

Identificación y Control en Secadores Solares para Madera vía experimental

Experimental Identification and Control of Solars Dryers for Wood

*Yunier Iglesias Vaillant**, *Ania Lussón Cervantes***, *Jorge Bonzon Henríquez **,
*Orlando Escalona Costa**, *José Ignacio Robla Villalba****, *Luis Ruiz García*****

Iglesias Y., Lussón A., Bonzon J., Escalona O., Robla J. y Ruiz L. Identificación y control en secadores solares para madera vía experimental. Revista Inge@UAN Vol. 5 No. 10, 46-54 pp. 2015.

RESUMEN

En este trabajo se realizó el diseño e implementación de un experimento para la identificación experimental de dos prototipos de Secadores Solares para Madera: con Aporte Solar Térmico y con Almacenamiento de Energía en Agua. Se efectuó la identificación experimental mediante el método Error de Salida y se mostró la validación de ambos modelos. A partir del mejor modelo obtenido se desarrolla el diseño de un controlador Proporcional Integral para el control de humedad relativa en la cámara de secado de un Secador Solar para Madera con Almacenamiento de Energía en Agua, obteniendo el comportamiento de la humedad relativa deseada, lo cual se refleja en los resultados de simulación que se muestran. Finalmente se realizó la implementación práctica del control propuesto en dicho secador solar, donde se evidencio la efectividad del secado de madera vía solar con Almacenamiento de Energía en Agua.

Palabras clave: Secadores Solares, Energía Solar, Identificación, Sistema de Control.

ABSTRACT

This paper presents results of designing and implementation of experiments for modeling two prototypes of solar dryers: with solar thermal contribution and wood energy storage in water. In both cases, the mathematical model was obtained using experimental identification through Output Error. The best model is used for the controller Proportional Integral design in order to control the relative humidity in the drying chamber of a solar dryer for wood energy storage in water. Finally, the simulation and practical implementation of the dryer controlled are presented.

Key Words: Solar Dryers, Solar Energy, Identification, Control System.

Fecha de recepción: 2015-03-11 - Fecha aceptado: 2015-06-18

* Grupo de Energía Renovable Aplicadas, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad de Oriente, Cuba. yunier.iglesias@fie.uo.edu.cu, bonzon@fim.uo.edu.cu, orlando@fim.uo.edu.cu

** Dpto. Control Automático, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Oriente, Cuba. alusson@fie.uo.edu.cu

*** Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas de Madrid, Laboratorio de Sensorica Avanzada, Madrid, España.

**** Laboratorio de Propiedades Físicas de Productos Agrícolas y Tecnologías Avanzadas en Agroalimentación, Universidad Politécnica de Madrid, España. luis.ruiz@upm.es



I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el campo de las energías renovables ha cobrado importancia para el desarrollo sostenible. La energía solar se presenta como una alternativa eficiente y económica y una de las formas de aprovecharla es mediante su empleo en el secado de productos agrícolas. El desarrollo teórico y experimental del tema se observa a partir de 1960, donde, se aprecia el avance en el diseño de los secadores solares. Estos dispositivos básicamente se emplean para extraer el agua contenida en un producto determinado, manipulando la temperatura y humedad relativa del medio [13], [16].

Para realizar el proceso de secado existen dos métodos tradicionales [9].

- *Secado natural*: El producto es disperso en terrenos cementados, de ladrillos o en la planta de secado expuesto al sol.
- *Secado artificial*: se realiza en secadores mecánicos, como son los deshumidificadores, secadores al vacío, secadores de aire caliente.

Los secadores solares se conforman por dos elementos básicos: *el colector* donde la radiación solar es transformada en calor y *la cámara de secado* donde el producto es deshidratado. La disposición de estas partes determina en general la forma de calentamiento solar, dando lugar a: *secador solar indirecto, directo y mixto*.

Se han desarrollado disímiles diseños que buscan aumentar el aprovechamiento de la radiación solar en el secado de los productos. Los diseños más comunes son: *Secadores a base de colectores solares a aire y Secador solar de inversadero* [8].

