

# **SUPERVISION MULTIDISTRIBUIDA DE UN SECADERO SOLAR DE MADERA EMPLEANDO SENSORES DE BAJO COSTE**

Juliá, E.<sup>1</sup>; Barreiro, P.<sup>2</sup>; Bonzon, J.<sup>2</sup>; Robla, J.<sup>3</sup>; Ruiz-García, J.L.<sup>2</sup>; Escalona, O.<sup>1</sup>; Diezma, B.<sup>2</sup>; García-Hierro, J.<sup>3</sup>; Camps, M.<sup>1</sup>

1. Laboratorio de Energías Renovables. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba
2. Dpto. Ingeniería Rural. Universidad Politécnica de Madrid. España
3. Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas. CSIC. España

## **ABSTRACT**

Multi-distributed supervision of wood in solar dryers is carried out by means of high performance low cost ambient sensors. An experimental dryer of 0.3 m<sup>3</sup> is used for testing the proposed instrumentation mainly based on thermocouples and SENSIRION™ which are combined with the psychometric model defined by ASABE in order to assess the amount of water released by the wood during the drying process. Continuous monitoring enables the implementation of automated control of the dryer by means of regulating the fan speed and the amount of re-circulated air.

## **INTRODUCCIÓN**

En el proceso industrial maderero el 80% del consumo energético corresponde a la operación de secado (Reeb, 1997). El secado artificial se puede realizar utilizando diferentes procedimientos, el más común es el empleo de hornos que utilizan aire caliente y combustible fósiles. Algunos países industrializados disponen de tecnologías más eficientes (secado al vacío, por alta frecuencia y otras) pero su coste las hace aún inalcanzables para muchos países en vías de desarrollo (Plumptre, 1996).

Ya desde comienzos de los años 90 del siglo XX diversos países (desarrollados y en vía de desarrollo) han comenzado a emplear radiación solar para el calentamiento del aire de los secaderos (Sattar, 1993). La principal limitación de la energía solar está vinculada a su disponibilidad, pues según la latitud, la densidad de la radiación solar es mayor o menor por lo que para algunos países, como los que se encuentran en la franja inter-tropical, resulta más ventajoso el uso de esta fuente de energía. Cuba, situada en zona privilegiada desde la perspectiva del aprovechamiento de la energía solar, recibe anualmente como promedio 5 kW por hora sobre cada m<sup>2</sup> de su superficie (Bérriz y Deas, 1990). Con la cantidad de energía que se puede obtener por esa vía es posible secar toda la madera que se procesa actualmente si existieran las instalaciones necesarias.

En la actualidad Cuba dispone de 2.713 ha de bosques (24,7% de la superficie total), de las cuales 230 ha se dedican a la producción. Según estudio realizado por la FAO durante el período 2000-2005 Cuba se encuentra entre los únicos 10 países a nivel mundial que han logrado un aumento neto de bosques de 5,1 millones de hectáreas por año, gracias a los esfuerzos de reforestación y a la expansión natural de los bosques (FRA, 2005).

El sector forestal cubano ha trazado una estrategia de desarrollo que prevé la modernización, ampliación y diversificación de la industria forestal y la asociación con capital extranjero para obtener financiamiento, tecnologías y mercados. Dentro de esta estrategia se incluyen un grupo de proyectos para la modernización y ampliación de la capacidad de un grupo de aserraderos así como la construcción de otros nuevos en diferentes regiones del país como Isla de la Juventud, Pinar del Río, Ciénaga de Zapata en Matanzas y Guamá en Santiago de Cuba, Moa en Holguín. En la actualidad existen 7 instalaciones de secado de madera con una capacidad de 850 m<sup>3</sup> por proceso. Se prevé en los próximos años instalar 14 plantas adicionales con una capacidad de 1.165 m<sup>3</sup> por proceso lo que permitirá

secar por este método alrededor de 65.000 m<sup>3</sup> de madera, equivalente a menos de la cuarta parte del total de madera aserrada que se produzca. Con esta acción se incrementa notablemente la calidad del producto final con el consiguiente aumento de los precios y ganancias sustantivas para las empresas forestales (Herrero, 2004).

