

Diseño y operación de una estufa solar para secar madera

Luis E. Solís Rodríguez¹, Miguel A. Cerón Cardeña², Israel González Ahumada³

RESUMEN

Se describe el diseño y funcionamiento de una estufa solar para secar madera con una capacidad de 3 m³ (1 275 pies-tabla) y 15 m² de colectores solares dispuestos en cinco cajones individuales. El secador fue construido con materiales convencionales de fácil obtención en el mercado local; sus paredes se conformaron con bloques huecos de concreto y se recubrieron interiormente con placas de poliestireno de 25.4 mm de espesor, el piso fue de concreto y el techo se formó a partir de cinco colectores solares provistos de una placa de absorción a base de lámina galvanizada calibre 26 (0.6 mm) y de una cubierta de doble vidrio transparente de 6 mm de espesor cada uno. Para evaluar su funcionamiento, se implementó un programa de pruebas con una especie de madera tropical conocida comúnmente como pich (*Enterolobium cyclocarpum*). Las piezas de madera utilizadas en esta investigación fueron obtenidas en forma aleatoria de la línea de producción de un aserradero y presentaron valores iniciales de Contenido de Humedad (CH) del orden de 90% hasta 141%. Durante el desarrollo de las pruebas se alcanzaron temperaturas de 55 °C en el interior de la cámara de secado, en las horas de mayor insolación, condición que permitió alcanzar un CH uniforme de la madera de 18 a 20% en un período de 35 días de secado solar, muy por debajo del tiempo que normalmente se requiere para el secado al aire libre. Este modelo fue desarrollado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán con el propósito de ofrecer una alternativa de solución para el problema del secado de la madera y en este artículo se describen los criterios de diseño del secador; asimismo, se analiza la metodología experimental que se siguió, se discuten los resultados obtenidos y finalmente se presentan las conclusiones más sobresalientes del estudio.

Palabras clave: Métodos de secado, estufa solar, colector solar, madera tropical, contenido de humedad.

ABSTRACT

The design and operation of a solar kiln to dry wood with a capacity of 3 m³ (1 275 foot-board) and 15 m² of solar collectors prepared in five individual boxes is described. The dryer was built with conventional materials easily obtained in the local market; their walls were conformed to with concrete hollow blocks and recovered inwardly with polystyrene sheets of 25.4 mm of thickness. The floor was of concrete and finally, the roof was formed by five solar collectors provided of an absorption plate of sheet galvanized caliber 26 (0.6 mm). This absorption plate was covered with double transparent glass of 6 mm of thickness each one. To evaluate its operation, a testing program with a tropical wood commonly known as pich (*Enterolobium cyclocarpum*) was arranged. The wooden pieces tested in this investigation were randomly obtained of a local sawmill and they presented an initial range of Moisture Content (MC) from 90% to 141%. During the development of the drying tests, temperatures of 55 °C were obtained inside the drying room, condition that allowed getting a uniform MC of the wood from 18 to 20% along 35 days. This model was developed in the Engineering School of the University of Yucatan with the purpose of offering an alternative solution of the drying of the wood. So, the design approaches of the dryer are described; as well as, the experimental methodology is analyzed. The obtained results are also discussed and the most significant conclusions are finally presented.

Keywords: Drying methods, solar kiln, solar collector, tropical wood, moisture content.

¹ Profesor investigador del Grupo Disciplinario de Ciencias Básicas de Ingeniería. FIUADY

² Profesor investigador del Cuerpo Académico de Estructuras y Materiales. FIUADY

³ Tesista de la Maestría en Ingeniería Construcción. FIUADY

ANTECEDENTES

Desde un punto de vista macroscópico, la madera, tal y como existe en un árbol vivo, está constituida por infinidad de células de forma tubular, las cuales contienen gran cantidad de agua que globalmente recibe el nombre de Contenido de Humedad (CH). La gran diversidad de características que se tienen entre las diferentes especies maderables, se debe principalmente a la orientación de las células (Chan, 1987); cabe aclarar que el tronco de un árbol está conformado por dos capas distinguibles: la albura y el duramen; la albura está constituida por células vivas y a través de sus conductos el agua se transmite a las partes superiores de árbol mediante el fenómeno de capilaridad, mientras que el duramen está constituido por células muertas y proporciona capacidad de soporte al árbol desarrollando fuerzas suficientes para mantenerlo en equilibrio. De las investigaciones realizadas hasta la fecha, se ha podido concluir que el duramen contiene menor cantidad de agua que la albura, de manera que existen diferentes especies de madera cuya albura, que en estado verde ($CH > 18\%$) pueden llegar a contener agua en un nivel ubicado entre el 50% y el 75% de su peso, mientras que en el duramen se llega a acumular agua en una cantidad que oscila entre el 25% y el 50% de su peso. (Magaña, 1990)

Existen muchas ventajas al utilizar la madera, como por ejemplo, su resistencia eficaz ante esfuerzos normales paralelos a las fibras, además de que estas últimas proporcionan un efecto visual estético con una multiplicidad de texturas que la hacen más atractiva para determinados fines; con la madera también se pueden obtener muchas formas y secciones más fácilmente que con otros materiales, posee una alta capacidad de absorción de energía de deformación, lo que hace factible que la madera sea utilizada para fines estructurales. Asimismo, se ha verificado a través de varios años de investigación que la madera presenta excelentes características de aislamiento térmico y acústico, así como una alta resistencia a la conductividad eléctrica. (Chan, 1987)

Sin embargo, todas las ventajas que se pudieran obtener al utilizar la madera como material, son posibles cuando posee un CH adecuado a las condiciones de servicio, ya que es un material con fuertes tendencias a los cambios volumétricos que son causados precisamente por el grado de humedad interna que posee y por el efecto del medio ambiente a que quede expuesta. Los resultados de múltiples estudios realizados muestran que la humedad de la

madera es muy variable, habiéndose encontrado valores de CH con rangos de variación entre 30% y 250%, dependiendo de la especie (Chan, 1987). Es indiscutible que la presencia de agua en exceso en la madera conduce a su degradación progresiva, y que a medida que se reduce el CH mejoran sus propiedades mecánicas. Por eso resulta conveniente y necesario que la madera se someta a un proceso de secado y finalmente se tenga el cuidado de mantenerla en esta condición.

El secado de la madera constituye una fase crítica de su proceso de industrialización, ya que según el método de secado que se utilice, puede disponerse de ella en mayor o menor tiempo. En efecto, aunque el método de secado al aire requiere de una inversión inicial mínima (espacios o patios de secado), lo cierto es que el proceso es lento y no permite una disponibilidad oportuna y rápida de madera seca, además de que con este método no se puede obtener un CH cercano al 18%, en virtud de que su efectividad depende de las condiciones climatológicas imperantes en el lugar de que se trate.

También se tiene el proceso de secado en estufa industrial, las cuales pueden ser de dos tipos: las progresivas y las de compartimiento, siendo estas últimas las que más se utilizan. En este proceso la inversión inicial es alta y muchos aserraderos no tienen la capacidad económica suficiente para adquirirlas.

Desde luego, existen otros métodos alternativos intermedios entre el secado al aire y secado en estufa industrial, tales como los presecadores (Anaya, 1988), el secado al aire bajo cubierta y las estufas con deshumidificadores; también se han manejado en menor grado el método de secado a presión; el de alta frecuencia y el secado por medio de vacío.