En la actualidad existe una gran diversidad de diseños de secadores solares aplicados a gran y pequeña escala para la industria agropecuaria, maderera y en el ámbito doméstico, pueden emplearse en todo tipo de alimentos, desde carnes y pescados hasta hortalizas y vegetales [5], [6].

Las técnicas de control automático pueden emplearse para la optimización de los secadores, con vistas a lograr un mejor aprovechamiento de las posibilidades que estos brindan. Para aplicar

las técnicas de control es recomendable contar con un modelo matemático del proceso a controlar, que ayude a determinar los parámetros, la estructura y las características dinámicas del mismo. Este proceso se denomina “Identificación de Sistemas” [1], [14].

El procedimiento de identificación posee dos vertientes fundamentales: analítica y experimental [3]. En la práctica, lo ideal es recurrir a una mezcla de ambos métodos de modelado para obtener el modelo final. El uso de datos reales para identificar los parámetros del modelo provee a este de mayor exactitud, pero el proceso de identificación se ve tanto más facilitado cuanto mayor sea el conocimiento sobre las leyes físicas que rigen el proceso [4], [10], [11], [18], [19].

En la Universidad de Oriente, Cuba, en el Grupo de Energía Renovable Aplicada (GERA), existen prototipos de secadores solares, empleados para estudiar el proceso de secado de diferentes productos agrícolas, y las posibilidades de estos para la sustitución de las formas de secado tradicional. Estos equipos no están automatizados lo que provoca dificultades en la realización de experimentos que permitan elaborar los programas de secado de los productos agrícolas.

Esta investigación tiene como objetivo realizar la identificación experimental de dos prototipos de secadores solares: Secador para Madera con Aporte Solar Térmico (SSM-AST) y el Secador Solar para Madera con Almacenamiento de Energía en Agua (SSM-AEA), ubicados en el GERA. Dicha identificación se realiza mediante el método Output-Error (OE) y se muestra la validación de ambos modelos obtenidos.

Con el SSM-AEA, se obtienen los mejores resultados, por lo que con este modelo se diseña un sistema de control con algoritmo Proporcional Integral (PI), con la finalidad de controlar la humedad relativa en la cámara de secado del Secador en cuestión. Los resultados se reflejan mediante las simulaciones desarrolladas. Por último, se realiza la implementación práctica en el polígono del GERA del control propuesto en dicho secador solar, donde se evidencia la efectividad de esta propuesta.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Secadores Solares bajo estudio

A continuación se describen los dos secadores solares ubicados en el GERA sobre los que se realizan los experimentos de identificación.

En la figura 1 se presenta el SSM-AST. El colector (2) es donde se recibe la radiación solar para calentar aire que es absorbido del medio ambiente (1). El aire que va a ser calentado fluye por conductos, a través del colector donde absorbe el calor. Una vez calentado el aire, es impelido hacia la cámara de secado (4) por un ventilador (3), este aire caliente y con baja humedad relativa, extrae el agua de la materia que se desea deshidratar y sale a la atmósfera cargado de humedad y con menor temperatura o puede ser recirculado mediante la apertura o cierre de la compuerta de recirculación (5), con el fin de variar la temperatura y humedad del aire de alimentación del ventilador.

El segundo prototipo, el SSM-AEA, es del tipo indirecto, su colector solar está formado por un calentador de agua solar y un intercambiador de calor (figura 2).

El calentador de agua está compuesto por 15 tubos de superficie selectiva evacuados al vacío

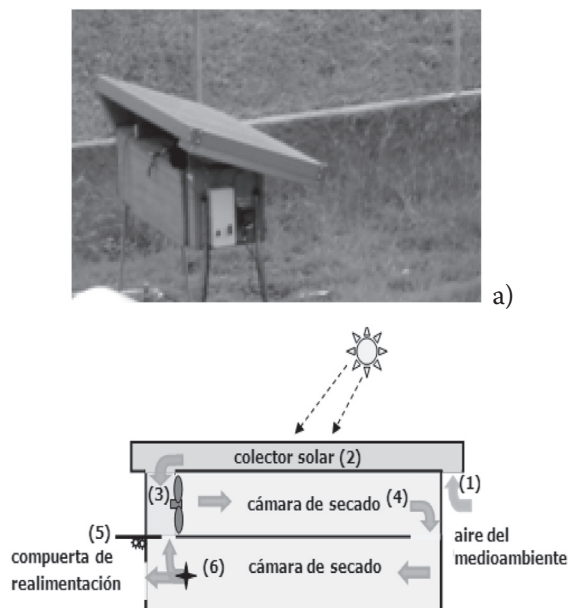


Figura 1. SSM-AST. a) Foto, b) Flujo tecnológico.

