

MODELO DINÁMICO, IDENTIFICACIÓN Y ESTRATEGIAS BÁSICAS DE CONTROL PARA SECADERO ROTATIVO DE ALPEORUJO

J.Holgado, I.S.Rivas, F.R.Rubio y C.Bordóns
Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla
E-mail: (holgado,rivas,rubio,bordons)@cartuja.us.es

Resumen

En este artículo se describe un modelo matemático de secadero rotativo que reproduce el comportamiento del sistema de secado de orujo de dos fases (alpeorujo). También se describe la instrumentación de que ha sido dotada la planta de secado tanto para realizar ensayos que lleven a cabo la validación del modelo, como para la posterior automatización y control de la planta. Las pruebas con controladores reales se llevarán a cabo a lo largo de la próxima campaña.

Palabras clave: Procesos industriales, modelado e identificación de sistemas, secadero rotativo, alpeorujo.

1 INTRODUCCIÓN

La industria productora de aceite de oliva ha experimentado un cambio radical en los últimos años, pasando del tradicional sistema de tres fases (aceite, sólido y alpechín) a un moderno sistema de dos fases (aceite y sólido) en el que no se genera el efluente líquido tradicional (alpechín), cuyos efectos contaminantes no se adecuaban a las exigencias medioambientales, reduciendo drásticamente el consumo de agua.

Estos residuos sólidos procedentes de la producción de aceite, conocidos como orujo, deben ser secados antes de su almacenamiento, debido a que su elevada humedad impediría el contacto íntimo entre el disolvente, normalmente hexano, y el sólido húmedo durante el proceso de extracción. El alto grado de humedad del nuevo residuo sólido, llamado alpeorujo, que posee un 65 por ciento en base húmeda frente al 40 por ciento del orujo tradicional, disminuye la rentabilidad del aceite de orujo, debido al elevado consumo de energía durante el proceso de secado. Se aprecia la necesidad de emplear secaderos mucho más efectivos que los actuales. Este aumento de humedad, junto con la presencia de nuevas sustancias incorporadas, azúcares básicamente, le dan al alpeorujo mayor fluidez, presentando dificultades para el almacenamiento y el transporte, así como un incorrecto

funcionamiento del secadero, en cuyas paredes el sólido forma apelmazamientos y va dejando una película de aceite que hace aumentar el riesgo de incendio.

2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

En un secadero rotativo el material está en forma de partículas que se van secando al dejarlas arrastrar por una corriente de aire caliente (aire ambiente tras pasar por el horno). El aire transfiere calor al sólido y elimina su humedad. La transmisión tiene lugar principalmente por conducción-convección y prevalecen las condiciones adiabáticas. Unida a la pared interna del tromel hay una serie continua de elevadores, de modo que a medida que gira el secadero, el material se arroja en cascada dentro de la corriente gaseosa. En fig. 1 se observa un esquema de la instalación.

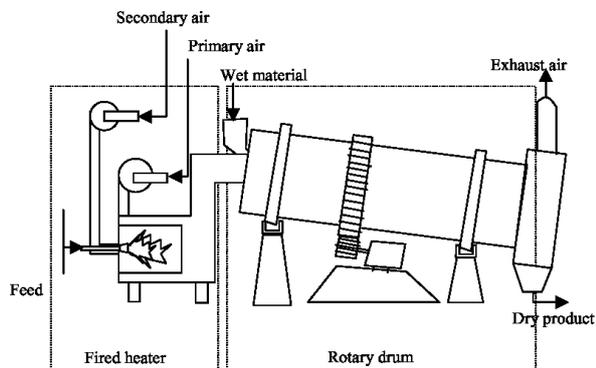


Figura 1: Esquema de secadero rotativo

El tromel gira a una velocidad del orden de 3 a 7 rpm, y la velocidad del aire varía entre 1.5 y 4 m/s. En cuanto a la dirección de los flujos, es fundamental usar el flujo de sólido a favor de la corriente cuando se debe evaporar una gran proporción de humedad en las primeras etapas del secado, permitiendo además usar altas temperaturas en el aire de entrada eliminando el riesgo de alcanzar elevadas temperaturas en el sólido a tratar. Puesto que las temperaturas de aire y sólido convergen a medida que se acercan a la salida, la temperatura del sólido seco que abandona el secadero es contro-

lada hasta que alcance su valor máximo, mientras que mantiene la ventaja de tener gran diferencia de temperaturas en las primeras etapas. Es la disposición empleada en los secaderos reales, y por tanto la empleada en el modelo.