Sin embargo, una de las diversas alternativas viables es el secado por medio de la energía solar, que se ha venido desarrollando desde 1960 (Maldonado y Peck, 1967). La estufa solar funciona bajo el principio de evaporación del agua contenida en la madera utilizando como fuente de calor la energía proveniente del sol (Magaña, 1990), la cual es colectada y transferida mediante dispositivos de captación, comúnmente llamados colectores solares y que, según el diseño utilizado, proporcionan calor por algún medio, que generalmente es el aire; posteriormente, el aire cargado de energía térmica se hace circular de manera natural o forzada a través de

los materiales o elementos a los que se les quiere disminuir la cantidad de agua que poseen.

La mayoría de las estufas solares han sido construidas como prototipos experimentales en los últimos cuarenta años y se han utilizado eficientemente para el secado de productos agrícolas y forestales, así como para algunos productos perecederos (Rodríguez, 1989). También existen sistemas de calentamiento de agua cuyo funcionamiento está basado en la captación de energía solar.

En todo proceso de secado de madera intervienen tres factores principales que de una u otra forma regulan la velocidad de secado: la temperatura, la Humedad Relativa (HR) y la velocidad de circulación del aire. Estos tres factores, combinados adecuadamente entre sí, impiden la aparición de defectos en las piezas de madera, durante y al final del secado.

INTRODUCCIÓN

Después de haber analizado la problemática referente al secado de la madera, se optó por construir una estufa solar con el propósito de definir un procedimiento (secuela de secado) que sea de utilidad para los industriales madereros, con el propósito de que cuenten con los volúmenes de madera seca que requieran en un período máximo de 45 días, a diferencia de los prolongados tiempos de secado al aire que pueden durar hasta 6 meses según la especie y el grosor de las piezas de madera. Además de los factores descritos anteriormente, los cuales deben ser tomados muy en cuenta para el diseño de una estufa solar, se hizo necesario tomar en consideración el tipo de superficie de captación de energía solar y el mecanismo de transferencia de calor (Manrique, 1984). Considerando las necesidades de madera seca (con un CH $\leq$ 18%) para el desarrollo de proyectos enmarcados en el programa de investigación sobre maderas tropicales, actualmente en desarrollo y consolidación en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, se diseñó y construyó una estufa solar con capacidad para secar 1,275 pies-tabla (3 m³), provista de cinco colectores solares cuya superficie global fue de 15 m².

Asimismo, se tomó la determinación de manejar colectores solares planos de tipo cajón que han demostrado su efectividad (Pilatoski, 1980), con doble vidrio transparente de 6 mm de espesor y un mecanismo de recirculación forzada de aire, utilizando para esto último un ventilador de tipo

externo (motor fuera de flujo) con un sistema de ductos para la conducción del aire caliente, así como dos campanas, una de succión a partir de los colectores y otra de descarga hacia la cámara de secado. Después de analizar un conjunto de materiales en lo que se refiere a disponibilidad en el mercado, costo, eficiencia térmica, manejabilidad y calor específico, se optó por utilizar lámina calibre 26 (0.6 mm) para la captación de la energía solar.

OBJETIVOS

Los objetivos enmarcados en el desarrollo de este proyecto consistieron en diseñar y construir una estufa solar para analizar su comportamiento desde el punto de vista de eficiencia térmica, viabilidad económica y valor final del Contenido de Humedad, así como definir un procedimiento de secado (secuela de secado) aplicable a las maderas tropicales mexicanas.

METODOLOGÍA

Criterios de diseño y construcción

- *Estufa solar*

Para el diseño y construcción de la estufa solar se consideraron los siguientes parámetros, materiales y equipos:

- A. Capacidad de carga: 1 275 pies-tabla (3 m³)
- B. Latitud geográfica: 20°59' (correspondiente a la ciudad de Mérida, Yucatán)
- C. Índice de insolación: 233.9 horas/mes (promedio de 25 años calculado a partir de los datos obtenidos en la estación del Servicio Meteorológico Nacional de la ciudad de Mérida, Yucatán, de 1970 a 1994)
- D. Material aislante: placa de poliestireno de 25.4 mm de espesor.
- E. Temperatura y humedad relativa:

Parámetro	Máxima	Media	Mínima
Temperatura (° c)	36.7	26.1	15.3
Humedad Relativa (%)	98.8	76.4	36.3

- F. Colectores solares: 15 m² de superficie de colectores planos (dispuestos en cinco cajones) con doble vidrio transparente de 6 mm cada uno, inclinados 20°59' hacia el Sur. Cada cajón fue de 18.2 x 75 cm de sección transversal y una longitud de 4.18 m.
- G. Sistema de ventilación: Convección forzada con un extractor de entrada sencilla, con banda y motor de ¼ HP colocado fuera del flujo de aire caliente, diseñado para operar en un sistema de ductos y campanas de succión y descarga de aire; el modelo fue el VT-1612-S con capacidad para mover un volumen máximo de 45 m³ de aire por minuto; el peso de este extractor, conocido comercialmente como "jaula de ardilla", fue de 25 kg.

- **Cámara de secado**

La cámara de secado es el espacio útil de la estufa en el que se introduce la carga de madera a secar. En este caso, las paredes se construyeron con bloques huecos de concreto de 15 x 20 x 40 cm, con recubrimiento exterior convencional a base de mortero de cemento con acabado tipo estuco. De

acuerdo con reportes de investigaciones realizadas en el período de 1980 a 1991 a nivel mundial, gran parte de las pérdidas de energía en las estufas solares se debe a la falta de aislamiento térmico adecuado en la cámara de secado y, en su caso, a través de los ductos y colectores; con base en el análisis de dichos estudios se tomó la decisión de colocar en las paredes un revestimiento de poliestireno de 25.4 mm de espesor como parte integradora del acabado interior de los muros. El piso de la cámara de secado fue a base de losa de concreto con $f'c = 150 \text{ kg/cm}^2$, reforzado con varilla de acero de 6.35 mm de diámetro a cada 25 cm en ambos sentidos, con espesor de 10 cm y acabado pulido. La cámara estaba provista de dos ventanas de 80 x 60 cm para eliminación de humedad.

La única puerta de acceso a la estufa fue de tipo tambor y se instaló en la pared oeste. En la Figura 1 se muestra un corte transversal de la estufa propuesta en esta investigación. En la Figura 2 se presenta un croquis en planta de todos los colectores; en las Figuras 3 y 4 aparecen los cortes longitudinal y transversal, respectivamente, de cada colector.