La situación expuesta, junto con el análisis de los trabajos de investigación y divulgación publicados en los últimos años permite deducir que existe un margen real de mejora de los procesos de secado siendo la **energía solar térmica un aporte energético** significativo especialmente en zonas de elevada radiación solar directa. Resulta asimismo imprescindible **supervisar** adecuadamente y de forma **multidistribuida** el producto, de manera que los sistemas de control ambiental dentro del secadero sean susceptibles de ser optimizados.

## OBJETIVOS

La **Universidad Politécnica de Madrid**, y la **Universidad de Oriente** se encuentran desarrollando un proyecto de investigación conjunto financiado por la Agencia Española para la Cooperación Internacional y el Desarrollo (AECID). Este proyecto plantea la viabilidad e interés de supervisar secaderos solares de madera de forma multidistribuida empleando para ello sensores de bajo coste.

En este trabajo se presentan algunos de los objetivos integrados en el proyecto:

- Integración multi distribuida de sensores de temperatura y humedad relativa de bajo coste y alta fiabilidad
- Supervisión de los parámetros ambientales del secadero en una planta piloto

## METODOLOGÍA

Los parámetros ambientales decisivos en la supervisión del secado de la madera, son la temperatura, humedad relativa y velocidad del aire.

Los rangos de temperatura empleados en el secado industrial de madera mediante energía solar se clasifican en bajos (hasta 60-65 °C) y medios (80-90 °C). El primero se emplea con colectores solares planos, mientras que los segundos se utilizan con concentradores solares. Estos últimos pueden alcanzar temperaturas superiores a los primeros aunque precisan sistemas de seguimiento de la trayectoria del sol que encarecen la instalación. Por otra parte, el secado de madera a alta temperatura (> 100 °C) y ultra alta temperatura (> 150 °C) demandan otros requerimientos de las instalaciones que las hacen aun más caras. Las altas temperaturas pueden causar daños irreparables en la madera si no se controla adecuadamente los otros parámetros del proceso (Jankowsky, 2006). También las bajas temperaturas pueden causar la destrucción de la madera por la aparición de los hongos que la pudren. (Reeb, 1997).

Los rangos de velocidades de aire empleados son muy estrechos y oscilan entre 0,5 – 0,8 y 1,0 – 1,2 m/s. pudiendo estar entre 1 y 5 m/s en el caso de secaderos de grandes dimensiones, generalmente convencionales (Jankowsky, 2006). Las bajas velocidades del aire favorecen la aparición de hongos ya que dificultan la extracción de la humedad superficial, mientras que las altas velocidades provocan la extracción acelerada de la humedad superficial que favorece la aparición de tensiones superficiales que provocan la deformación de la madera, a veces irreparables. Para la determinación de la velocidad de rotación adecuada del ventilador para unas condiciones dadas se realizan estudios con el empleo de sensores de velocidad como los de hilo caliente, muy compactos, manuales y precisos.

El control de la humedad relativa no deja de ser menos importante. Valores altos de humedad relativa propios de zonas tropicales dificultan el proceso de secado ya que en esas

condiciones el aire es prácticamente incapaz de extraer húmeda de la madera. El conocimiento de los fundamentos de la psicrometría del aire es fundamental para calcular la capacidad de éste de extraer el agua de la madera de forma eficiente. El modelo psicrométrico ASABE permite el cómputo y seguimiento detallado del proceso de secado (ASAE D272.1, ASABE 2006).

Estos tres parámetros fundamentales no pueden ser considerados independientemente uno del otro porque ellos guardan una estrecha relación con la calidad óptima del producto final del proceso de secado de la madera.

El control de secado de la madera en los secadores que utilizan una fuente de energía convencional (Gasoil, electricidad, etc.) se realiza mediante la regulación del suministro de calor generado a partir de la fuente de energía, de manera que el tiempo de secado puede determinarse fácilmente. Sin embargo, en los secadores solares, al funcionar estos mediante el aprovechamiento de la energía proveniente de la radiación solar que presenta la característica de ser inestable e impredecible, resulta más difícil controlar la temperatura y por tanto conocer el tiempo que demorará el secado. Es por eso que el sistema de control resulta más complejo.