En una planta de secado, además del propio secadero, será necesario considerar la dinámica del resto de elementos que componen la instalación: horno, tornillo de quemadores, válvulas, ventiladores, cintas transportadoras, ciclones, redler de alimentación, filtros, etc. Dada la complejidad del proceso, en la actualidad y en la mayoría de aplicaciones industriales de secado, lo usual es que todo el proceso sea aproximado a un sistema de primer orden, determinándose ganancia estática, contante de tiempo y retardo mediante adecuadas experiencias. Como es difícil medir directamente la humedad en forma continua, se controla en su lugar la temperatura de gases de salida, que se relaciona mediante correlaciones de limitada validez con la humedad del producto. El control suele ser un PID con el que se pretende mantener constante la temperatura de salida de gases, T_o , regulando la temperatura de gases de combustión, T_i , mediante el flujo de combustible del horno, según se observa en fig. 2.

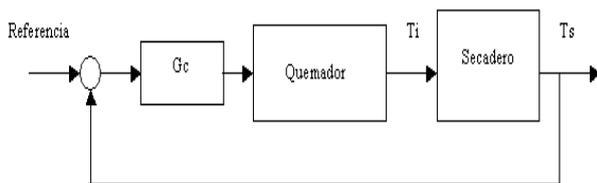


Figura 2: Estrategia típica de control

3 ESTRATEGIAS DE CONTROL

Una planta de secadero rotativo de alpeorujio presenta las siguientes características:

- Se trata de un proceso dominado por grandes retardos, debido al elevado tiempo de residencia de los sólidos.
- No requiere un control muy exigente de la humedad del producto, que salvo excepciones, no se puede medir en continuo.
- La humedad del producto es muy sensible a cambios en la humedad del sólido de alimentación, flujo y temperatura de gases de entrada y régimen de giro.
- La única variable manipulada en la práctica es la temperatura de los gases de combustión,

T_i , regulada mediante el variador de velocidad de que está dotado el motor de los quemadores de orujillo (combustible empleado). Teóricamente es posible tener como variables manipuladas al flujo de aire y la velocidad de giro del tromel. En la práctica, el régimen de giro empleado es el máximo compatible con las condiciones mecánicas y eléctricas del motor para alcanzar un mayor nivel de producción. En cuanto al flujo de aire, la mayoría de instalaciones solo disponen de una clapeta para cerrar ó abrir totalmente el flujo impulsado por el motor del ventilador.

En la actualidad, la variable que realmente se controla es la temperatura de los gases de salida, T_o , que se relaciona con la humedad del producto a través del resto de variables. Se consigue mejorar el control con una configuración en cascada, donde el bucle interno controla la temperatura de entrada al secadero, justo después del horno, y el bucle externo controla la temperatura de salida. Esta opción es acertada pues el control de procesos en cascada es especialmente útil para aquellos en que la perturbación afecta a la propia variable manipulada. No existen problemas de estabilidad al ser el bucle interno más rápido que el externo.

De cualquier modo, este sistema de control no es realmente satisfactorio, pues ante determinadas perturbaciones se variará T_i para lograr que T_o se mantenga constante, variando por tanto la humedad del producto (Shinsky, 1996). Mediante una adecuada ley de inferencia, que incluya en primera aproximación la dependencia con el flujo de sólido procesado y la humedad inicial como perturbaciones, se puede relacionar la humedad del producto con la temperatura de gases de salida (Liptak, 1998), de manera que una vez detectadas estas perturbaciones se vayan generando consignas variables de T_o que lleven la humedad del producto hacia el valor deseado, según se indica en fig. 3.

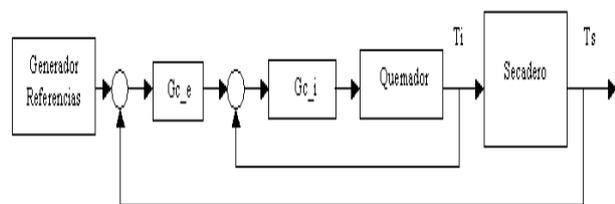


Figura 3: Estrategia de control propuesta

4 ECUACIONES DEL MODELO

El modelo se desarrolla a partir de leyes de conservación y transferencia de calor y materia. Por la propia geometría, a lo largo del secadero se generarán fuertes gradientes de concentración y temperatura. Por esto, la aplicación de ecuaciones de conservación generará una formulación en derivadas parciales, que puede evitarse descomponiendo el secadero en un número finito de elementos en serie, a cada uno de los cuales se le aplicarán las ecuaciones. Esta técnica es común en el modelado de algunos procesos industriales (E.F Camacho, F.R.Rubio y J.A. Gutierrez,1988). La notación empleada es:

FS : flujo másico de sólido seco que atraviesa la sección (kg sól seco/s).