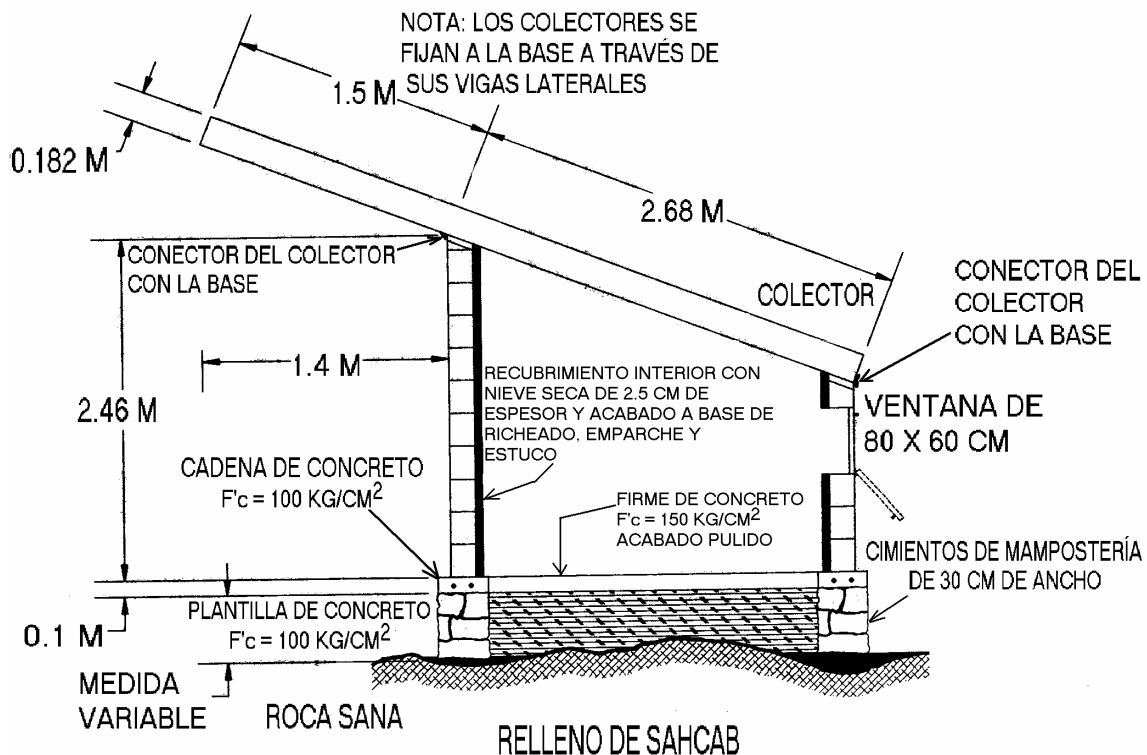


Fig. 1. Corte transversal de la estufa solar

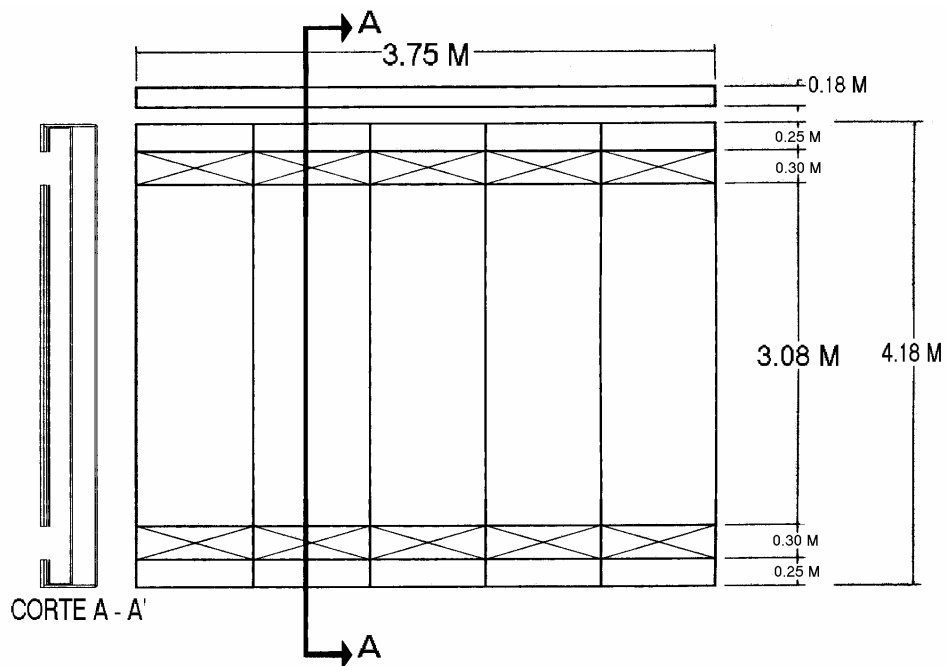


Fig. 2. Croquis de todos los colectores vistos en planta

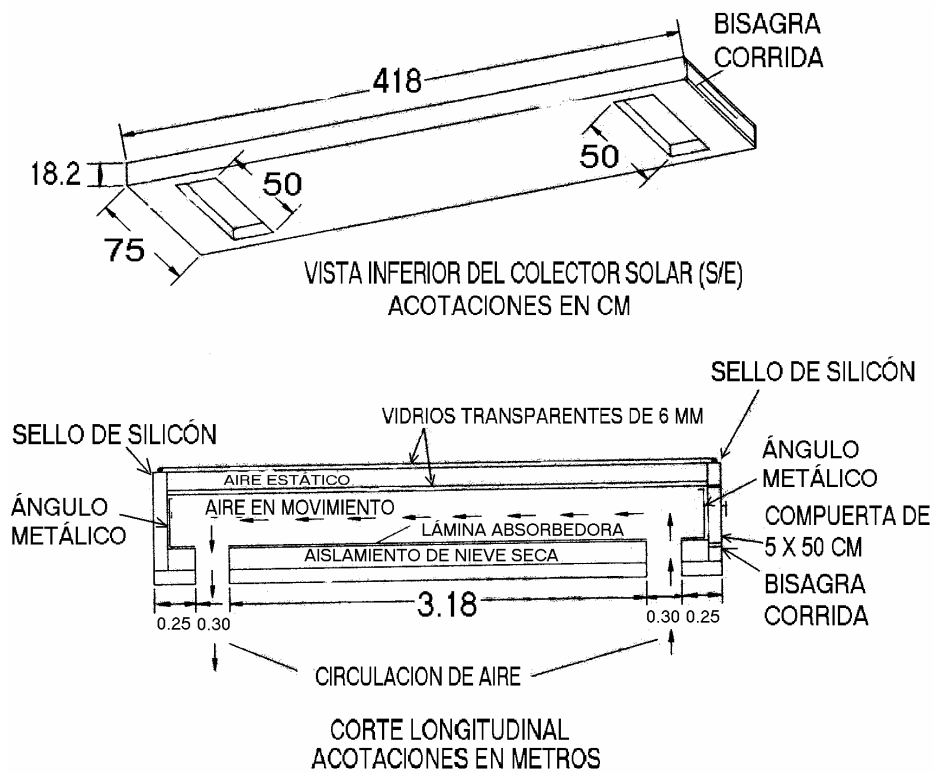


Fig. 3. Corte longitudinal de un colector solar

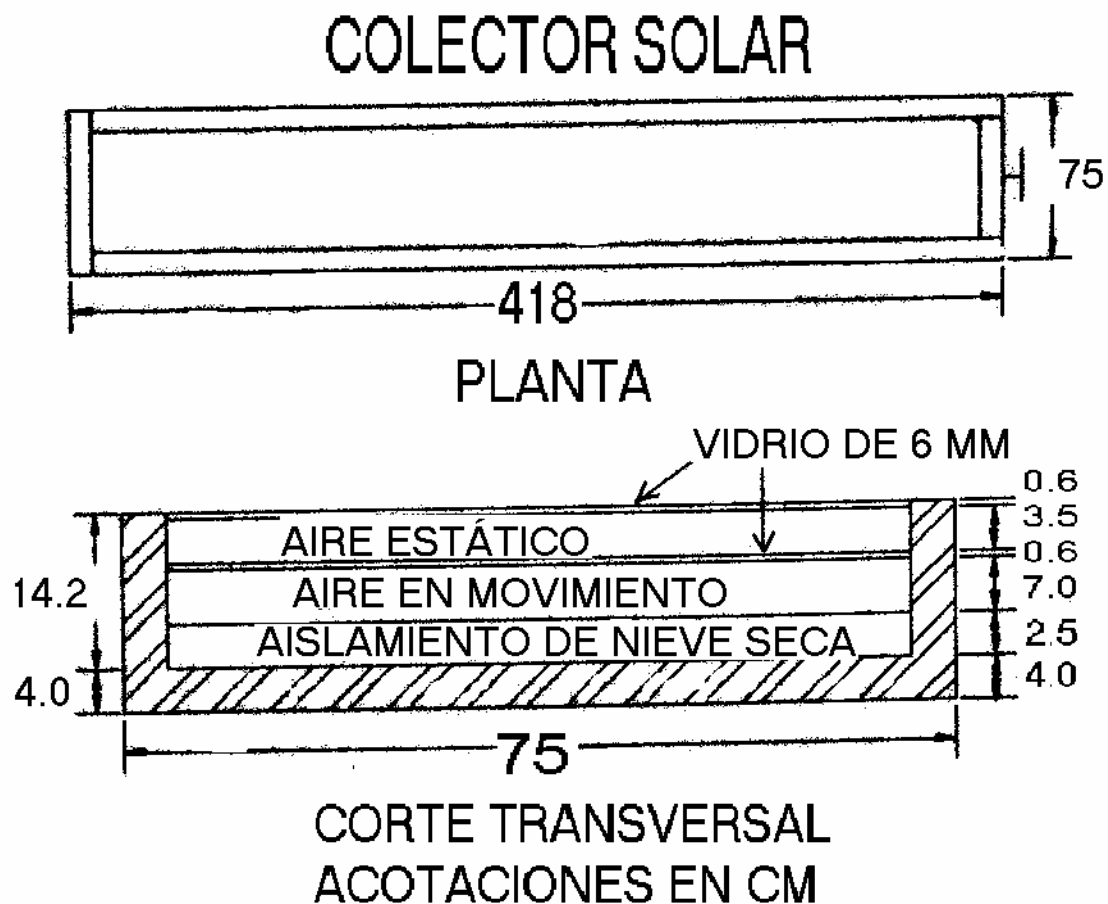


Fig. 4. Corte transversal de un colector solar

- **Adquisición del material de estudio**

La madera se tomó en forma aleatoria de la línea de producción de un aserradero ubicado en la ciudad de Mérida y posteriormente se trasladó a las instalaciones de la facultad de ingeniería para su registro y acondicionamiento iniciales. Las piezas de madera fueron de 1" x 6" x 10' (2.5 x 15.0 x 300.0 cm) de dimensión y se marcaron con una clave para su mejor identificación. Se decidió analizar la especie comúnmente conocida como pich (*Enterolobium cyclocarpum*) por sus características físicas de crecimiento, contenido de humedad inicial y densidad, así como por su abundancia en la región peninsular.

- **Calibración de los equipos de medición**

Con el propósito de definir la metodología a seguir para la operación de la estufa, fue necesario

llevar a cabo pruebas preliminares durante un período de seis semanas, sin carga de madera, tiempo que resultó ser suficiente para realizar los ajustes necesarios a la estufa, tales como la fijación y calibración de los instrumentos y equipos de medición, colocación de 12 termopares (dos en cada colector y dos en la cámara de secado) y del medidor de humedad, así como para armar el equipo de adquisición automatizada de datos, con un soporte en infraestructura de 14 canales de entrada, conectado a una computadora.

- **Colocación de los especímenes de madera a secar**

Como parte de la metodología de prueba se definieron las acciones tendientes al acomodo de las piezas de madera formando capas en las que se dejó una separación entre capa y capa igual al grosor de los especímenes hasta completar la pila de secado; de

este modo, se utilizaron las mismas piezas de madera como separadores. Se cargó la estufa solar acomodando en el interior de la cámara 220 piezas de 1" x 6" x 10' (2.5 x 15 x 300 cm) dispuestas en 22 capas de a 10 piezas cada una, para un total de 1,100 pies-tabla (2.6 m³), utilizando la estufa al 86 % de su capacidad.

