

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y ENSAYO DE UN SECADERO SOLAR PARA MADERA

Watkins M., Salazar G.¹

Facultad De Ciencias Exactas y Naturales – Universidad Nacional de Catamarca
Av. Belgrano 300 – 4700, Catamarca, Argentina. E-mail: watkinsmarcelo@gmail.com

Recibido: 06/08/12; Aceptado: 02/10/12

RESUMEN: En el presente trabajo se muestran los primeros resultados obtenidos del funcionamiento de un secadero solar, diseñado y construido para ser utilizado en el proceso de secado de madera. Este dispositivo se construye en el predio de la fábrica de pisos INGES S.A. de la provincia de Catamarca, Argentina y es financiado parcialmente por la SEPYME. El diseño es una adaptación de otros secaderos aplicados al procesamiento de madera, frutas y hortalizas. Se incorporan algunos colectores del tipo de radiación solar indirecta dispuestos en línea y el aire caliente ingresa a la cámara de secado mediante un forzador. El secado mediante esta tecnología permite obtener madera con humedad controlada, lo que incide en una mejor calidad de producto final. El ensayo permite verificar en forma práctica el funcionamiento y el correcto dimensionamiento del secadero, en base a la cantidad y tipo de madera a secar. Los tiempos de secado son superiores a los que se pueden lograr con un horno a combustible, pero muy inferiores a los de secado a la intemperie.

Palabras clave: energía solar, secado, tecnología, transferencia.

INTRODUCCIÓN

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; 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 15% y el 50% de su peso.

El secado de la madera constituye una fase crítica del 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. Una segunda opción es el secado con estufa industrial, proceso más costoso y de alto impacto ambiental.

Desde luego, existen otros métodos alternativos intermedios entre el secado al aire y secado en estufa industrial, tales como los pre-secadores, el secado al aire bajo cubierta y el secado solar. Sin duda una de las alternativas viables es el secado por medio de energía solar, proceso que ha venido desarrollándose desde la década del 60. 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, la cual es colectada y transferida mediante dispositivos de captación, comúnmente llamados colectores solares. Los colectores, según el diseño utilizado, proporcionan calor por algún medio, que generalmente es 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 quiere secar (Solís Rodríguez *et al*, 2003).

En nuestro país se pueden citar algunos antecedentes. Durante los años 90 la Universidad Nacional del Nordeste y la Universidad Técnica de Munich, trabajan conjuntamente en el diseño y construcción de un prototipo de secadero solar de maderas con circulación de aire por convección natural. El secadero solar se construye en un aserradero ubicado en Resistencia, Chaco.

(1) Facultad de Ciencias Exactas – U.N.Sa. - CONICET

El mismo esta constituido por un túnel colector de 60 m de largo, de sección semicircular, cubierto por un plástico transparente de baja densidad. Anexado al túnel tiene una cámara de secado de 12 m³ de capacidad y una chimenea de 12 m de alto (Sogari y Saravia, 2003). Las técnicas de secado con energía solar son también ensayadas para la producción agrícola en general. Condori et al (2006) construyen en Huacalera, Quebrada de Humahuaca, dos secadores solares, cada uno de los cuales consta de un banco de colectores de 100 m² de superficie de planta. Las cámaras de secado tienen 10 m² de superficie y la circulación del aire es forzada. Un tercer secadero, en funcionamiento en General Paz, Salta, es de tipo indirecto respecto a la incidencia del sol sobre el producto, de flujo de aire forzado y de escala semi-industrial si se considera la capacidad de carga de la cámara y la velocidad de secado (Sogari *et al*, 2008).

En general, los diseños presentan algunas regularidades. La cámara de secado recibe el calor por aporte solar directo y por aire caliente proveniente de colectores adicionales. La circulación del aire desde los colectores y adentro de la cámara se logra por agregado de una chimenea (Iriarte et al, 2009 ; Bistoni, *et al*, 2011) o mediante forzadores de aire (Condori *et al*, 2006 ; Sogari *et al*, 2008). El tamaño y la disposición de los colectores están directamente relacionados con la cantidad de producto a secar, las condiciones climáticas y el porcentaje de agua en peso del producto antes y después del secado.