MS : masa de sólido seco contenida en la sección (kg sól seco).

FA : flujo másico de agua contenida en el sólido (kg agua/s).

MA : masa de agua contenida en el sólido (kg agua).

FG : flujo másico de gas seco (kg gas seco/s).

MG : masa de gas seco (kg gas seco).

FH : flujo másico de vapor contenido en el gas (kg vapor/s).

MH : masa de vapor contenida en el gas (kg vapor).

TG : temperatura de la corriente gaseosa ($^{\circ}C$).

TS : temperatura del sólido ($^{\circ}C$).

X : humedad del sólido en base seca (kg agua/kg sól seco).

BH : humedad del sólido en base húmeda (kg agua/kg sól húmedo).

Y : humedad del gas en base seca (kg vapor/kg gas seco).

W : flujo de agua evaporada (kg agua/s).

Cp_s : calor específico del sólido: 1.58 (kJ/kg $^{\circ}C$).

Cp_a : calor específico del agua: 4.18 (kJ/kg $^{\circ}C$).

Cp_g : calor específico a presión constante del gas seco (kJ/kg $^{\circ}C$).

Cp_h : calor específico a presión constante del vapor de agua ($^{\circ}C$).

H : entalpía del vapor (kJ).

V : volumen de cada sección (m^3).

λ : calor latente de vaporización evaluado a 0 $^{\circ}C$ (kJ/kg).

U : coeficiente de transferencia de calor por unidad de volumen de secadero (kW/ $m^3^{\circ}C$).

ρ_s : densidad del sólido seco (kg/ m^3).

vg : velocidad de circulación del gas seco (m/s).

Considerando conectadas las secciones en serie, si son conocidas las variables correspondientes a la sección de entrada (i-1) y se aplican las siguientes ecuaciones se obtendrán las variables en la sección

de salida (i):

Conservación de sólido seco:

$$\frac{\partial(MS_i)}{\partial t} = FS_{i-1} - FS_i \quad (1)$$

Conservación de agua en las fases líquida y gaseosa:

$$\frac{\partial(MA_i)}{\partial t} = FA_{i-1} - FA_i - W_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial(MH_i)}{\partial t} = FH_{i-1} - FH_i + W_i \quad (3)$$

Conservación de gas seco:

$$\frac{\partial(MG_i)}{\partial t} = FG_{i-1} - FG_i \quad (4)$$

Conservación de energía en fase sólida (suponiendo ya estimado el coeficiente global de transferencia de calor y considerando la hipótesis de secadero adiabático, comprobando posteriormente su validez):

$$\begin{aligned} & \frac{\partial((Cp_s MS_i + Cp_a MA_i)TS_i)}{\partial t} = \\ & = (FS_{i-1}Cp_s + FA_{i-1}Cp_a)TS_{i-1} - (FS_iCp_s \\ & + FA_iCp_a)TS_i + U_iV(TG_i - TS_i) - W_iH_i \end{aligned} \quad (5)$$

La entalpía del agua que se está evaporando se puede expresar:

$$H_i = Cp_a TS_i + \lambda(TS_i) = Cp_h TS_i + \lambda$$

y combinando las ecuaciones de balance de materia:

$$\begin{aligned} & (Cp_s MS_i + Cp_a MA_i) \frac{\partial(TS_i)}{\partial t} = \\ & = (FS_{i-1}Cp_s + FA_{i-1}Cp_a)(TS_{i-1} - TS_i) + \\ & U_iV(TG_i - TS_i) - W_i((Cp_h - Cp_a)TS_i + \lambda) \end{aligned} \quad (6)$$

Conservación de energía fase gaseosa:

$$\frac{\partial(Cp_g MG_i TG_i + MH_i(Cp_h TG_i + \lambda))}{\partial t}$$

combinada de nuevo junto con las de balance de materia:

$$\begin{aligned} & (Cp_h MH_i + Cp_g MG_i) \frac{\partial(TG_i)}{\partial t} = \\ & = (FG_{i-1}Cp_g + FH_{i-1}Cp_h)(TG_{i-1} - TG_i) - \\ & U_iV(TG_i - TS_i) - W_iCp_h(TS_i - TG_i) \end{aligned} \quad (7)$$