Adicionalmente, se colocaron desviadores en los extremos y en las partes superior e inferior de la pila para lograr que el aire impulsado por el sistema de ventilación, circule únicamente entre las piezas, disminuyendo al mínimo posible las turbulencias en el interior de la cámara. En este caso se utilizaron como desviadores placas de poliestireno de 25.4 mm de espesor.

- **Operación de la estufa**

La estufa se puso en funcionamiento acorde con los lineamientos establecidos a partir de las pruebas preliminares, con el fin de mantener las condiciones óptimas de secado. El sistema de ventilación de la estufa se encendía a intervalos de tiempo de dos horas con media hora en modo de apagado, comprendidos entre las 8:00 y las 17:30 horas, periodo de tiempo en el que se consideraba que ya se había calentado y enfriado, respectivamente, el aire interior, para un clima como el de la ciudad de Mérida.

El aire caliente proveniente de los colectores ingresa a la cámara de secado a través de la campana de descarga y circula entre las capas secando las piezas, entrando en el costado norte de la pila y saliendo del lado sur, para entrar nuevamente a la zona de inyección de los colectores, a través de los cuales fluye para volver a calentarse siendo impulsado por los ventiladores.

Las ventanas de la estufa se mantuvieron abiertas por intervalos de tiempo durante el día en los primeros días del proceso de secado y cerradas durante la noche, con el objeto de mantener una Humedad Relativa (HR) baja (del orden de 45 ± 5 %) y, por lo tanto, una velocidad alta de secado.

La adquisición de las lecturas de HR y temperatura en el interior de la estufa se realizaron a través de un multiplexor conectado a un equipo de cómputo. Se utilizó para estos fines un equipo lector de humedad con un rango de lectura de 0 a 100 %. Asimismo, se tomaron lecturas de temperatura en la placa de absorción de los colectores, con el fin de determinar la eficiencia térmica de éstos. Esta etapa se llevó a cabo utilizando termopares colocados sobre la placa de absorción.