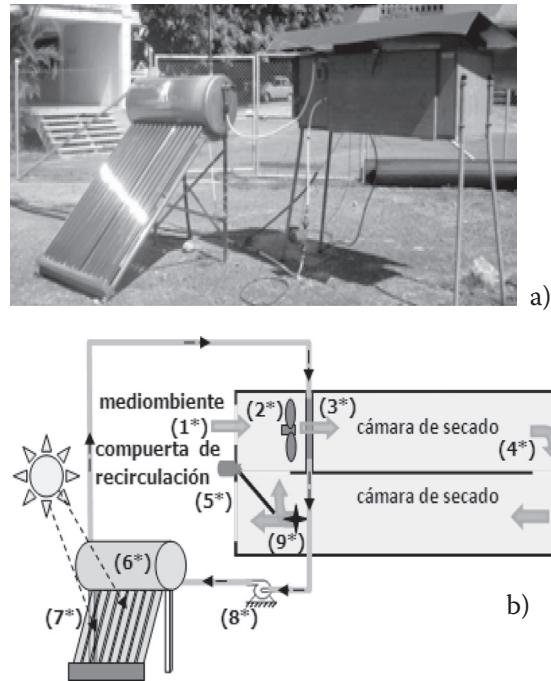


Figura 2. SSM-AEA. a) Foto, b) Flujo tecnológico.

(7*), en los que se colecta la radiación solar y un tanque almacenador de agua que realiza la función de termo acumulador (6*). El agua caliente producto de la conversión de radiación solar en calor dentro de los tubos selectivos es acumulada en el tanque. La misma se hace circular por medio de una bomba (8*) a través de los conductos de un intercambiador (3*) ubicado dentro de la cámara de secado (4). Un ventilador (2*) ubicado cerca del intercambiador, fuerza a pasar aire proveniente del medio ambiente o del interior de la cámara de secado por el intercambiador extrayendo el calor contenido en el agua que circula por este. Una vez calentado, el aire circula por el interior de la cámara para extraer el agua contenida en el producto que se desea deshidratar y sale a la atmósfera o es recirculado en dependencia de la posición de una compuerta de recirculación (5*). El agua que ha circulado por el intercambiador retorna al tanque almacenador para ser calentada nuevamente, cerrando así el sistema.

B. Identificación experimental

El proceso de identificación experimental comprende los siguientes pasos [12]:

1. Obtención de datos de entrada – salida: para ello se debe excitar el sistema mediante la aplicación de una señal de entrada y registrar la evolución de sus entradas y salidas durante un intervalo de tiempo.
 2. Los datos registrados están generalmente acompañados de ruidos indeseados que es necesario corregir antes de iniciar la identificación del modelo. Se trata, por tanto, de “preparar” los datos para facilitar y mejorar el proceso de identificación.
 3. Elección de la estructura del modelo: si el modelo que se desea obtener es un modelo paramétrico, el primer paso es determinar la estructura deseada para dicho modelo. Este punto se facilita en gran medida si se tiene un cierto conocimiento sobre las leyes físicas que rigen el proceso.
 4. Obtención de los parámetros del modelo: se procede a la estimación de los parámetros de la estructura, que mejor ajustan la respuesta del modelo a los datos de entrada-salida obtenidos experimentalmente.
 5. Validación del modelo: consiste en determinar si el modelo obtenido satisface el grado de exactitud requerido para la aplicación en cuestión.
- los secadores solares son: latitud: 20.02472 y longitud: -75.82194.
 2. En los días que se realizan las mediciones se debe medir el índice de irradiación solar.
 3. Las variables controlada y manipulada son humedad relativa y posición de la compuerta de recirculación, respectivamente.
 4. La señal de excitación es una Secuencia Binaria Pseudo-Aleatoria (SBSA) y se realiza a través de la posición de la compuerta de recirculación. El tiempo de conmutación de la señal binaria debe estimarse, atendiendo a consideraciones prácticas y a la dinámica del proceso en cuestión. De aquí la decisión de emplear un tiempo de conmutación de la SBSA de 100 s.
 5. El tiempo de muestreo utilizado es de 10 s.
 6. La carga en la cámara de secado: en vacío.
 7. La instrumentación empleada (sensores, elementos de acción final y software para la excitación del sistema y recogida de las mediciones).
 8. El resto de los actuadores se mantuvieron en el 100% de su salida durante los experimentos (ventilador (para ambos secadores) y bomba (Secador con Almacenamiento de Energía en Agua).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Diseño del experimento- Identificación del secador