Son evidentes las ecuaciones de humedad de sólido y vapor en base seca:

$$X_i = \frac{FA_i}{FS_i} \quad (8)$$

$$X_i = \frac{MA_i}{MS_i} \quad (9)$$

$$Y_i = \frac{FH_i}{FG_i} \quad (10)$$

$$Y_i = \frac{MH_i}{MG_i} \quad (11)$$

La relación entre la masa del gas contenida en una sección, su temperatura, su humedad y la masa de sólido que le acompaña (suponiendo gas ideal) es:

$$MG_i = (V - \frac{MS_i}{\rho_s}) \left(\frac{29 \cdot 18}{29Y_i + 18} \right) \frac{P}{R(TG_i + 273)} \quad (12)$$

La masa de sólido seco puede estimarse a partir del flujo, relacionándola con el tiempo de residencia:

$$MS_i = T_{res} FS_i \quad (13)$$

Este tiempo es difícil de obtener analíticamente. En una correlación propuesta por Saeman y Mitchell (A.H.Moss,1979) se estima un tiempo de residencia global a partir de longitud, diámetro, pendiente, velocidad de giro y una constante a que depende del diseño y la alimentación:

$$T_{res} = \frac{L}{a * rpm * D * \text{pte}}$$

Los parámetros del modelo relacionados con la cinética del secado se ajustan con datos experimentales de un túnel de secado de laboratorio, del que se obtuvieron curvas de velocidad de secado para diferentes geometrías de muestra, velocidad y temperatura del aire de secado (Arjona,1997), de modo que:

$$W_i = f(Dp, Bhi, TG_i, vgi) \quad (14)$$

Son necesarias expresiones para la base húmeda del sólido, velocidad y densidad del gas:

$$Bhi = \frac{X_i}{1 + X_i} \quad (15)$$

$$vgi = \frac{FG_i}{\rho_i \cdot \text{area}_i} \quad (16)$$

$$\rho_i = \frac{29 \cdot P}{R(TG_i + 273)} \quad (17)$$

4.1 MODELO DE HORNO

El estudio de un modelo riguroso del proceso de combustión que tiene lugar en el horno obliga

a realizar un análisis de muestras así como del rendimiento (pérdidas por inquemados, contenido de cenizas de los humos, pérdidas de calor por convección-radiación, etc. La notación empleada es:

V : volumen de la cámara de combustión (m^3).

MG : masa de gas contenida dentro de la cámara (kg).

Ta : temperatura ambiente ($^{\circ}C$).

T : temperatura a la salida ($^{\circ}C$).

Ya : humedad del ambiente (kg vapor/kg aire seco).

Y : humedad de los gases de combustión (kg vapor/kg gas seco).

FGa : flujo másico de aire seco a la entrada (kg/s).

FG : flujo másico de aire seco a la salida (kg/s).

$Fcomb$: flujo másico de combustible (kg/s).

Hp : poder calorífico del orujillo (kJ/kg comb húmedo).

η : rendimiento de la combustión, estimado en 0.9.

b : fracción húmeda del combustible (kg agua/kg comb húmedo).

R : constante de gases ideales.

Cp_g : calor específico del gas de salida (kJ/kg $^{\circ}C$).

Cp_{ga} : calor específico del aire ambiente (kJ/kg $^{\circ}C$).

Cp_h : calor específico del vapor del gas de salida (kJ/kg $^{\circ}C$).

Cp_{ha} : calor específico del vapor del aire ambiente (kJ/kg $^{\circ}C$).

Las ecuaciones que describen este modelo básico para una humedad y composición típica del orujillo empleado como combustible es:

Ecuación de conservación de la masa de gas:

$$\frac{\partial(MG)}{\partial t} = FGa - FG + Fcomb \cdot 0.94 \cdot \eta \cdot (1 - b) \quad (18)$$

Ecuación de conservación de la energía:

$$Cp_g \left(T \frac{\partial(MG)}{\partial t} + MG \frac{\partial T}{\partial t} \right) = +Fcomb \cdot Hp \cdot \eta + FGa(Cp_{ga} + Ya \cdot Cp_{ha})Ta - FG(Cp_g + Y \cdot Cp_h)T \quad (19)$$

Ecuación de gases ideales, donde P es la presión a la que opera la cámara de combustión (en general atmosférica):

$$MG = V \cdot \frac{29 \cdot 18 \cdot (1 + Y)}{18 + 29 \cdot Y} \frac{P}{R \cdot (T + 273)} \quad (20)$$

Ecuación de la fracción seca de humedad del gas:

$$Y = \frac{Ya \cdot FGa + Fcomb \cdot b + Fcomb \cdot 0.07 \cdot \eta \cdot (1 - b) \cdot 18/2}{FG} \quad (21)$$

El modelo se completa incluyendo una constante de tiempo, estimada experimentalmente del orden de 300 s, que describe el tiempo de preparación de la masa sólida antes de iniciar la combustión.

