del sistema, estriba en la dinámica de sistemas de primer orden con retraso.

La identificación se ha fragmentado en dos fases, obteniendo así dos sistemas de primer orden con retraso Σ_1 y Σ_2 . Dicha identificación se ha llevado a cabo mediante el método de los mínimos cuadrados recursivos utilizando, para ello, datos históricos de un horno real.

Las variables significativas para el modelado del horno son dos entradas (Caudal de fuel (QF), y caudal de producto (QP)) y dos salidas (Temperatura de salida de producto (TS) y temperatura de gases de salida (TG)).

En la figura 1, se muestran todas las variables implicadas en la identificación y la relación existente entre ellas:

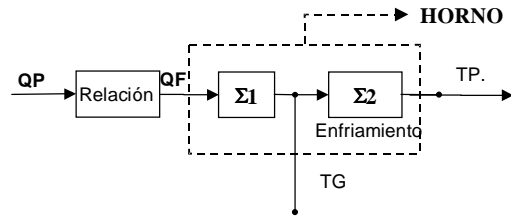


Figura 1: Modelado del sistema

El resultado del modelado del horno, son dos funciones de transferencia (como se refleja en la figura 1), descritas a continuación:

$$\Sigma_1 = \frac{k_1}{1 + \tau_1 s} e^{-Tm_1 s} \quad (1)$$

$$\Sigma_2 = \frac{k_2}{1 + \tau_2 s} e^{-Tm_2 s} \quad (2)$$

Donde Σ_1 y Σ_2 , son dos sistemas de primer orden con ganancias: k_1, k_2 , constantes de tiempo: τ_1, τ_2 y retardos: Tm_1, Tm_2 respectivamente. Las constantes de tiempo están expresadas en minutos.

En la figura 2, se muestran algunas gráficas significativas implicadas en la identificación del sistema Σ_1 , -la señal identificada es TG y la entrada es QF-. En el primer bloque se representan conjuntamente la salida real del sistema y la salida simulada (de color magenta), en la siguiente imagen podemos apreciar el escalón de la entrada: QF, y en el tercer y último bloque queda reflejado el error de la identificación.

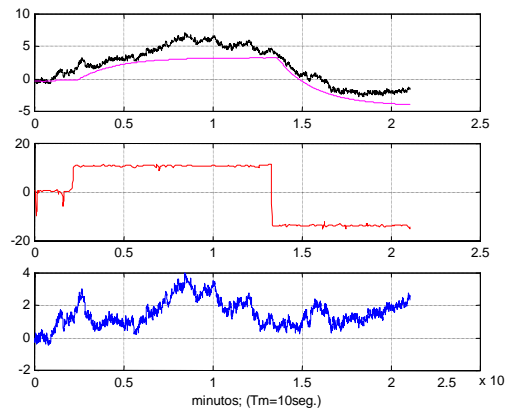


Figura 2: Identificación de QF vs TG

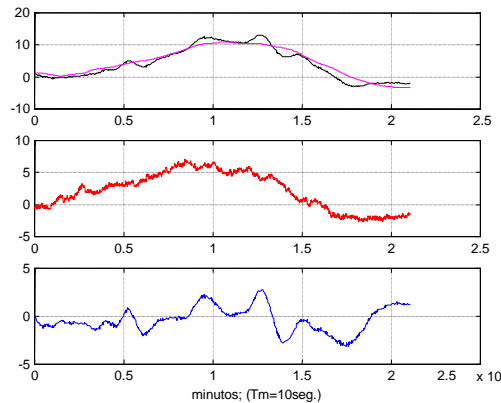


Figura 3: Identificación TG vs TP.

En la figura 3, se observan distintos fragmentos que definen la segunda fase de la identificación del horno, representada por Σ_2 . En los segmentos de la figura se aprecian las siguientes variables: la comparativa de la señal real (línea negra) con la señal simulada (color magenta), la entrada del sistema real (roja) y por supuesto el error originado por el modelado.

Los dos modelos obtenidos se han sometido a diferentes pruebas de validación, utilizando datos reales de entrada distintos a los empleados para la obtención de los parámetros del modelo. En la fase de validación se han obtenido unos residuos mínimos, que no poseen ningún tipo de correlación con los datos disponibles.

Para finalizar con este apartado, sólo comentar, que la señal de actuación QP, se mantiene al margen en la fase de identificación, no obstante participa de forma indirecta en la etapa de control.

4 ESTRATEGIA DE CONTROL

4.1 Solución adoptada

El esquema, de control propuesto consiste, básicamente, en la regulación de la variable de proceso TP, mediante la variable de actuación QF.

La peculiaridad de este sistema estriba, por una parte en que las temperaturas TP y TG, evolucionan con la misma dinámica, diferenciándose principalmente en el retardo. Estando la TG adelantada en el tiempo con respecto la TP.