Por todo ello, el control de los secaderos solares ha de realizarse de forma continua en relación con las condiciones ambientales exteriores e interiores de la madera. En este trabajo se han instalado en una instalación experimental una batería de sensores ambientales de alta fiabilidad y bajo coste.

### Instalación de secado

El secadero solar (Figura 1) empleado es en la actualidad una **instalación experimental** (0,3 m<sup>3</sup> de capacidad) cuyo esquema se incluye en la Figura 2, donde los números indican los distintos elementos: colector solar (1), ventilador (2), cámara de secado (3), bandeja de separación de maderas (4), compuerta de regulación de la recirculación (5) y zona de mezcla o *plenum* (6). Por otra parte en dicho esquema las letras refieren a los distintos movimientos o trasiegos de aire: A es la entrada de aire desde el exterior; B es la salida del aire del colector; C es el conjunto de ranuras dispuestas entre las maderas a modo de canales para el paso de aire en flujo laminar; D es la salida de aire al exterior; y E es la recirculación de aire al interior del secadero.



Figura 1. Vista frontal del secador solar experimental. Vista lateral con detalle del colector solar.

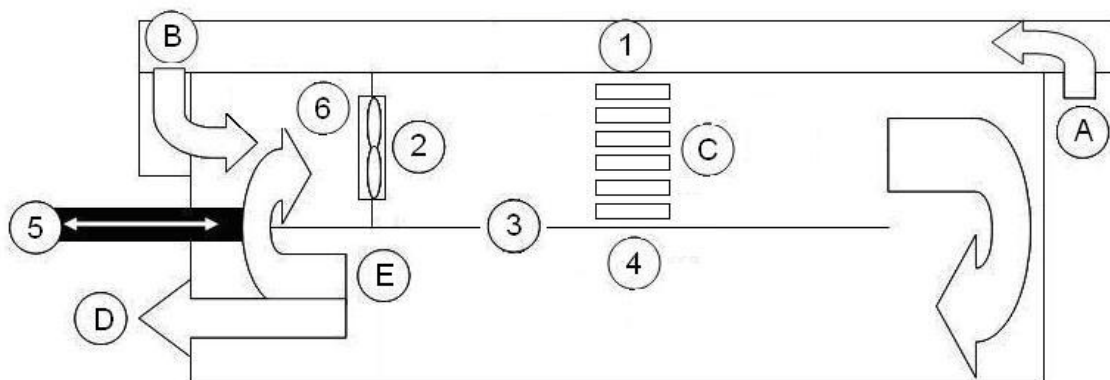


Figura 2. Esquema del secador solar con indicaciones de los elementos constitutivos (números), y de los trasiegos del aire (letras).

### Sensórica

La sensórica instalada en el prototipo experimental se describe a continuación: termopares tipo T, SENSIRION™ (para la determinación de temperatura, humedad relativa y humedad absoluta) y prototipos de sensores de velocidad del aire y de la madera capacitivos de reciente desarrollo.

La compañía sueca Sensirion fabrica diferentes modelos de **sensores de temperatura y humedad relativa de bajo coste** (inferior a 20 euros/unidad) y alta fiabilidad. Estos sensores se caracterizan por poseer dimensiones muy pequeñas. Están compuestos por tres zonas: la cabeza (donde se encuentra el sensor propiamente dicho), un puente que une a ésta con los terminales, el puente es la zona más estrecha y débil lo que los hace muy frágiles por lo cual hay que manipularlos con mucho cuidado, la función del mismo es disminuir al máximo posible la conducción de calor y el tiempo de respuesta, la conexión del sensor con el circuito que envía los datos al ordenador se realiza mediante los cuatro terminales que posee en el extremo opuesto al sensor (Figura 3). La señal de salida es digital. El consumo de potencia es muy bajo. La tensión de alimentación con que trabajan estos sensores está entre 2.4 y 5,5 V. El rango de medida de la humedad relativa es de 0 a 100 % mientras que el de la temperatura es de  $-40$  hasta  $123,8$  °C. Por lo que se adaptan a las condiciones esperables en el secador. Para utilizarlos se construyó un circuito que es el encargado de adquirir los datos y almacenarlos en el ordenador. El circuito está formado básicamente por dos microprocesadores, resistencias y condensadores y permite la conexión de hasta ocho sensores.