5 SIMULACIÓN

El lenguaje de simulación empleado ha sido Dymola: *Dynamic Modeling Laboratory* (versión 3.1.a). Dymola es un lenguaje orientado a objetos para el modelado de sistemas. El algoritmo de integración empleado es el Dassl, con paso de integración variable entre 0.1 y 1 s, dependiendo del horizonte de simulación. El secadero se ha discretizado en elementos de 1 metro de longitud. Todas las variables son calculadas en cada intervalo de integración para cada sección.

Además de evolución temporal de cada variable, es interesante atender a los valores del permanente (Holgado,1999). Se puede obtener una evolución espacial a lo largo del secadero para cambios en la sección de alimentación, generando información cualitativa y cuantitativa de las posibles perturbaciones. Se deduce una gran dependencia con el flujo y la temperatura de gases (fig. 4 y fig. 5), y con el régimen de giro, así como una muy escasa dependencia con la temperatura ambiente y la humedad de los gases de entrada.

Evolución de la humedad del sólido para diferentes flujos de gases.

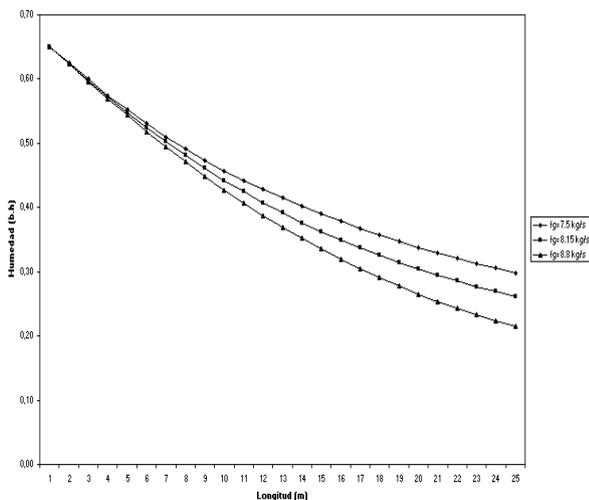


Figura 4: Evolución de la humedad del producto para diferentes flujos de gases

6 INSTRUMENTACIÓN

Se ha dotado a las plantas de secado de alpeorujos Aceites Pina S.A e Hijos de Espuny S.A, ubicadas en las localidades de La Carolina y Osuna respectivamente, de la instrumentación necesaria tanto

Evolución de la humedad del sólido para diferentes temperaturas de combustión.

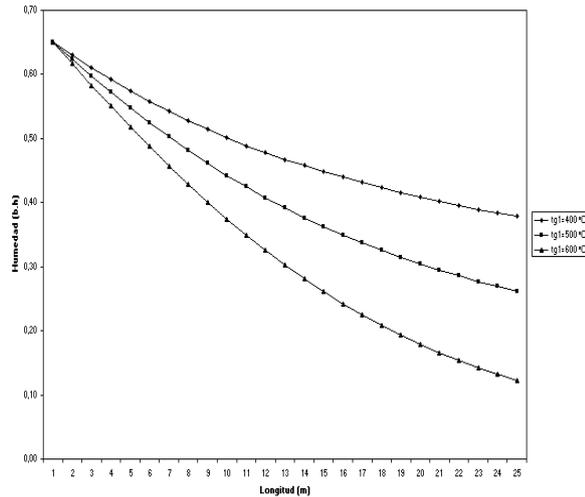


Figura 5: Evolución de la humedad del producto para diferentes temperaturas de gases

para realizar ensayos que proporcionen modelos dinámicos, como para la posterior automatización y control de la planta.