El diseño de los experimentos para obtener los juegos de datos de entrada-salida, comprenden una parte importante del trabajo para realizar la identificación de cualquier sistema por la vía experimental. En esta sección se describen los experimentos que se realizan en los dos secadores solares ubicados en el GERA: SSM-AST y SSM-AEA, presentando los resultados de la identificación experimental realizados a ambos prototipos. Para la implementación de los experimentos se establecen las siguientes condiciones:

1. El horario para realizar los experimentos es de 11.00 a.m. a las 12.30 p.m. y las coordenadas geográficas de donde se encuentran ubicados

Bajo las condiciones antes descritas, se procede a seleccionar el punto de medición de la humedad relativa, así como el tipo de sensor a emplear, para ello se tuvieron en cuenta los resultados de los experimentos realizados durante el desarrollo del proyecto “*Supervisión automatizada de secaderos de madera con aporte solar térmico con sensores de bajo costo*” y se determina que el punto óptimo para medir la humedad relativa se encuentra en la región donde la compuerta de recirculación desvía el aire que proviene del interior de la cámara de secado, ya que en este punto es donde se puede registrar la humedad relativa total con que sale el aire de la cámara de secado [7].

Los sensores seleccionados para efectuar las mediciones fueron los SHT75 de la compañía *SENSIRION*, estos son sensores digitales de temperatura y humedad relativa y su ubicación

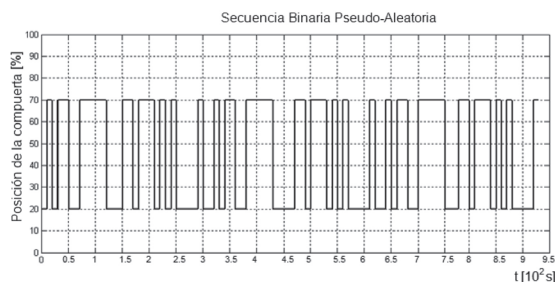


Figura 3. Señal excitación posición de la compuerta de recirculación.

en los secadores solares bajo estudio está dada por (6) para la figura 1 y (9*) para la figura 2, respectivamente.

En el diseño del experimento, con vistas a la identificación del secador de madera del GERA se toma como punto de operación, el 50% del desplazamiento total de la compuerta de recirculación y se hace variar ésta en correspondencia con la SBSA en un $\pm 20\%$ asignándose los valores 20% y 70% para “0” y “1”, respectivamente, como se muestra en la figura 3. La utilización práctica de esta secuencia consiste en la asignación de 2 valores de la variable de entrada (posición de la compuerta de recirculación), que corresponden al “0” y al “1”. El 20% corresponde al “0” y el 70% al “1”.

Bajo estas condiciones se obtienen los datos a emplear en la identificación de los secadores bajo estudio.

A.1 Identificación del secador - Obtención del modelo

Existen diferentes formas de representar el modelo de un proceso [2]. En los casos de estudio analizados, se prueban con los modelos ARX (Auto-Regressive eXogen), y OE, finalmente la identificación del sistema se desarrolla por la estructura OE, obtenido por el método de mínimos cuadrados, pues fue el modelo que mejores resultados obtuvo.