MATERIALES Y MÉTODO

Para el diseño del secadero, además de los antecedentes citados, se tuvieron en cuenta:

- El porcentaje en peso de agua a evaporar en el proceso de secado.
- La cantidad y tipo de madera a secar.
- El recurso solar disponible en la zona de instalación del dispositivo.

La Tabla 1 muestra un listado de especies arbóreas y sus densidades relativas, antes y después del secado. Algunas de las especies citadas son típicas de Catamarca y otras se consiguen fácilmente en el mercado de la madera local. Las densidades relativas permiten determinar el porcentaje de humedad de cada una y el peso de agua que será necesario evaporar en el procedimiento de secado. Se toma para el pre-dimensionamiento del secadero, un promedio de las humedades relativas porcentuales.

Variedad de Madera	Densidad húmeda (kg.m ⁻³)	Densidad seca (kg.m ⁻³)	humedad
Algarrobo blanco (Prosopis alba)	1040	730	29.8%
Algarrobo chileno (Prosopis chilensis)	1030	725	29.6%
Algarrobo colorado (Prosopis juliflora)	1065	770	27.7%
Algarrobo negro (Prosopis nigra)	1170	900	23.1%
Algarrobo negro del Chaco (Prosopis hassleri)	1070	775	27.6%
Catiguá guazú (Trichilia catigua)	1140	880	22.8%
Cebil colorado (Piptadenia macrocarpa)	1200	950	20.8%
Cedro misionero (Cedrela tubiflora)	910	550	39.6%
Cedro salteño (Cedrela balansae)	810	440	45.7%
Ciprés (Austrocedrus chilensis)	880	530	39.8%
Duraznillo (Ruprechtia corilifolia)	1060	760	28.3%
Duraznillo morado (Coccoloba amorphoides)	1100	820	25.5%
Guatambú (Balfourodendron riedelianum)	1100	840	23.6%
Guatambú amarillo (Aspidosperma olivaceum)	1090	765	29.8%
Lapacho amarillo del N.O. (Tabebuia pulcherrima)	1215	990	18.5%
Lapacho negro (Tabebuia ipe)	1200	1010	15.8%
Lapacho rosado (Tabebuia avellaneda)	1230	1015	17.5%
Molle de beber (Lithraca molleoides)	1050	750	28.6%
Molle negro (Schinus polygamus)	1005	690	31.3%
Mora colorada (Chlorophora tinctoria var polyneura)	1200	930	22.5%
Ñandubay (Prosopis algarrobilla)	1250	1050	16.0%
Humedad Promedio			27%

Tabla 1 – Datos de densidad de madera antes y después del procedimiento de secado.

Recurso solar:

Se considera una densidad de potencia solar promedio anual de 800 W.m⁻², de acuerdo con datos tomados de la Red Solarimétrica Argentina (Grossi Gallegos y Atienza, 1988). La misma fuente provee una densidad de energía promedio diaria de 4.8 kW-h.m⁻².día. Si consideramos que en la zona de instalación del secadero solar, se cuenta con una probabilidad de 270 días de sol por año (día claro), esto permite estimar una densidad de energía anual de 1.296 MWh.m⁻².año.

$$De = \frac{Dp \cdot R}{1000} \quad [1]$$

$$Da = De \cdot d \quad [2]$$

Materia prima: Madera

Se estima para la etapa de testeo del prototipo, una carga de 12000 kg de madera por mes, lo cual implica que por año se secan 144000 kg de madera. De acuerdo con los datos que se muestran en Tabla 1, el promedio de humedad porcentual de la madera a secar es del 27%, lo cual implica un peso de agua a evaporar de 38660 kg/año.