Se ha instalado un PLC modelo TSX57 Premium de Telemecanique comunicado con el ordenador a través de una red FIPWAY. Como Scada se ha empleado el programa Monitor Pro, también de Telemecanique. Los sensores instalados y su distribución (fig. 6) son:

- Temperatura del horno: Un termopar tipo K, con rango de 0-1000 °C.
- Temperatura de entrada: Tres termopares tipo K, con rango de 0-1000 °C, uniformemente repartidos en la sección de entrada al tromel.
- Temperatura de salida: Dos PT100, ubicadas a la salida del tromel.
- Humedad de gases de salida: Sensor capacitivo, que proporciona tanto humedad relativa como temperatura de los gases de salida.
- Caudal de gases de salida: Caudalímetro de gases, que proporciona tanto caudal como temperatura de humos en la chimenea.
- Temperaturas en el tromel: Seis termopares tipo K, con rango de 0-1000 °C, repartidos uniformemente a lo largo del tromel. Como era imposible el cableado directo al autómat, se optó por recoger estas seis medidas en un DataLogger, instalado sobre la propia superficie del tromel, para el almacenamiento y posterior volcado de datos a través del puerto serie durante las paradas. En la actualidad no

es necesario esperar al volcado, y se dispone de datos *on line* gracias a dos radio-modem inalámbricos instalados.

En la actualidad se está en fase de montaje de tres variadores de frecuencia para los motores que se han considerado posibles variables de actuación: quemadores de combustible, tornillo de alimentación y tromel. En entorno de comunicaciones con el autómatá será a través de una red UNITELWAY.

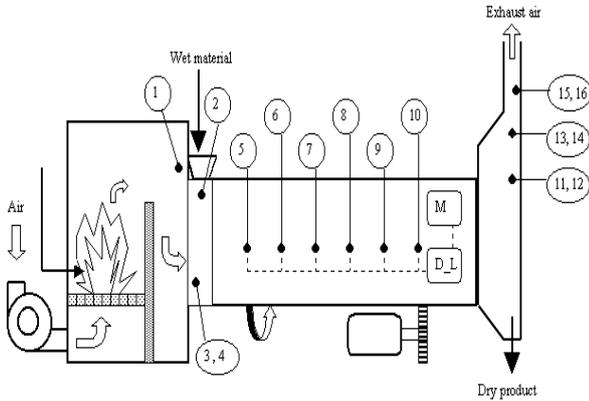


Figura 6: Distribución de sensores en la instalación

7 IDENTIFICACIÓN

Una vez realizada la campaña de toma de datos, se dispone de información suficiente para adaptar y corregir parámetros y correlaciones del modelo a una planta real. En concreto, la identificación se realizó sobre la planta de secado de Aceites Pina S.A.

Como ejemplo, a continuación se muestra la evolución de la temperatura de gases de salida ante variaciones del flujo de combustible (en la práctica única entrada al sistema), fig.7, y del flujo de alpeorujo procesado (considerado como perturbación), fig.8. Se observa como la respuesta del modelo sigue aproximadamente la del sistema real.

Para la síntesis de controladores será necesario disponer de un modelo lineal de la planta. Para ello se procede a la identificación sobre datos reales. Sin embargo, razones tecnológicas y económicas imposibilitan la aplicación de trenes de escalones a la entrada, además de no permanecer el sistema en un punto de trabajo estable. Si se aceptan como válidos los resultados procedentes del modelado, el simulador creado se puede utilizar para establecer un punto de operación y aplicar los cambios deseados en la entrada.

Se toman como variables de entrada al sistema

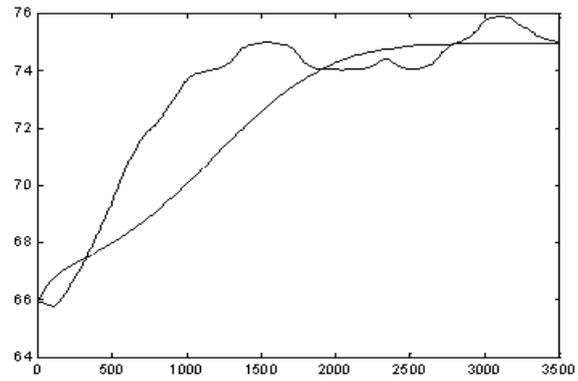


Figura 7: To real y simulada ante variación del flujo de combustible

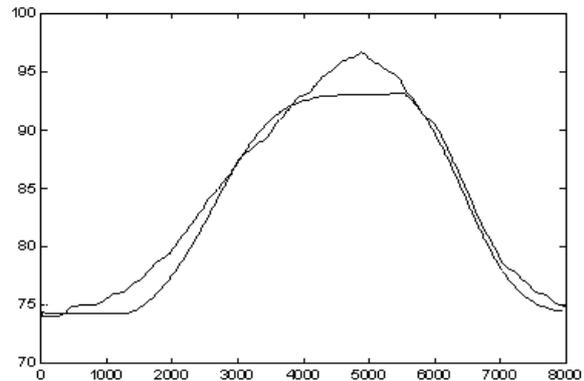


Figura 8: To real y simulada ante variación del flujo de alpeorujo procesado

el flujo de combustible (U_1) y el flujo de gases (U_2), en la práctica considerado como perturbación. Las variables de salida son la temperatura de gases a la salida y la humedad del producto (aunque ésta en la realidad es imposible de medir en continuo).