En ambos secadores solares se tiene como objetivo controlar la humedad relativa (HR) y manipular la posición la compuerta de recirculación (ΔP) y el proceso de identificación se lleva a cabo bajo iguales condiciones, para los dos casos de estudio, empleando el toolbox IDENT del Matlab

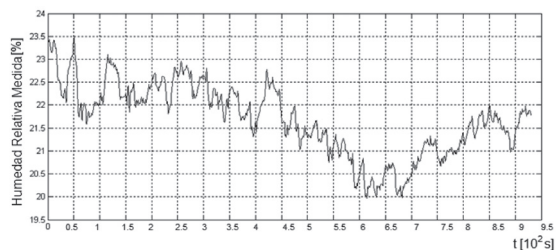


Figura 4. Salida HR en el SSM-AST

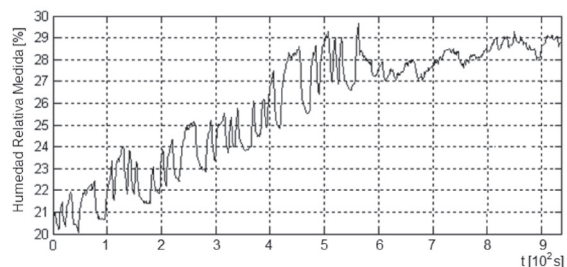


Figura 5. Salida HR en el SSM-AEA

Tabla 1. Modelos de los secadores solares para madera

Secador	Parámetro Modelo OE	Error medio cuadrático	Función de Transferencia
SSM-AST	$nb = 2$	0.2555	$\frac{HR(s)}{\Delta P(s)} = \frac{0.006s + 0.002}{s^2 + 2.16s + 0.012}$
	$nf = 2$		
	$nk = 1$		
SSM-AEA	$nb = 2$ $nf = 2$ $nk = 1$	0.1015	$HR(s) = -0.001s + 0.005$

[15]. Las figuras 4 y 5, muestran el comportamiento de la salida HR de los secadores, bajo las condiciones descritas en la sección anterior.

Del conjunto de datos entrada-salida disponible, la primera mitad se usa con propósitos de estimación, y la segunda mitad, para la validación. Aplicando el método de mínimos cuadrados, a través del Matlab, se obtuvieron los modelos para ambos secadores de madera, los cuales se muestran en la tabla 1.

A.2 Identificación del secador - Validación del modelo

La validación, se realiza con datos que no se tuvieron en cuenta en la identificación y los resultados se muestran en las figuras 6 y 7.

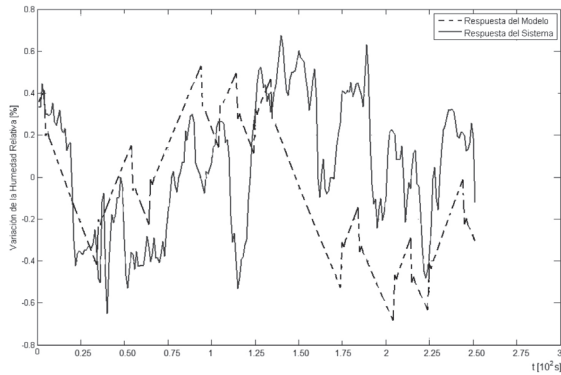


Figura 6. Salida del modelo y del proceso (SSM-AST).

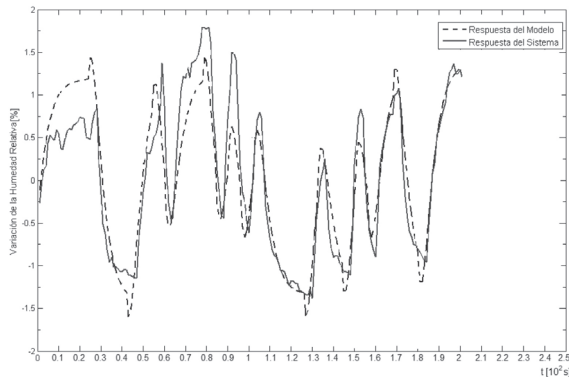


Figura 7. Salida del modelo y del proceso (SSM-AEA).

Analizando los resultados de las gráficas obtenidas (figuras 6 y 7), y los valores de error mostrados en la tabla 1 puede apreciarse que los mejores resultados en la validación han sido para el SSM-AEA, donde se aprecia que la estructura de modelo seleccionada describe de forma adecuada el comportamiento dinámico de la humedad relativa del secador bajo estudio, es decir la salida del modelo se aproxima considerablemente a la salida del secador.