$$Pagua = Pmad * p \quad [3]$$

Requerimiento energético del secadero

Dado que la entalpía de vaporización del agua a presión atmosférica es $E_v=2253 \text{ kJ.kg}^{-1}$, se concluye que será necesaria una entalpía anual de $E=87113 \text{ MJ.año}^{-1}$ para evaporar el contenido de agua de la madera a secar.

$$E = E_v * Pagua/1000 \quad [4]$$

Teniendo en cuenta que el rendimiento térmico del secadero solar está estimado en $\delta = 0.7$ se requerirá una superficie mínima de colección solar de 26.67 m^2 para satisfacer el requerimiento energético.

$$S_{min} = \frac{E}{D_a * \delta} \quad [5]$$

Como además sabemos que 1 MJ es equivalente a $2.7778 \times 10^{-4} \text{ MW-h}$, la entalpía total anual también puede expresarse en MW-h.año^{-1} . Se obtiene así un valor de $E=24,2 \text{ MW-h.año}^{-1}$. De esta manera se estima la energía que será necesaria para secar una carga mensual de 36 T de madera. La Tabla 2 presenta un resumen de los resultados.

RECURSO SOLAR	Densidad de Pot. (W.m^{-2})	Radiación (h.día^{-1})	Dens.Energía diaria ($\text{kWh.m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)	Días.año ⁻¹	Dens. Energia anual ($\text{MW-h.m}^{-2} \text{ año}^{-1}$)	
	800	6	4.8	270	1.296	
MADERA	Carga mensual (kg)	Cargas por año (Nº)	Madera a secar por año (kg.año^{-1})	% agua	Vol. de madera por carga (m^3)	
	12000	12	144000	27%	11	
REQUERIMIENTO ENERGÉTICO	Producción anual (kg.año^{-1})	Agua a evaporar (kg.año^{-1})	Entalpía de vaporización (kJ.kg^{-1})	Entalpía (MJ.año^{-1})	Entalpía (MW-h.año^{-1})	Rendimiento térmico
	144000	38660	2253	87113	24.2	0.7
DISEÑO	Superficie mínima de colec. (m^2)	Largo de la cámara (m)	Ancho de la cámara (m)	Sup cámara (m^2)	Sup c/colector (m^2)	
DIMENSIONES	26	4	2.5	10	16	

Tabla 2: Resumen de resultados de los estimativos de diseño

Diseño

En el diseño se tienen en cuenta dos zonas de colección solar definidas. Existe un colector solar en le techo de la cámara de secado que tiene una superficie de 10 m^2 , esto es 4 metros de largo por 2.5 m de ancho (Fig. 1). El resto de la superficie de colección se obtiene con un colector adicional adosado a la cámara y cuyas dimensiones serán 8 metros de largo por 2 metros de ancho sumándose así los 16 m^2 restantes para cubrir el requerimiento energético mínimo. (Fig. 2)

Componentes del secadero de madera

Pared sur: Para esta pared, que no recibe radiación solar en todo el año, se requiere de material aislante. Se evita de esta manera la pérdida de energía hacia el exterior del secadero. Se emplea, ladrillo hueco, de $19 \times 18 \times 33 \text{ cm}$, con recubrimiento exterior convencional a base de mortero de cemento con acabado tipo estuco.

Cubierta: Se consideran dos tipos de cubiertas: Policarbonato y Polietileno cristal. De ambas posibilidades se selecciona la más económica, esto es el Polietileno Cristal con protección UV. No se considera el uso de vidrio común por razones de seguridad. La selección responde a criterios de economía de recursos ya que se trata de un prototipo experimental.

Estructura: La estructura es muy sencilla ya que no deberá soportar cargas importantes. Se construye empleando caño estructural con los tensores y enganches necesarios para asegurar la cubierta.

Piso: El piso se construye con un contra-piso de hormigón de 15 a 20 cm aproximadamente ya que deberá soportar cargas concentradas importantes (cada carro transporta 4 T de madera húmeda). Se adicionan rieles metálicos para el

desplazamiento de los carros que permitan el ingreso y egreso de la madera al secadero. No se requiere aislación térmica adicional en el piso del secadero.