- **Determinación del Contenido de Humedad (CH)**

Con el propósito de verificar el avance del proceso de secado, fue necesario colocar 12 piezas denominadas “muestras de control tipo 1”, que se intercalaron simétricamente a lo largo y ancho de la pila, cuyas dimensiones fueron 1" x 6" x 4' (2.5 x 15 x 120 cm); estas muestras fueron extraídas a partir de 12 tablas tomadas al azar de entre la pila que se introdujo a la cámara de secado. De estas últimas, se extrajeron 24 especímenes de 1" x 6" x 2" (2.5 x 15 x 5 cm), denominadas “muestras de control tipo 2”, que fueron secadas en un horno convencional hasta alcanzar el estado anhidro. Con las “muestras de control tipo 2” se obtuvieron los datos necesarios para determinar el CH inicial de la madera al momento de comenzar el proceso de secado, utilizando la ecuación:

$$CHI = \frac{PI_2 - PS_2}{PS_2} \quad (1)$$

Donde:

CHI = Contenido de Humedad Inicial

PI_2 = Peso inicial de las “muestras de control tipo 2” (al momento de comenzar el proceso)

PS_2 = Peso seco anhidro de las “muestras de control tipo 2”

Cabe aclarar que el CHI de las “muestras de control tipo 2” resulta ser el mismo que para las “muestras de control tipo 1” y para toda la pila del interior de la cámara de secado. Por lo tanto, una vez conocido el CHI de las “muestras de control tipo 2”, es posible estimar el peso anhidro de las “muestras de control tipo 1”. Para ello se procede de la siguiente manera:

Despejando PS_2 de la ecuación I se tiene:

$$(CHI) (PS_2) = PI_2 - PS_2$$

$$PI_2 = (CHI) (PS_2) + PS_2$$

$$PI_2 = PS_2 (1 + CHI)$$

$$PS_2 = \frac{PI_2}{1 + CHI} \quad (II)$$

Una vez que se obtuvo el valor de PS_2 se utilizó nuevamente la fórmula para determinar el peso seco anhidro de las “muestras de control tipo 1”. Para tal efecto, se sustituye el índice 2 por el índice 1 quedando la fórmula de la siguiente manera:

$$PS_1 = \frac{PI_1}{1 + CHI} \quad (III)$$

Donde:

PS_1 = Peso seco estimado de las “muestras de control tipo 1”.

PI_1 = Peso inicial de las “muestras de control tipo 1”.

CHI = Contenido de Humedad inicial.

En resumen, con la ecuación III se pudo calcular de manera anticipada el peso seco que debían tener las “muestras de control tipo 1” que se encontraban en la cámara de secado. Cabe señalar que en esta investigación se utilizó además un higrómetro para el seguimiento de la disminución de la humedad de las “muestras de control tipo 1”.

Secuela de secado (procedimiento de prueba)

El procedimiento que se utiliza para operar una estufa de secado se denomina secuela de secado. Una secuela está conformada por una serie de lineamientos que deben seguirse sistemáticamente, con el propósito de que en el interior de la estufa se tengan condiciones de temperatura y humedad relativa para que el secado de la madera se lleve a cabo en el tiempo más corto posible y sin que en ella aparezcan defectos. Una secuela bien definida garantiza una velocidad de secado adecuada. Una velocidad alta de secado se asocia fundamentalmente con la combinación de la mayor temperatura y la menor humedad relativa que puedan obtenerse durante la operación de la estufa; sin embargo, dependiendo del tipo de madera que se esté secando, una velocidad alta de secado pudiera no ser conveniente, ya que podría ocasionar la aparición de defectos en la madera.

Con base en las características técnicas del secador, de las condiciones climatológicas de la localidad (humedad relativa y temperatura) y de las condiciones de humedad iniciales de la madera, se propuso una secuela de secado, misma que se fue ajustando hasta lograr el procedimiento que respondió favorablemente durante el proceso de secado y que,

de acuerdo con uno de los objetivos del proyecto, se tomó como base para la formulación de la secuela que se propuso al final del estudio.

Una vez que se realizaron las pruebas y se recopiló toda la información, se procedió al análisis de los datos para poder establecer una serie de resultados y la interpretación de éstos. Sin embargo, es oportuno aclarar que como parte importante para la definición de la metodología mencionada anteriormente, se utilizaron los resultados de la fase experimental en su etapa de pruebas preliminares, lo que permitió una mejor ubicación y una calibración más adecuada de los equipos de medición, así como la verificación del funcionamiento de la estufa sin carga de madera. En esta fase se utilizó un programa computacional denominado MAC-14 que permitió interconectar la computadora con los termopares que se ubicaron en las partes superior e inferior de cada colector, así como los dos termopares y la terminal del sensor de humedad que se colocaron en el interior de la cámara de secado.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos a partir de las pruebas preliminares mostraron que la temperatura máxima alcanzada en la placa de absorción fue de 110° C durante el período de mayor insolación; de igual modo, la temperatura máxima en el interior de la cámara de secado fue de 82° C pero, desde luego, esta temperatura interior se suponía que iba a ser menor al momento de operar la estufa con carga de madera, debido al efecto directo de la humedad de la misma.

Las pruebas definitivas se realizaron con piezas de madera cuyas dimensiones fueron dadas anteriormente, las cuales se colocaron en el sentido longitudinal de la estufa (dirección oriente – poniente), insertando los separadores de 1” x 2” x 5’ (2.5 x 5 x 150 cm), éstos con una orientación nortesur para poder permitir el paso del aire caliente que provenía de la campana de descarga ubicada en la pared norte. Todo el proceso de secado en la estufa solar quedó concluido a los 35 días efectivos de operación, es decir, siete semanas calendario, habiéndose comprobado que las piezas de madera no presentaron defecto alguno, verificando así la efectividad de la secuela de secado que se utilizó, por lo que no fue necesario implementar algún proceso de acondicionamiento y uniformización de la madera.

Para el análisis de datos se utilizó el paquete computacional QUATTRO-PRO al igual que el

DBASE-III PLUS que sirvió para el diseño de las bases de datos con el propósito de manejar bloques de registros con varios campos de información cada uno. Se obtuvieron aproximadamente 164,000 datos durante los 35 días efectivos de adquisición por computadora entre las 8:00 AM y las 8:00 PM, cada dos minutos, a través de 13 canales de acceso. Se calcularon promedios tomando en cuenta las 30 lecturas de cada hora y se realizó el análisis estadístico obteniendo valores de temperatura y humedad de todos los días de la semana, con los cuales se generaron gráficas temperatura-tiempo de

secado, en las que se pudo observar el comportamiento térmico, respecto del tiempo, de cada uno de los cinco colectores solares, en sus secciones superior e inferior, esto es, las temperaturas de entrada y salida de cada colector, tal como se observa en las Figuras 5 a 9. También se hizo un análisis similar con los datos obtenidos a través de los sensores colocados en el interior de la cámara de secado, para la cual, además de las gráficas temperatura-tiempo, se generaron gráficas humedad relativa-tiempo.