B. Diseño y simulación del sistema de control en el secador solar para madera con almacenamiento de energía en agua

A partir de las conclusiones derivadas de la identificación, se decide implementar un algoritmo de control PI en el SSM-AEA, con vistas al control de la humedad relativa en la cámara de secado mediante la manipulación de la posición de la compuerta. Bajo la acción PI, se reduce notablemente el error a estado estacionario de la salida.

Inicialmente para realizar el ajuste de los parámetros del controlador PI discreto para cambios en el punto de operación, mediante el método de Integral del Tiempo por el Error Absoluto (ITAE) a lazo cerrado, es necesario un modelo de primer orden con tiempo muerto, por lo que se procede a realizar la aproximación del modelo dinámico de segundo orden representado en la ecuación (2) de la tabla 1, a un modelo de primer orden con tiempo muerto, empleando las ecuaciones de relación siguientes [17], [20]:

$$\frac{T}{T_1} = 0.828 + 0.812 \frac{T_2}{T_1} - 0.172 e^{-6.2 T_2 / T_1} \quad (3)$$

$$\frac{\theta}{T_1} = \frac{1.116 T_2}{T_1 + 1.208 T_2} \quad (4)$$

donde, T_1 y T_2 son constantes de tiempo del modelo segundo orden, T y θ son constante de tiempo y tiempo muerto del modelo de primer orden.

Entonces para realizar dicha aproximación se parte de la ecuación (2) de la tabla I y esta se lleva a un modelo que tenga tiempo muerto, obteniendo:

$$\frac{HR(s)}{\Delta P(s)} = \frac{-0.001s + 0.005}{s^2 + 0.63s + 0.1} = \frac{-2s + 1}{200s^2 + 120s + 20}$$

Luego se aplica el criterio de Padé: $e^{-2s} = 1 - 2s$, quedando,

$$\frac{HR(s)}{\Delta P(s)} = \frac{e^{-2s}}{200s^2 + 120s + 20} = \frac{e^{-2s}}{(118.3s + 1)(1.7s)}$$

resultando: $T_1 = 118.3 \text{ s}$; $T_2 = 1.7 \text{ s}$; $\theta_m = 2 \text{ s}$

Sustituyendo T_1 y T_2 en las ecuaciones de relación (3) y (4) se obtienen $T = 98.3 \text{ s}$ y $\theta = 1.77 \text{ s}$.

El tiempo muerto efectivo del modelo de primer orden se debe añadir al tiempo muerto del proceso real, para obtener el tiempo muerto real.

$$\theta_{mc} = \theta_m + 1.77 = 2 + 1.77 = 3.77$$

Obteniendo de esta manera el modelo de primer orden con tiempo muerto,

$$\frac{HR(s)}{\Delta P(s)} = \frac{e^{-3.77s}}{(98.3s + 1)} \quad (5)$$

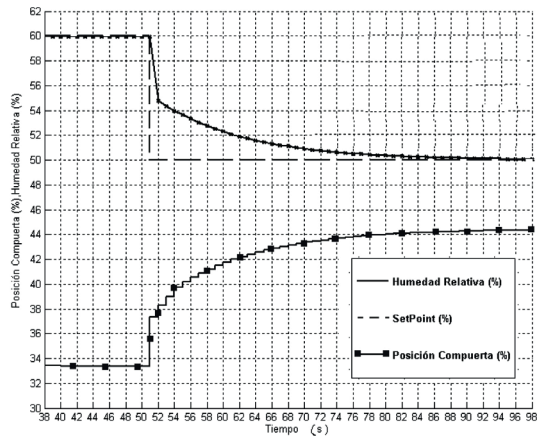


Figura 8. Control de *HR* en el secador para cambio en la referencia.

Aplicando el criterio de Aström y Wittenmark se selecciona el tiempo de muestreo de 6 s y los parámetros de ajuste del controlador PI son: $K_c = 0.45$ y $T_i = 81.93$ s.