Carros: Los carros permiten ingresar los paquetes de madera (palets) al secadero solar en pilas de 2 m de ancho, por 1 m de largo y por 2.4 m de altura, lo cual implica un peso de 3000 a 4000 kg de madera húmeda por cada carro. El carro se desplaza sobre un riel instalado al efecto y se tracciona con un cable adosado a un mecanismo de polea. A medida que se ingresan nuevos carros, los primeros van aproximándose a la salida del secadero hasta completarse el secado.

Colector adicional: Se construye mediante un alisado de cemento pintado de negro para favorecer la absorción de calor y se cubre con una bóveda semicilíndrica de Nylon cristal. Uno de sus extremos está abierto al exterior para el ingreso de aire y el otro extremo se conecta al secadero a fin de permitir el ingreso del aire precalentado en la cámara de secado.

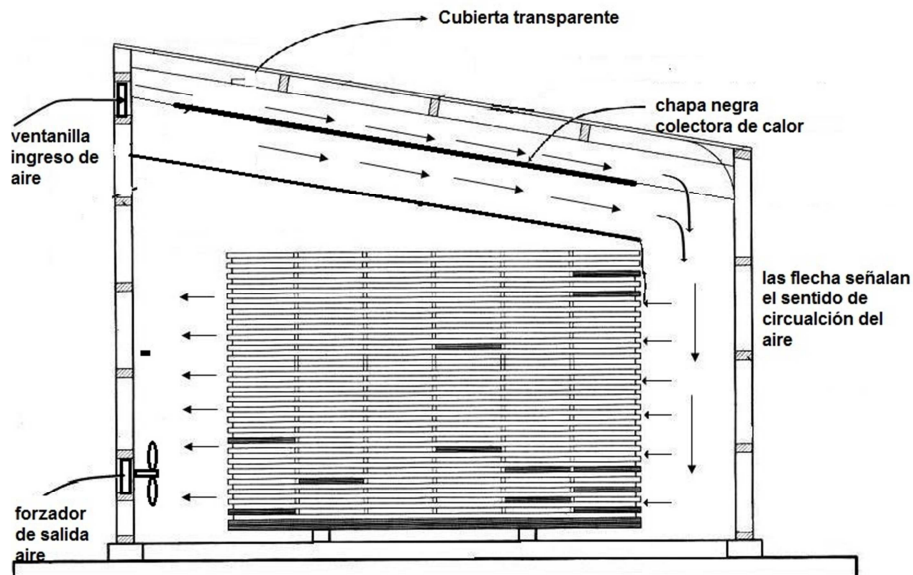


Figura 1. Corte lateral del secadero proyectado

Adquisición de datos, censado de temperatura, humedad y radiación solar:

El sistema de censado de temperatura, humedad y radiación solar en el secadero está totalmente automatizado y se realiza mediante el empleo de Data Loggers Marca HOBO. Los dispositivos de censado se pre-programan empleando el software provisto por el fabricante (BOX-CAR). La capacidad de almacenamiento de datos permite almacenar información por períodos de 30 días, tomando datos cada 10 a 15 minutos. Los datos se pueden transferir a una PC, empleando el mismo software (BOX-CAR) y exportar para procesarse con planillas de cálculo tipo EXCEL o similar. La gran ventaja que presenta el empleo de los data logger Hobo es que son totalmente inalámbricos y se pueden retirar del secadero o reubicarse de acuerdo a las condiciones de trabajo que se desee optimizar. El registro de las condiciones en el interior del secadero solar y las mediciones de HR en la madera permiten establecer con precisión los momentos de arranque y parada del forzador de aire.

Medición de humedad en madera:

La humedad contenida en la madera se mide empleando un equipo SINOMETER MD-4G, siguiendo las instrucciones del fabricante. Para ello se agregan testigos entre las pilas de madera a secar. La ubicación de los testigos se selecciona a fin de poder detectar zonas de mayor o menor incidencia del proceso de secado. En caso de ser necesario se deberán rotar los paquetes de madera a fin de homogeneizar el secado. Se lleva también registro del peso de los testigos en cada medición para verificar la coherencia de las mediciones y su correlación con la humedad medida.