Y por otra parte, el sistema, Σ_1 y Σ_2 , requiere un controlador que soporte grandes retardos, ya que dichos retardos, hacen disminuir considerablemente el margen de ganancia y de fase del sistema, de forma que pueden llegar a inestabilizar el horno.

Estas particularidades justifican la fragmentación del esquema de control en dos lazos diferentes: un lazo interno, que controla la temperatura más rápida y un lazo externo que regula la variable con mayor retardo TP.

La solución adoptada en este trabajo, consiste en la utilización de un PID, para la regulación del sistema con menor retardo, y en la aplicación de un GPC, para el lazo externo, con mayor retardo. Puesto que este tipo de controladores poseen intrínsecamente un compensador de tiempo muerto y a la vez constituyen una buena herramienta para el control de procesos con retardos significativos o mal conocidos.

Como se aprecia en la figura 4, el lazo interno regula la temperatura de los gases de salida del horno, es el más rápido de los dos, y proporciona una estimación de la temperatura de salida del producto en el futuro. Por su parte, el GPC o controlador externo proporciona el control de la temperatura de salida del producto.

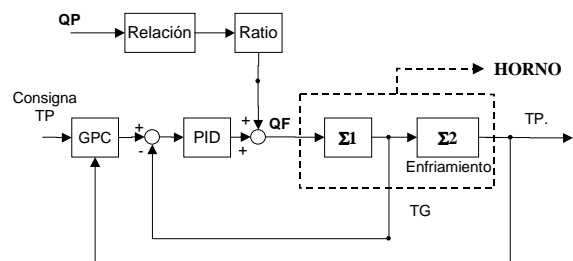


Figura 4: Estrategia de control

Existe una señal de feed forward, a la salida del PID, cuyo objetivo es mantener valores nominales de QF, de manera que el controlador realice una regulación suave dentro de un margen pequeño de valores.

Como anteriormente se ha comentado, el horno de yeso puede producir, o bien anhídrita o bien semihidrato, dependiendo del valor de la consigna TP. El bloque "Relación", (mostrado en la figura 4), es el encargado de indicar los valores nominales correspondientes a QF, dependiendo del producto que se realice en cada instante. Y el segundo segmento: "Ratio" representa la relación existente entre las variables de actuación: QP-QF.

4.2 Modelo GPC

El GPC se encuentra enmarcado dentro del Control Predictivo Basado en Modelo, MBPC (Model Based Predictive Control). Por lo cual necesitamos un modelo de la planta que nos permita aplicar dicho controlador.

En nuestro caso, para la ejecución del GPC, se ha considerado como modelo global, un “pseudosistema” que incluye el horno en sí (Σ_1 y Σ_2) y el lazo de control interno o regulador de TG.

El modelo global se ha calculado de la siguiente manera:

Siendo la función de transferencia del PI:

$$G_{PID} = \frac{Ps + I}{s} \quad (3)$$

La función de transferencia del “pseudosistema” adopta la siguiente forma:

$$H(s) = \frac{G_{PID}\Sigma_1}{1 + G_{PID}\Sigma_1} \Sigma_2 \quad (4)$$

Tras sustituir los parámetros de cada modelo se llega al modelo general:

$$H(s) = \frac{k_1 k_2 I \left(\frac{P}{I} s + 1 \right)}{\left(s^2 \tau_1 + s(k_1 P + 1) + k_1 I \right) (1 + \tau_2 s)} e^{-T_m s}$$

En la que T_m es el tiempo muerto total del sistema, correspondiente a la suma de los retardos de Σ_1 y Σ_2 . En este caso, $T_m=10.33$ minutos. Tiempo con el cual se han ejecutado las simulaciones posteriores.

5 RESULTADOS DE SIMULACIÓN

En este apartado se muestran algunos de los resultados más interesantes y significativos obtenidos mediante la simulación bajo Simulink.

Los parámetros del GPC, con los que se han realizado las simulaciones son los siguientes:

Horizonte de control: 20.

Horizonte de predicción: 60

Lambda: 1

Y Tiempo de discretización del modelo de 1 minuto.

Las posteriores figuras, reflejan la respuesta del sistema ante cambios de SP y ante la existencia de perturbaciones.

La figura 5, representa la salida del sistema TP, junto a la referencia. Como se puede observar, el sistema sigue a la consigna que se le indica sin ningún salto brusco.

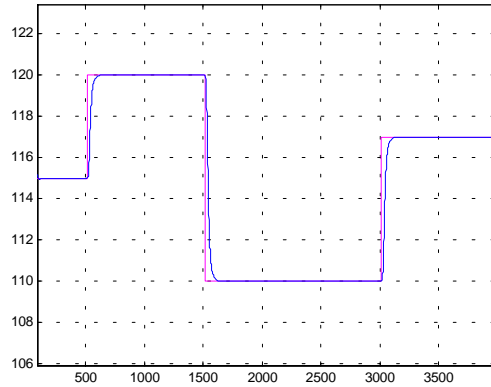


Figura 5: TP y referencia ante cambios de SP.