Es importante destacar que en este tipo de secador influyen determinadas magnitudes medio ambientales impredecibles, tales como: la variación de la humedad relativa del medio ambiente, el nublado y la variación de la radiación solar. El almacenamiento de energía en agua para el caso bajo estudio permite amortiguar el efecto negativo de estas fluctuaciones (perturbaciones) sobre el proceso. Además en esta investigación para el caso del SSM-AEA, no es objetivo el control la temperatura debido a las propias características de la madera, pues para secar productos de este tipo lo más importante es el control de la humedad de la misma en la cámara de secado.

Los resultados de simulación se muestran en la figura 8, donde se aprecia como la salida de Humedad Relativa (*HR*) sigue el cambio establecido en la referencia al variar la posición de la compuerta.

C. Implementación práctica del sistema de control en el secador solar para madera con almacenamiento de energía en agua

Para realizar el ajuste y la evaluación del funcionamiento del control de humedad relativa implementado en el SSM-AEA ubicado en el

polígono del GERA, se emplean muestras de madera humedecidas artificialmente, las mismas se distribuyen longitudinalmente dentro de la cámara de secado (ver figura 9).

Se obtienen los resultados que se muestran en la figura 10, donde se puede apreciar el comportamiento de la humedad relativa dentro de la cámara de secado del secador mediante la acción del controlador PI, para un cambio en la referencia de un 10%, manipulando la posición de la compuerta. Las pruebas realizadas permiten concluir que el sistema de control desarrollado cumple con los requerimientos de la aplicación para el que fue diseñado.

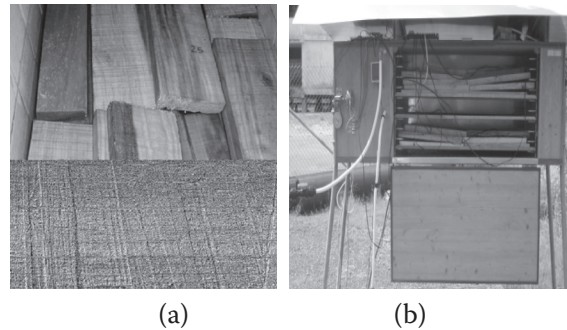


Figura 9. (a) Muestras de madera. (b) SSM-AEA.

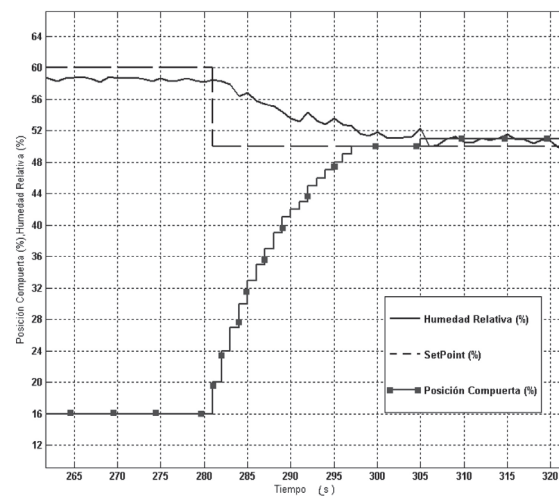


Figura 10. Resultados de la implementación práctica del control de *HR* en el secador para cambio en la referencia.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se mostró el diseño del experimento realizado para la obtención del conjunto de datos entrada-salida empleados en la identificación experimental de dos prototipos de secadores solares: Secador Solar para Madera con Almacenamiento de Energía en Agua y Secador para Madera con Aporte Solar Térmico, ubicados en el polígono del GERA.

Ambos diseños fueron identificados empleando el System Identification Toolbox del Matlab, obteniéndose para cada caso un modelo paramétrico con estructura OE. La validación de cada uno de estos modelos determinó que el mejor modelo obtenido fue para el caso del SSM-AEA, lo cual es resultado de la ventaja que representa para de este tipo de sistema el almacenamiento de energía.

Se implementó un control PI en el secador de madera solar de mejor modelo obtenido, obteniendo un efectivo control de la humedad relativa en la cámara de secado mediante la manipulación de la posición de la compuerta ante cambios en la referencia. Dicho resultado se corrobora mediante la implementación práctica de este sistema de control en el secador ubicado en el polígono del GERA.