En fig. 9 se muestran la evolución (eliminando el offset) de T_o , generado con el simulador, y de su modelo lineal, generado mediante el toolbox de identificación lineal que incorpora *Matlab*, ante una sucesión de cambios a la entrada. Se observa que el modelo linealizado resultante sigue aproximadamente al del simulador. El modelo sólo será válido para señales de entrada cuya componente máxima de frecuencia sea menor que el ancho de banda de las señales de entrada empleadas.

La temperatura de gases a la salida se ha ajustado mediante un modelo 4 [4 4] [1 1], de modo que:

$$Y_k = 2.0983 \cdot Y_{k-1} - 1.4047 \cdot Y_{k-2} + 0.394 \cdot Y_{k-3} - 0.0921 \cdot Y_{k-4} + 6.305 \cdot U_{1k-2} - 7.2375 \cdot U_{1k-3} -$$

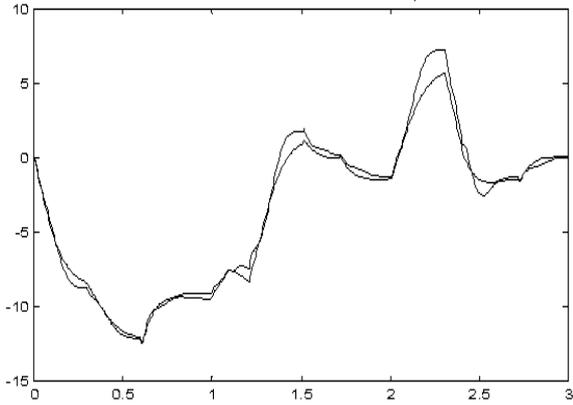


Figura 9: To simulada y linealizada ante variaciones en la entrada

$$\begin{aligned}
 & -0.0933 \cdot U1_{k-4} + 1.4896 \cdot U1_{k-5} + \\
 & + 0.222 \cdot U2_{k-2} - 0.5125 \cdot U2_{k-3} + \\
 & + 0.2171 \cdot U2_{k-4} + 0.0654 \cdot U2_{k-5} +
 \end{aligned}$$

En fig. 10 se representan la respuesta de To ante escalón unidad de flujo de combustible (derecha) y flujo de gases (izquierda).

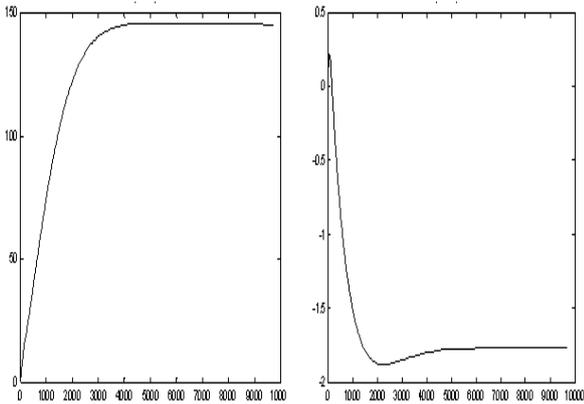


Figura 10: Respuesta de To ante escalón unidad en sus entradas

Análogamente, ante la misma sucesión de cambios en la entrada, en fig. 11 se muestra la evolución (eliminando el offset) de la humedad del producto, generado con el simulador, y de su modelo lineal.

La humedad de salida se ha ajustado mediante un modelo 3 [1 1] [8 3], de modo que:

$$\begin{aligned}
 Y_k = & 2.1672 \cdot Y_{k-1} - 1.3943 \cdot Y_{k-2} + 0.2242 \cdot Y_{k-3} - \\
 & - 0.0024 \cdot U1_{k-9} - 0.5264 \cdot 10^{-5} \cdot U2_{k-4}
 \end{aligned}$$

En fig. 12 se representan la respuesta de la humedad de salida ante escalón unidad de flujo de combustible (derecha) y escalón de valor 1000 de flujo de gases (izquierda).