La figura 6 refleja la variable de actuación de la planta: QF, ante diferentes cambios de referencia.

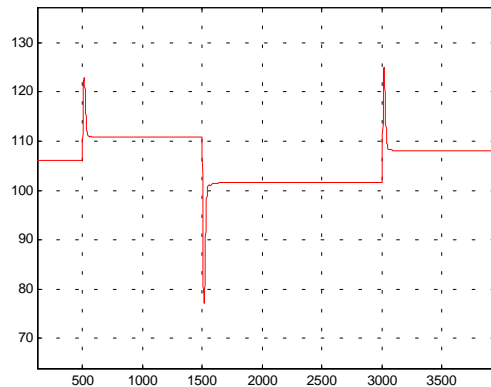


Figura 6: Señal de control: QF ante cambios de SP.

A continuación se muestran las figuras 7 y 8, que representan el rechazo del sistema ante perturbaciones. En la primera (figura 7), se observa la señal de salida TP, en azul y la consigna a seguir en magenta.

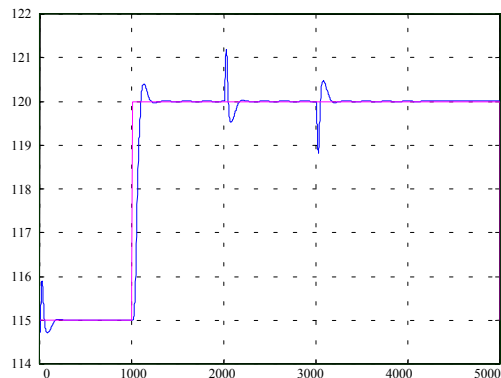


Figura 7: TP y referencia, ante perturbaciones.

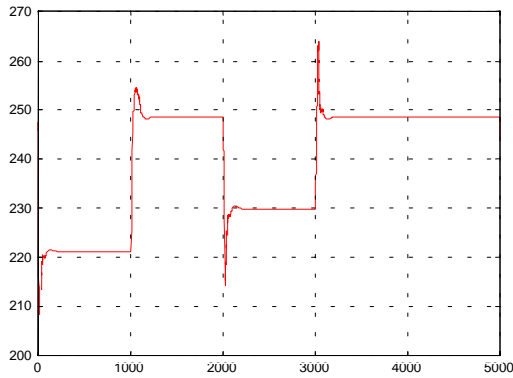


Figura 8: Señal de control: QF, ante perturbaciones.

Y en la figura 8, se advierte cómo la señal de actuación: QF, es modificada por el controlador, para recuperar al sistema de las perturbaciones sin saltos importantes.

6 CONCLUSIÓN

La solución adoptada en este trabajo para abordar el problema del modelado y control de un horno rotativo y continuo de yeso, es una buena opción para evitar los problemas que conllevan la aparición de los retrasos en este tipo de plantas.

La estrategia de control propuesta permite al sistema una respuesta adecuada ante cambios de referencia, y una recuperación muy aceptable ante la presencia de perturbaciones.

Por un lado, la utilización de un PID, para controlar el sistema con menor retardo, nos proporciona una estimación de la temperatura de salida del producto en el futuro y además nos permite mayor rapidez en el ajuste del lazo interno que en el externo.

Y por otro lado, la técnica de Control Predictivo Basado en Modelo (Model Based Predictive Control), aplicada en el lazo externo, constituye, en general, una poderosa herramienta para afrontar problemas de control de procesos con grandes tiempos muertos.

El GPC, se ha empleado con éxito en numerosas aplicaciones industriales, mostrando buenas prestaciones a la vez que un cierto grado de robustez respecto a los retardos significativos o mal conocidos, ya que, intrínsecamente posee compensación de retardo.

Agradecimientos

Los autores de este artículo agradecen a los señores Martín Talaverón, Juan Hermida, José Junco, José M.

Clavijo y A. Serena de la empresa PROCISA y al señor Juan Martí de IBERYESO por la ayuda aportada así como a la CICYT por el proyecto: IFD97-03836, que ha hecho posible la financiación del mismo

Referencias

- [1] Barrios Sevilla, J. *Estudios realizados para la puesta a punto de un horno de cocción de yeso*. Tesina, Cátedra Química Técnica, Universidad de Sevilla, 1973.
- [2] Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio núm 36, 1997.
- [3] D.W. Clarke, C. Mohtadi y P.S. Tuffs. Generalized Predictive Control. Part I. The Basic Algorithm. *Automatica*, 23(2): 137-148, 1987.
- [4] E.F. Camacho y C. Bordóns. *Model Predictive Control*. Springer-Verlag, 1999.
- [5] Martín Sánchez y Rodellar. *Adaptive predictive control*. Prentice Hall 1996.
- [6] Perry, J.H. *Manual del Ingeniero Químico*. UTEHA Mexico 1978.
- [7] The Industrial Minerals Handbook II.