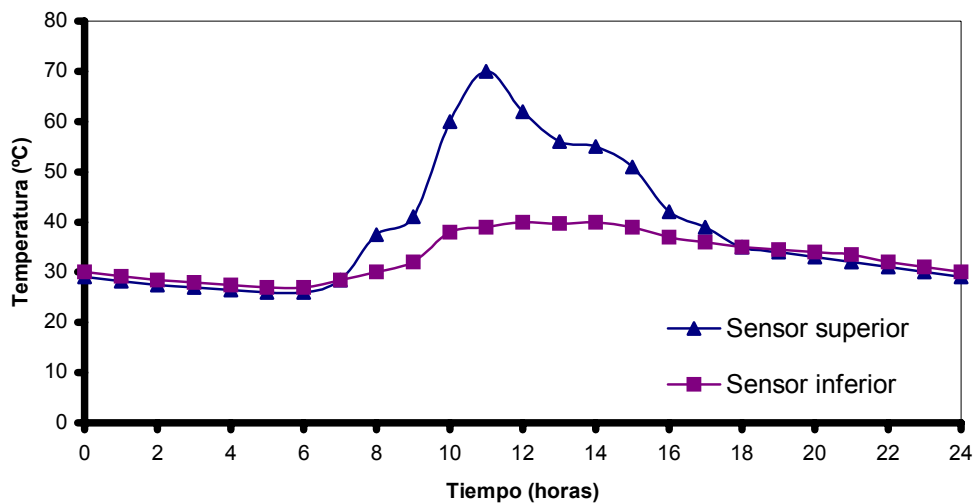


Fig. 5. Gráfica temperatura-tiempo en colector 1 (promedios de 35 días)

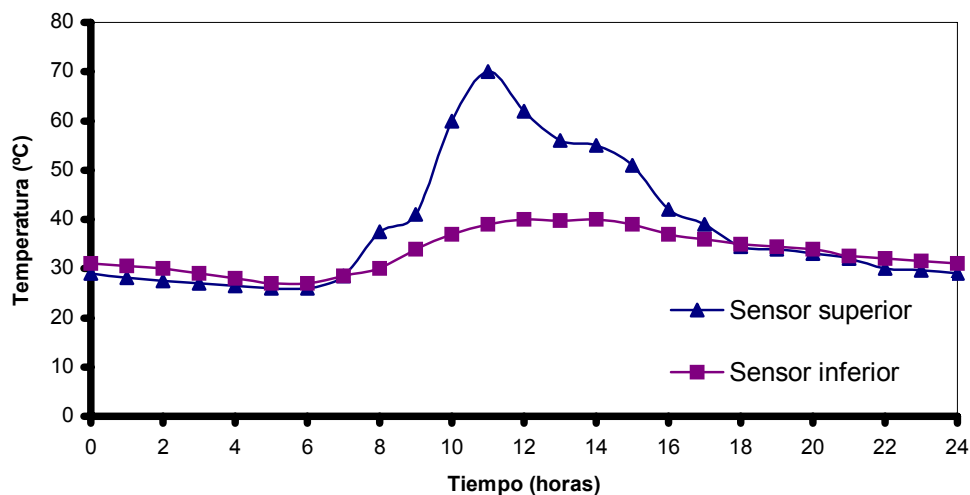


Fig. 6. Gráfica temperatura-tiempo en colector 2 (promedios de 35 días)

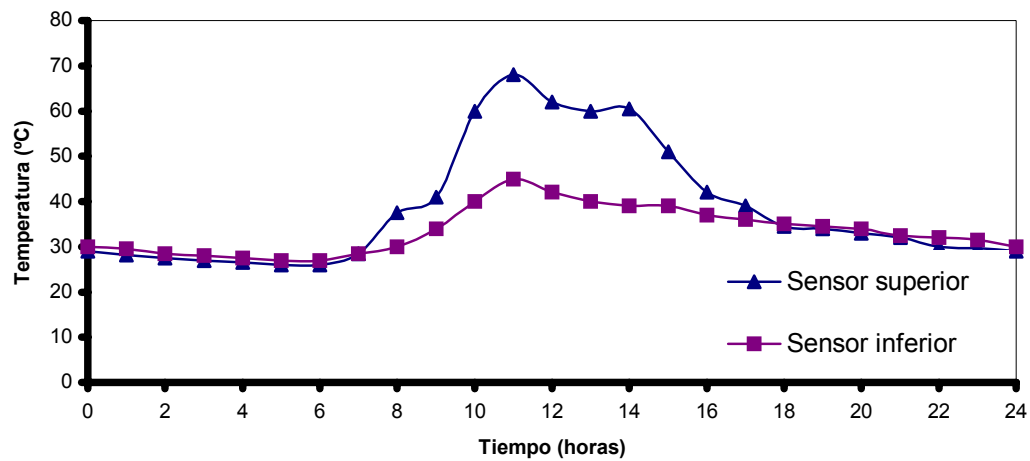


Fig. 7. Gráfica temperatura-tiempo en colector 3 (promedios de 35 días)

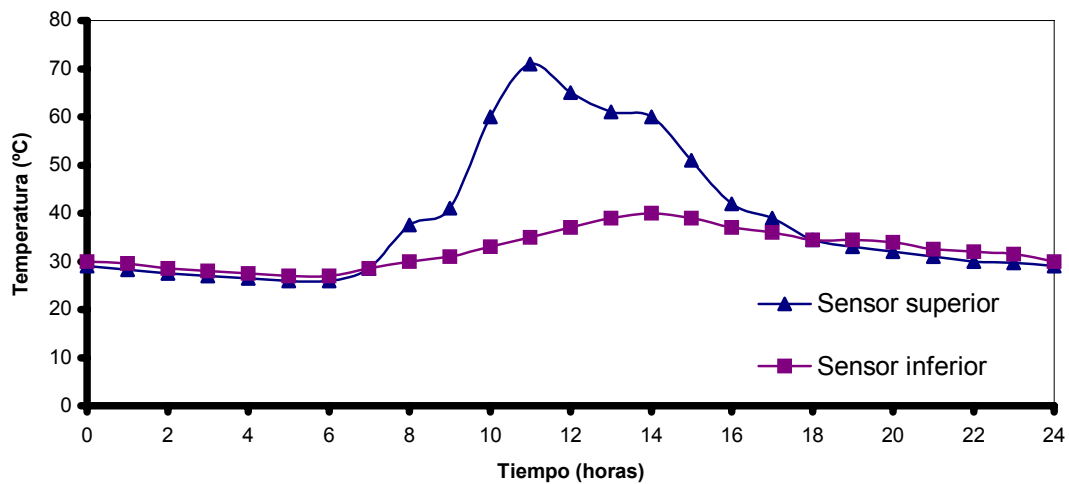


Fig. 8. Gráfica temperatura-tiempo en colector 4 (promedios de 35 días)

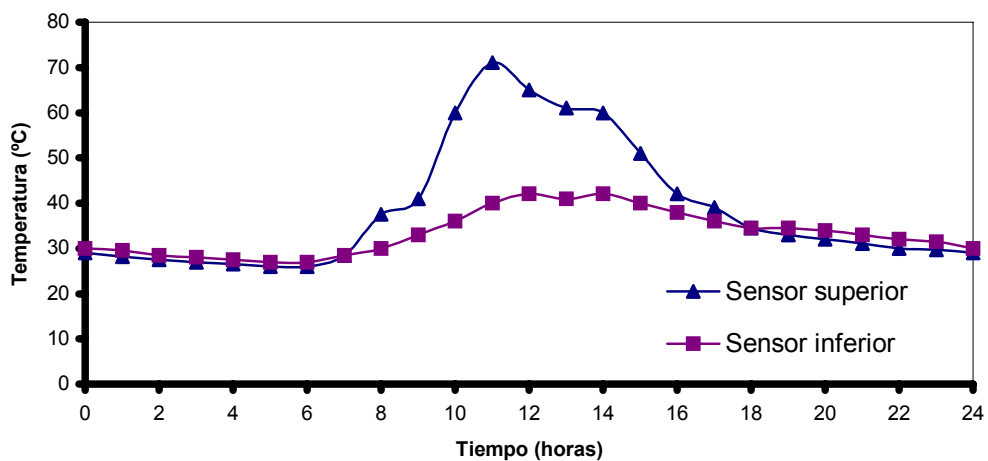


Fig. 9. Gráfica temperatura-tiempo en colector 5 (promedios de 35 días)

De acuerdo con los resultados, se pudo apreciar que en los colectores situados en los extremos poniente y oriente, identificados con los números 1 y 5, respectivamente, se presentaron valores de mayor temperatura del aire en la zona de descarga; los colectores contiguos a éstos, que fueron identificados con los números 2 y 4, presentaron menor temperatura en el aire de descarga; el colector central fue el que tuvo la menor temperatura entre todos. Cuando se activaba el sistema de circulación forzada de aire, con el propósito de reducir la humedad en el interior de la cámara de secado, la temperatura del aire a la entrada de todos los colectores era similar.