Figura 3. Sensor SENSIRION™

Los **sensores de velocidad** del aire más utilizados son los llamados anemómetros de hilo caliente (Hot Film Anemometer - HFA, en inglés) que permiten medir velocidades del aire por debajo incluso de los  $0,5$  m/s y cuyo principio de funcionamiento se basa en calentar un filamento (Calentador), caracterizado por su potencia eléctrica, que es enfriado por el flujo de aire, caracterizado por su velocidad y temperatura ambiente, hasta alcanzarse un equilibrio entre el calor generado en el calentador y la pérdida de calor en el mismo.

En este trabajo se ha implementado un dispositivo recientemente patentado de sumo interés. El dispositivo se basa en un sensor de conductancia de capa límite y de velocidad de viento (Baille et al, 2003; Baille et al, 2006). Este sensor ha sido diseñado para medir la conductancia de capa límite de una superficie plana (disco, Figura 4) y deducir la velocidad de aire dentro de un espacio cerrado o poco ventilado (invernaderos, granjas, cámaras de cultivo, cámaras frigoríficas...). El conocimiento de estas dos variables, relacionadas con la intensidad de los intercambios en la superficie de un cuerpo (planta, animal, ser humano), permite precisar su balance de energía, así como su estado de estrés fisiológico, en un medio ambiente determinado. El sensor tiene interés en todo lo que se refiere al control de los sistemas de climatización, y en particular, en lo relativo a la ventilación de locales o espacios cerrados. La señal analógica del sensor permite su tratamiento y su integración en sistemas de regulación del clima y del ambiente.



Figura 4. Sensor de conductancia para la determinación de la velocidad de aire

El procedimiento de referencia para determinar el contenido en **humedad de la madera** es el llamado método gravimétrico que consiste en pesar una muestra de madera verde antes y después del secado en una estufa a 105 °C durante 24 horas, método destructivo y lento. Un procedimiento alternativo es el procedimiento eléctrico que aprovecha alguna de las propiedades eléctricas de la madera entre las cuales podemos citar la resistencia eléctrica o la capacitancia. Los métodos eléctricos pueden ser portátiles o de mesa, este método solo proporciona resultados confiables para contenidos de humedad entre 7 y 30 %, permiten el seguimiento en continuo durante el proceso de secado industrial.

La Norma Española UNE-EN 13183 en sus partes 1, 2 y 3 establece el procedimiento para determinar el contenido de humedad por el método gravimétrico, resistivo y capacitivo respectivamente. Clasificando la humedad en tres clases como sigue: Clase A 7 – 12 %, Clase B 10 – 18 %, Clase C 14 – 25 %.

Jankowsky y Gonzalvez (2006) refieren en un trabajo de revisión el uso de los higrómetros resistivos para realizar las mediciones del contenido de humedad en la madera con el objeto de controlar el comportamiento de este importante parámetro en el proceso de secado industrial. Estos autores resaltan la dificultad de efectuar determinaciones de humedad fuera del rango 7-30%.

En este trabajo se implementan métodos eléctricos de bajo coste, dado que los rangos a determinar se encuentran dentro de los recomendados para esta técnica.

El secadero experimental instrumentado con la sensórica descrita se ha empleado sistemáticamente en el periodo comprendido entre febrero y octubre de 2008. Los ciclos de secado se han seguido con cargas completas compuestas por tablas de 1 pulgada de espesor dispuestas en 8 alturas soportadas por separadores que configuran los canales para la circulación del aire (Figura 5).