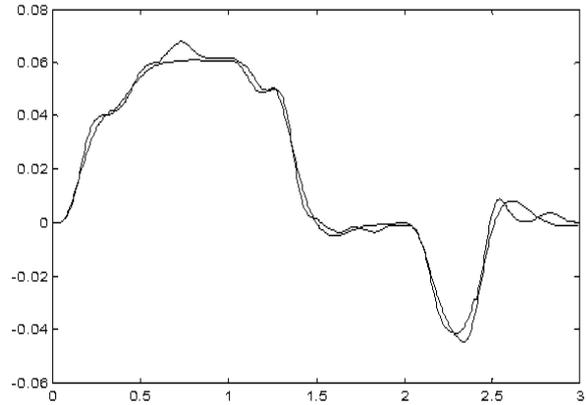


Figura 11: Humedad simulada y linealizada del producto ante variaciones en la entrada

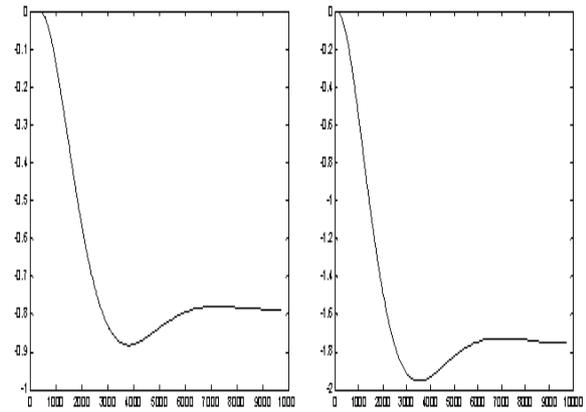


Figura 12: Respuesta de humedad de salida ante escalones de valor 1 y 1000 en sus entradas U1 y U2 respectivamente

8 CONCLUSIONES

El presente documento es una de las etapas del proyecto *Sistema de secado de orujo de oliva: diseño, control y optimización energética*, cofinanciado con fondos Feder, cuyos objetivos son la identificación de esquemas de diseño y operación de secaderos rotativos para orujo de dos fases y su automatización para que el proceso de secado sea controlado de forma óptima. La aplicación del proyecto responde a una necesidad real del sector industrial del aceite de orujo de oliva.

Una vez realizada la campaña de toma de datos para contrastar el modelo y ajustar parámetros, los pasos siguientes son:

- Especificación, adquisición y montaje del sistema de control.
- Análisis de diferentes configuraciones: uno o dos secaderos, disposición en iso o contracorriente, uno o dos generadores de gas de

secado, etc.

- Desarrollo de estrategias de control avanzadas: control LQG/LTR, control predictivo generalizado, control borroso

Por otro lado, se dispone de una planta piloto de secado en los laboratorios de la Escuela, dotada de una moderna instrumentación capaz de medir en continuo la humedad del producto, en la que se podrán realizar tantas pruebas se deseen para la aplicación de los distintos esquemas de control.

Agradecimientos

Expresar el agradecimiento a Pedro Ollero y Ricardo Arjona, del Dpto de Ingeniería Química y Ambiental de la Universidad de Sevilla, sin cuya ayuda hubiera sido imposible el desarrollo de este modelo. Este trabajo ha sido financiado por los fondos Feder y CICYT: 1FD97-0735, 1FD97-0836 y TAP98-0541.

Referencias

- [1] R. Arjona, "Análisis del Proceso de Secado de Alpeorujó", PFC Universidad de Sevilla, 1997.
- [2] K.J. Astrom and B. Wittenmark, "Computer Controlled Systems", Prentice-Hall. 1984.
- [3] E.F. Camacho, F.R. Rubio and J.A. Gutierrez, "Modelling and Simulation of a Solar Power Plant with a Distributed Collector System", *Preprints of the IFAC Symp. on Power Systems Modelling and Control Applications*, pp 11.3.1-11.3.5, Brusels, 1988.
- [4] J. Holgado, "Modelo dinámico y estrategias básicas de control para secadero rotativo de alpeorujó". PFC Universidad de Sevilla, 1999.
- [5] B.G. Liptak. "Optimizing dryer through better control". *Chemical Engineering*, pp 110-114, Feb. 1998.
- [6] B.G. Liptak. "Optimization of industrial processes". CRC Press, 1999.
- [7] A.H. Moss, G. Nonhebel. "El secado de sólidos en la industria química", Reverte, 1979.
- [8] F.B. Shinskey, "Process Control Systems", McGraw-Hill, New York, Fourth edition, 1996.