La temperatura promedio de estabilidad térmica de la placa de absorción de radiación de todos los colectores fue del orden de 103°C en el extremo norte (zona de salida), de 91°C en la sección central, y de 78°C en la sección sur (zona de entrada para recirculación); estos datos térmicos se obtuvieron con el sistema de ventilación apagado con la pila de madera secándose.

DISCUSIÓN

Se comprobó que existen diferencias de las temperaturas entre las secciones superior e inferior de todos los colectores; los valores promedio máximo y

mínimo de las diferencias fueron $21,7^{\circ}\text{C}$ correspondiente al colector central y $36,7^{\circ}\text{C}$ para el colector 2. Una explicación posible de este comportamiento térmico, se basa en la asimetría del sistema de ventilación a base de ductos y campanas de succión (salida de colectores y entrada a ductos) y de descarga (salida de ductos y entrada a la cámara de secado). Se utilizó un anemómetro para comprobar que la velocidad de circulación del aire fue mayor en el centro de la estufa que en los extremos, razón por la cual probablemente se obtuvo una menor diferencia entre las temperaturas de las secciones superior e inferior del colector central.

En este modelo de estufa solar se comprobó, por un lado, una alta temperatura en los colectores 1 y 5 con baja velocidad de circulación, mientras que en los colectores 2 y 4 se tenía una menor temperatura pero con una mayor velocidad de circulación de aire; estas condiciones permitieron alcanzar una uniformización de la temperatura en el interior de la cámara de secado (ver Figura 10), acorde con las lecturas provenientes de los dos sensores térmicos que se colocaron en ella; las temperaturas máximas ocurrían en el periodo comprendido entre las 11:00 y las 14:00 horas. El sensor de humedad reportó lecturas que permitieron establecer que el rango de menor humedad se tuvo entre las 12:00 y las 16:00 horas (ver Figura 11).

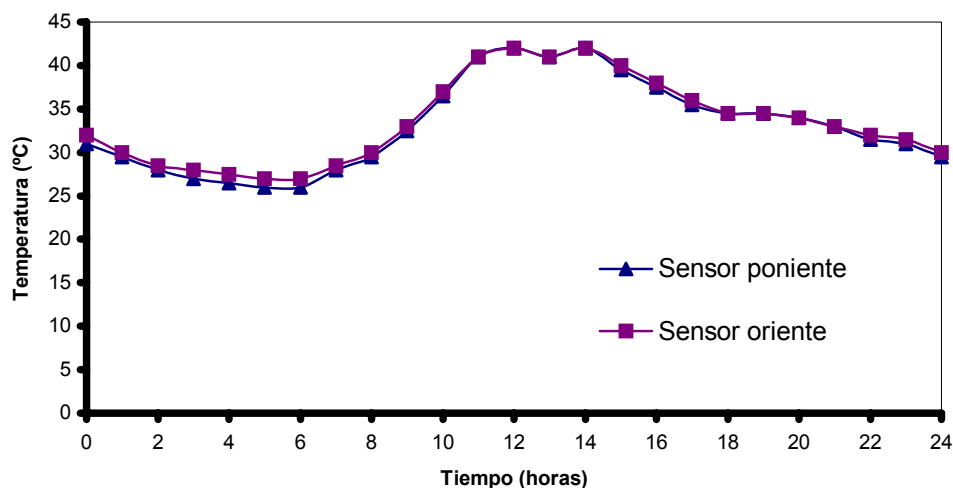


Fig. 10. Gráfica temperatura-tiempo en cámara de secado (promedios de 35 días)

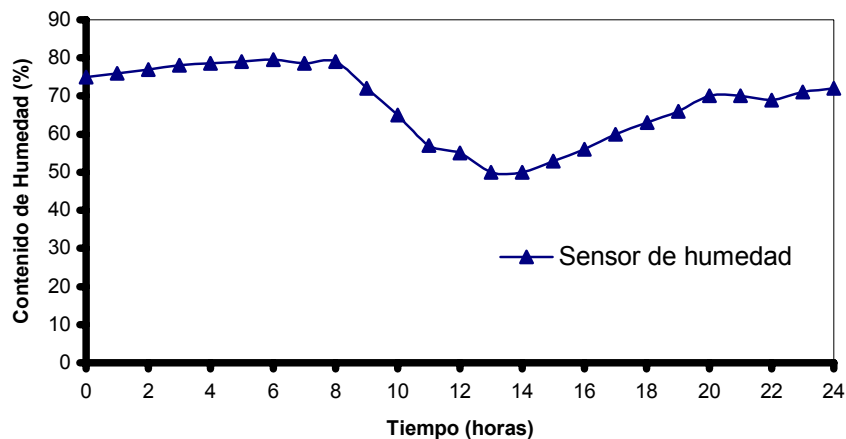


Fig. 11. Gráfica humedad-tiempo (promedios de 35 días)

Los cálculos de Contenido de Humedad de todas las piezas de madera arrojaron valores, al principio del proceso, del orden de 143 % y luego de 35 días efectivos del proceso de secado, se logró

alcanzar un CH final de 19 %, tal como se indica en la Figura 12.

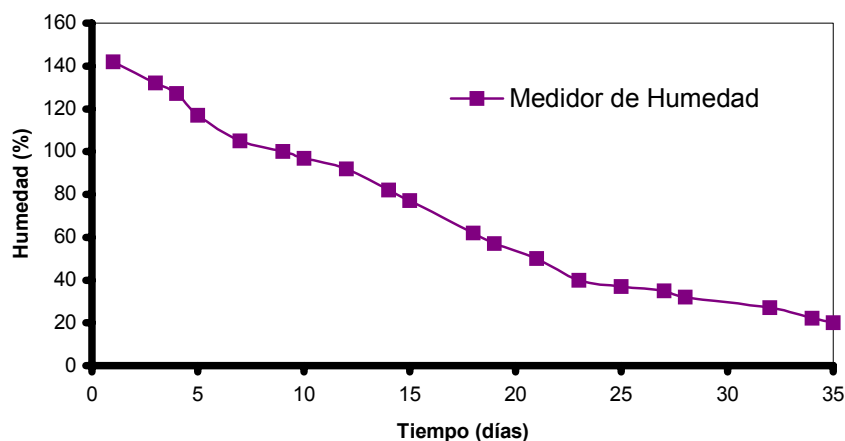


Fig. 12. Gráfica CH-tiempo de secado (promedios de 35 días)

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Analizando los resultados de esta investigación, se puede concluir que la energía solar representa una alternativa eficiente para el secado de la madera con rapidez y tecnología sencilla.