Los sensores de humedad y temperatura, en los que se centran los resultados presentados en este trabajo, se han dispuesto en los siguientes puntos del secadero: a la entrada de aire desde el exterior (punto A en la Figura 2); a la salida del aire del colector (B); en las ranuras dispuestas entre las maderas (C) y en la salida del aire al exterior (D).

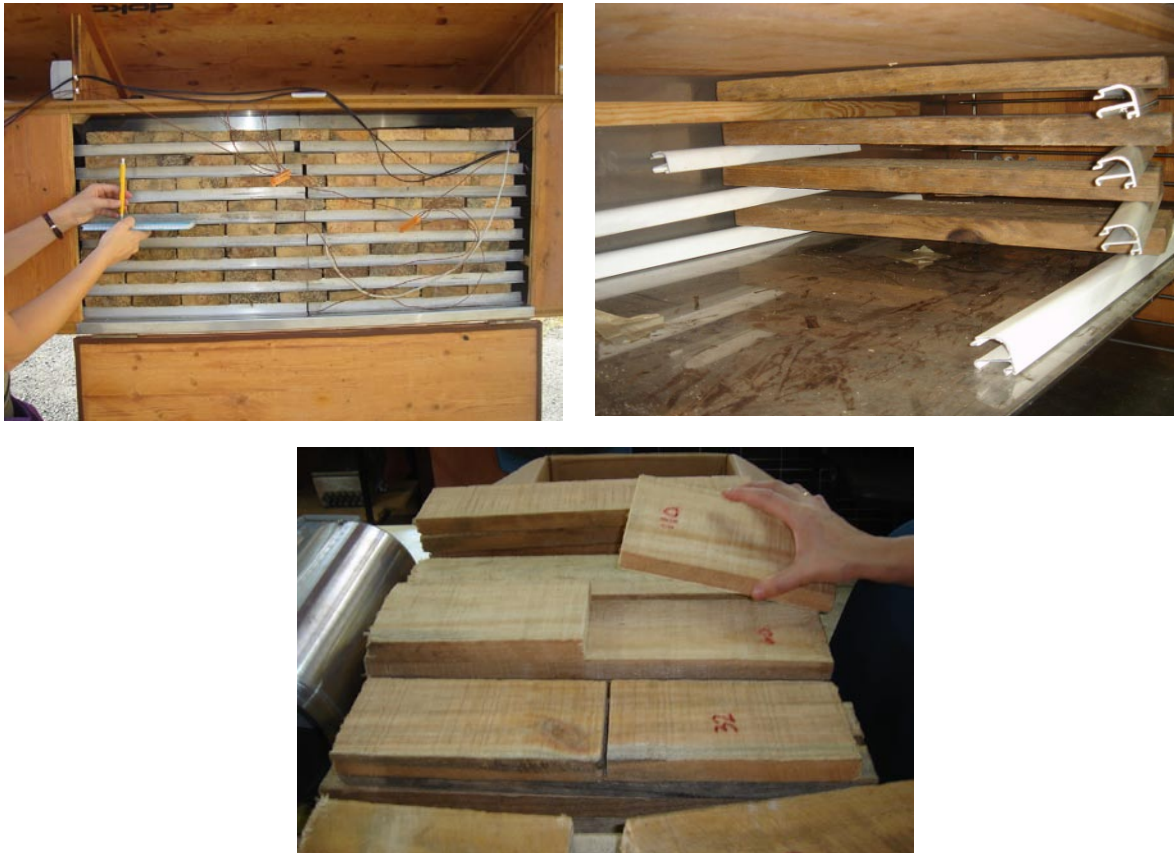


Figura 5. Imagen de la distribución de las maderas en el interior del secadero y detalle de las mismas.

Para el procesado y análisis sistemáticos de los datos generados en los numerosos experimentos del secador de madera se ha desarrollado una serie de funciones y rutinas de Matlab.

## RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En la Figura 6 se recoge un histórico de temperaturas registradas por los diferentes sensores a lo largo de un ciclo de secado (5 días). En este ciclo de secado la carga de madera estuvo compuesta por 110 tablas con un peso inicial de 102,2 kg. Al cabo de los cinco días, presentó un peso final de 82,2 kg, lo que supone la extracción de 20 kg de agua. Más del 53% de las tablas experimentaron una pérdida de peso superior a los 100 g. Al término del proceso de secado, el 63% de las tablas presentaba un contenido de humedad por encima del 20%, mientras que un 35% presentaba un contenido de humedad entre 18 y 20 % y el resto se consideraron prácticamente secas (16-17% de humedad). Lo que permite indicar la viabilidad del procedimiento y el diseño de la instalación al fin perseguido, y la necesidad de optimizarlo.

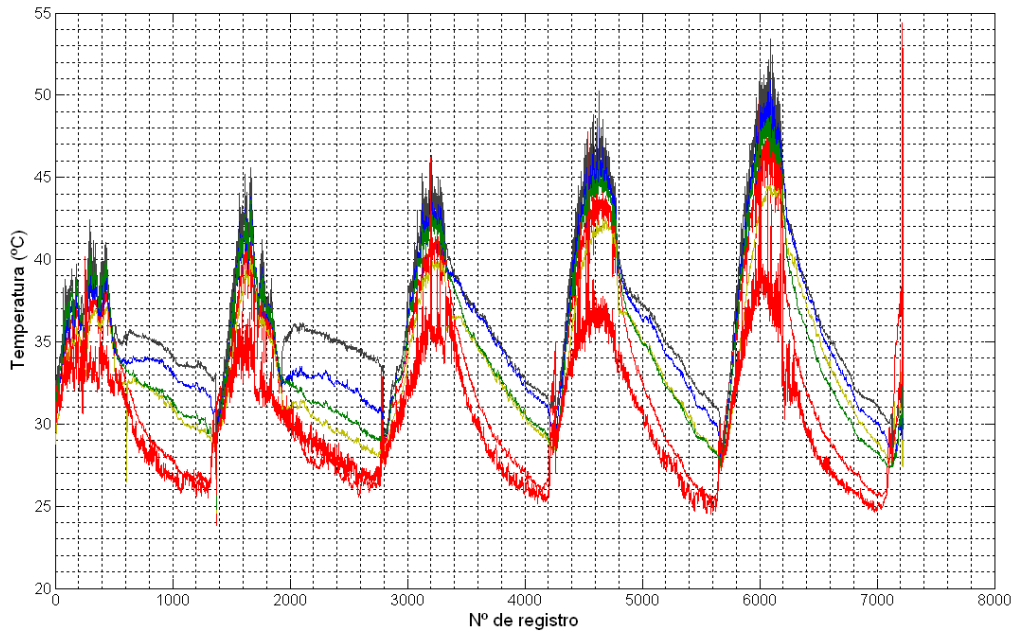


Figura 6. Sucesión de temperaturas registradas por los diferentes sensores a lo largo de un ciclo de secado de 5 días de duración.

La aplicación del modelo psicrométrico de ASABE a los datos recogidos por los sensores de humedad y temperatura, permite realizar un detallado seguimiento del proceso de secado, tal y como se refleja en la Figura 7, para el primer y el último día de secado (Figuras izquierda y derecha respectivamente). Durante el primer día se alcanza saturación en el interior del secadero. Al final del proceso se observan mayores temperaturas a la salida del colector solar lo que indica mayor radiación solar (puntos azules), así como el efecto de regulación de la trampilla de recirculación.