Pues si bien la ventaja de este tipo de secadores es el empleo de la radiación solar como fuente de energía. La variación de la intensidad de la misma es la principal perturbación en el proceso de secado en estos dos prototipos. El almacenamiento de energía en agua para el caso bajo estudio permite amortiguar el efecto negativo de estas fluctuaciones sobre el proceso.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo representa la continuidad de los estudios realizados entre el Laboratorio de Propiedades Físicas y Tecnologías Avanzadas en Agroalimentación de la Universidad Politécnica de Madrid, España, el Laboratorio de Tecnología de Sensores del Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas en España y el GERA, en el desarrollo de los secadores solares como una opción para el secado de los productos agrícolas.

REFERENCIAS

- [1] A. Aguado, *Temas de identificación y control adaptable*, La Habana, Cuba: Editorial Palcien, 2000.
- [2] P. Arafet, F. Chang, H. Domínguez, *Monografía Identificación de Sistemas*, Santiago de Cuba, Cuba: Editorial Monografía de excelencia-UO Universidad de Oriente, 2004.
- [3] N. Bekkioui, A. Zoulalian, A. Hakam, F. Bentayeb y A. Sesbou, "Modelling of a Solar Wood Dryer with Glazed Walls", *Revista Maderas. Ciencia y Tecnología*, vol.11, no. 3, pp. 191-205, 2009.
- [1] R. Beltrán y M. Jordán, "Optimal identification of potential-radiation hydrodynamics for moored floating structures - a new general approach in state space", *Revista Ocean Engineering*, vol.31, pp. 1859-1914, 2004.
- [2] F. Bentayeb, N. Bekkioui y B. Zeghmati, "Modelling and simulation of a wood solar dryer in a Moroccan climate", *Renewable Energy*, vol. 33, pp. 501-506, 2008.
- [3] S. Boughali, *Crop drying by indirect active hybrid solar Electrical dryer In the eastern, Algerian Septentrional Sahara*: Associate Editor I. Farkas, 2009.
- [4] J. Bonzon, Proyecto Internacional: "Supervisión automatizada de secaderos de madera con aporte solar térmico con sensores de bajo costo", GERA, Universidad de Oriente, Cuba, 2009.
- [5] S. Corp, Diseño de secadores solares, Tesis doctoral. ISPJAE, Ciudad de La Habana, Cuba, 1998.
- [6] R. Escobar, Secador solar de madera y otros productos agrícolas, Tesis Doctoral, Universidad de Colombia, Colombia, 2005.
- [7] S. Garrido, Identificación, Estimación y Control de Sistemas No-lineales mediante RGO, Tesis doctoral, Universidad Carlos III, Madrid, España, 1999.
- [8] M. Irizar, "La inteligencia computacional en la identificación de sistemas", *Revista Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, vol. 26, no. 1, pp. 35-41, 2005.

- [9] M. Jordán, *Modelación e Identificación de Sistemas Dinámicos: Teoría y Herramientas*, Bahía Blanca. Argentina: Editorial UNS, 1996.
- [10] M. Lara, “Escenario energético mundial”, *Revista DYNA*, vol. 82, no.9, pp. 471-478, 2007.
- [11] L. Ljung, *System Identification: Theory for the User*, N. J., Estados Unidos: Editorial Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1987.
- [12] L. Ljung, *System Identification Toolbox, Matlab 7*, The MathWorks, Estados Unidos, 2004.
- [13] A. Montesino, *Hacia la Cultura Solar*, La Habana, Cuba: Editorial CubaSolar, 2da. Edición, 2006.
- [14] K. Ogata, *Ingeniería de Control Moderna. Tomo I*. N. J., Estados Unidos: Editorial Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A, Tercera Edición, 1998.
- [15] A. Saleh y I. Badran, “Modeling and experimental studies on a domestic solar dryer”, *Renewable Energy*, vol. 34, pp. 2239–2245, 2009.
- [16] T. Söderstrom y P. Stoica, *System Identification*, Estados Unidos: Editorial Prentice-Hall International, Hemel Hempstead, Hertfordshire, 1989.
- [17] C. Smith y Corripio, *Principles and Practice of Automatic Process Control*, Estados Unidos: Editorial Prentice-Hall Second Edition, 1997.