Es conveniente tener en cuenta para la construcción de una estufa solar, todos los factores que en este estudio se consideraron, tales como: la capacidad de carga, latitud geográfica del lugar, índice de insolación, material aislante térmico y, sobre todo, se propone utilizar el tipo de colector

plano con doble vidrio transparente, así como un sistema de ventilación de convección forzada y motor fuera del flujo de aire caliente para evitar posibles complicaciones en la operatividad de la estufa.

Es oportuno aclarar que no resulta conveniente formar pilas con tablas de diferente grosor, ya que como las piezas de mayor espesor tardan más en secarse. Sin embargo, se podría formar una pila de secado de tal manera que las tablas de mayor espesor se coloquen debajo del conjunto de piezas más delgadas. Cada capa se debe conformar colocando las tablas con sus cantos unidos para

obligar a que el aire caliente del sistema circule entre capas únicamente, aumentando así la eficiencia de la estufa.

Se espera que este estudio sirva de base para futuros proyectos que conlleven a obtener modelos de estufas solares que permitan alcanzar una mayor eficiencia energética.

Dada la importancia de conocer las etapas a seguir para llevar a cabo un programa de secado de la madera, se consideró relevante presentar la secuela de secado (procedimiento) que se obtuvo de esta investigación, como una de las conclusiones más importantes, ya que constituye una herramienta básica para la operación de este modelo de estufa solar. A continuación, se describen los pasos que constituyen la secuela.

Se deberá construir la cámara de secado y los colectores solares con las características descritas en este trabajo; asimismo, la estufa se pondrá en funcionamiento de acuerdo con los siguientes lineamientos que han sido establecidos a partir de los resultados de las pruebas que se realizaron en esta investigación, a fin de mantener las condiciones óptimas de secado:

1. Cargar la estufa solar acomodando en el interior de la cámara el número de piezas de madera de acuerdo con su capacidad, dispuestas en capas con separadores, seleccionando al azar las vigas de las que se extraen las muestras de control tipo 1 y tipo 2 en un número tal que sea de un 5 % a un 10 % del total de las piezas a secar; el porcentaje de piezas que se escoge es más grande mientras mayor sea la capacidad de la estufa. Las piezas a secar y las muestras de control se colocan según el procedimiento descrito en la metodología de prueba.
2. Determinar el Contenido de Humedad Inicial (CHI) promedio de las piezas tomando en cuenta los datos provenientes de las “muestras de control tipo 2”.
3. Colocar los desviadores necesarios para lograr que el aire impulsado por el sistema de ventilación circule únicamente entre las piezas. Para la ejecución de esta actividad se pueden utilizar como desviadores las placas de poliestireno de 25.4 mm de espesor.
4. Determinar cada tercer día el Contenido de Humedad de las vigas de madera utilizando

para esta actividad un medidor de humedad. En caso de no contar con este equipo de medición, se deben pesar las muestras de control tipo 1 y realizar cálculos con la siguiente expresión:

$$CH_m = \frac{P_1 - PS_1}{PS_1}$$

donde:

CH_m = Contenido de Humedad de las “muestras de control tipo 1”, que resulta ser un valor estimado del CH de la madera de toda la pila.

P₁ = Peso promedio de las “muestras de control tipo 1” obtenido el día en que se desea conocer el CH de toda la pila.

PS₁ = Peso seco promedio de las “muestras de control tipo 1”, calculado con base en el CHI de la pila, obtenido este último a partir de las “muestras de control tipo 2”.

5. Encender el sistema de ventilación a intervalos de tiempo de dos horas con media hora en modo de apagado, comprendidos entre las 10 de la mañana y las 5 de la tarde, horas en las que se considera que ya se ha calentado y enfriado, respectivamente, el aire interior. En los días lluviosos no se debe conectar el sistema de ventilación.
6. Las ventanas de la estufa y de los colectores se mantendrán abiertas durante el día por intervalos de tiempo de 30 minutos cada tres horas, en los primeros días del proceso de secado, hasta que las piezas reporten un CH = 40 %, y se cerrarán durante la noche. En caso de que en las muestras de control aparezcan agrietamientos o rajaduras, se tendrán que mantener cerradas las ventanas de la cámara y de los colectores durante 24 horas y dejar el sistema de ventilación funcionando permanentemente (día y noche) hasta que los defectos originados por el secado desaparezcan. El número de días en que el proceso sigue bajo estas condiciones es variable y depende del tiempo necesario para que las piezas, según su especie y grosor, alcancen la condición propuesta (CH = 40 %).

7. Regresar al paso 5 las veces que sea necesario hasta que se alcance aproximadamente un CH igual al 40 %, acorde con lo dispuesto en el paso 6. Después de obtener este valor se sigue con el proceso realizando el paso 8.
8. Una vez que se tenga un CH aproximadamente del 40 %, al requerir que la Humedad Relativa sea alta (75 ± 5 %) y con el fin de evitar la aparición de defectos, se mantendrán cerradas las ventanas de la cámara y de los colectores durante la mayor parte del día, y pasadas las horas de mayor insolación (generalmente de tres a cuatro de la tarde) se abrirán para eliminar únicamente parte de la humedad acumulada. Se cerrarán de nuevo a las 17:00 horas y se apagará el sistema de ventilación a esta hora manteniéndolo así hasta la mañana siguiente.

9. Operar la secuela de secado hasta alcanzar el Contenido de Humedad Final que se desee.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo financiero recibido para la realización de esta investigación. Asimismo, agradecemos a la Dra. María Milagrosa Pérez Sánchez por su colaboración tanto en la calibración del equipo para la medición de la radiación solar como en la selección y colocación de los termopares. De igual manera se hace patente el agradecimiento al Dr. Roberto Centeno Lara por su participación en la puesta en funcionamiento del sistema electrónico de captura de datos y finalmente se reconoce a los ingenieros Mario Chan Martín y Manuel Azueta García su apoyo y colaboración durante la fase experimental de este proyecto.

REFERENCIAS

1. Anaya, H.E. (1988). *“Utilización de la Energía Solar en un Presecador de Maderas Duras”*, Escuela de Ingenieros en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.
2. Chan Martín, M. (1987). *“Algunas Características Tecnológicas de la Madera”*. Monografía, Facultad de Ingeniería, UADY, México.
3. Magaña Alvarado, W. (1990). *“El Secado de la Madera”*. Monografía. Facultad de Ingeniería, UADY, México.
4. Maldonado, E.D.; y Peck, E.C. (1967). *“Drying by Solar Radiation in Puerto Rico”*. Forest Products Research Journal, Vol. 12. No.10. USA.
5. Manrique, José A. (1984). *“Energía Solar. Fundamentos y Aplicaciones Fototérmicas”*. pp. 2-4 y 251-252. Editorial Harla, México.
6. Pilatowski, I. (1980). *“Colector Solar Plano”*. Curso de Actualización de Diseño y Aplicaciones de Colectores Solares Planos. IX Congreso de la Asociación Nacional de Energía Solar. México.
7. Rodríguez Anda, R.; Fuentes T., F.; y Montes Ruelas, E. (1989). *“El uso de secadores solares en la industria de la madera”*. Reporte interno pp. 22-30. Departamento de Física de la Madera del Instituto de Madera, Celulosa y Papel de la Universidad de Guadalajara, México.