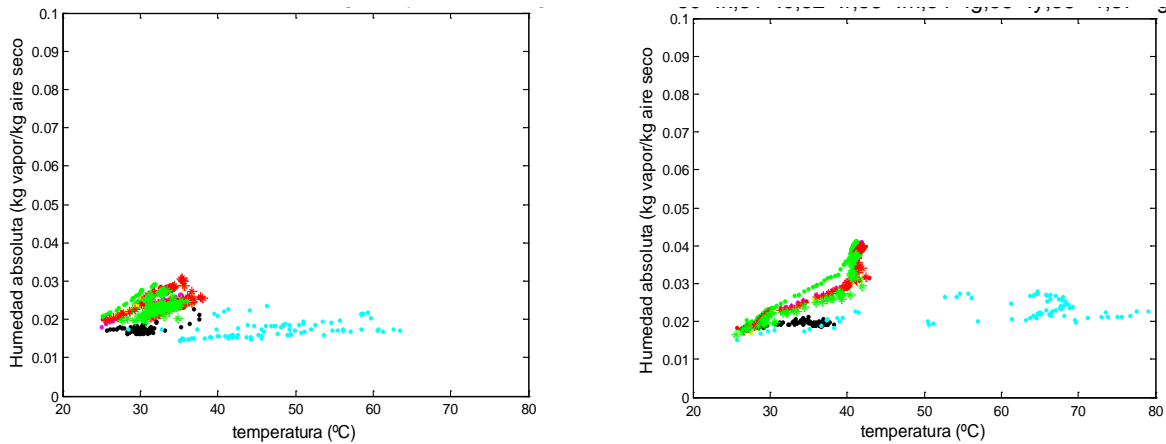
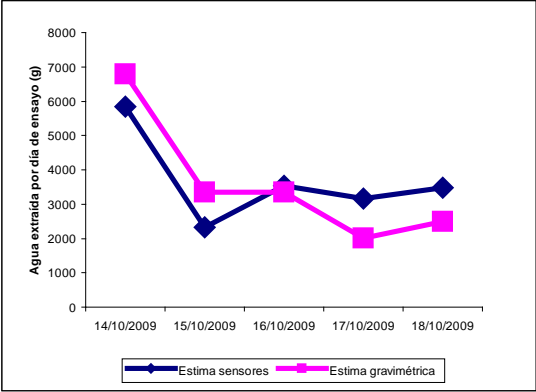
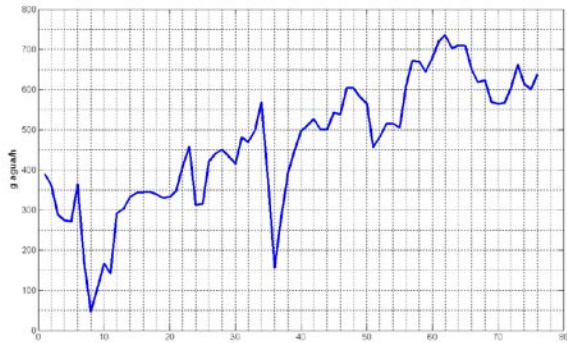


Figura 7. Evolución ambiental a lo largo de dos días de trabajo donde se refleja la evolución diaria de la temperatura y humedad en el interior del secadero.

Asimismo, se ha elaborado un procedimiento para la estimación del agua extraída de la madera durante cada día de trabajo a partir de los datos de humedad de 2 sensores de entrada y salida en el secadero. Se considera que la diferencia de humedad absoluta entre el aire a la salida del secadero y el aire a la entrada del mismo es el agua extraída a la madera (g de agua/kg de aire seco); aplicando la ecuación de estado de los gases perfectos y el caudal del ventilador se obtiene la cantidad de agua extraída por unidad de tiempo en cada instante (g de agua/h, Figura 8 izquierda). La integral del gráfico proporciona la cantidad

total de agua extraída (Figura 8 derecha). Los resultados se comparan con los obtenidos mediante pesada diaria de una muestra representativa de la madera sometida al proceso de secado. El procedimiento está siendo optimizado dado que se emplea el caudal característico del ventilador, aspecto susceptible de ser recalculado para obtener mejores ajustes entre ambas estimaciones. Podría decirse que se ha llegado a un “sensor virtual” para la determinación de la humedad en la madera a partir de los sensores de humedad y temperatura de bajo coste ubicados en distintos puntos del interior del secador.





Plumptre, R.A. and D.L. Jayanetti. (1996). Solar heated timber drying kilns, TRADA Technology Ltd.

Reeb, J. E. (1997). Drying Wood. Cooperative Extension Service. University of Kentucky. College of Agriculture.

Sattar, M. A. (1993). Solar drying of timber – a review. Holz als Roh-und Werkstoff 51 409-416.