Figura 2. Fotografía del prototipo experimental construido

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1° Ensayo: Secadero solar vacío

La Figura 3 muestra las curvas obtenidas durante un ensayo de cuatro días en el mes de Noviembre, con el secadero solar vacío (sin carga de madera en su interior). El mismo se realiza a fin de determinar el rendimiento térmico del dispositivo y para detectar posibles defectos constructivos. Se colocan tres recipientes con agua (200 litros) en el interior a fin de proveer fuentes de humedad evitando de esta manera el aumento excesivo de temperatura y para corroborar el funcionamiento del sensado de humedad.

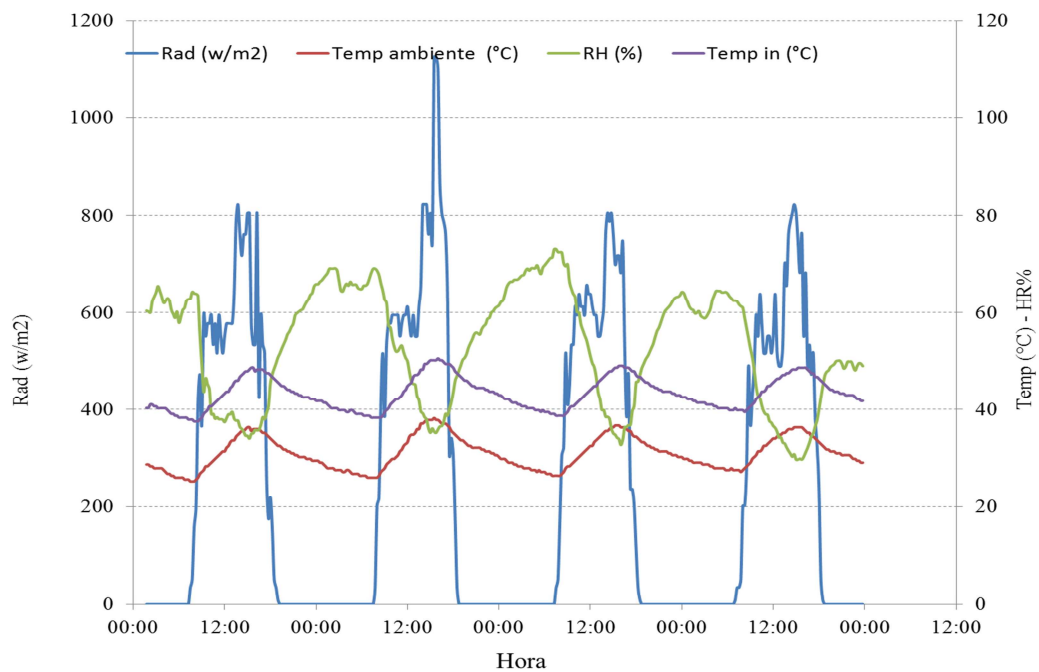


Figura 3. Curvas de temperatura, humedad y radiación durante el primer ensayo

Se puede observar en las curvas que el ensayo se realiza durante cuatro días parcialmente nublados por lo que la radiación no es muy elevada (apenas se superan los $800 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$). No obstante la temperatura ambiente exterior llega a 38°C el segundo día y supera los 35°C en los otros tres días. La temperatura en el interior del secadero es entre 10°C y 15°C superior a la temperatura externa, y no se detectan pérdidas importantes de calor. No se puso en marcha hasta este momento, el sistema automático de control del forzador de aire. La humedad relativa aumenta mucho durante la noche, cuando se enfría el aire en el interior del secadero. Se observa un pico de HR% a la madrugada del tercer día de ensayo y justo antes de que el sol comience a calentar nuevamente el secadero.

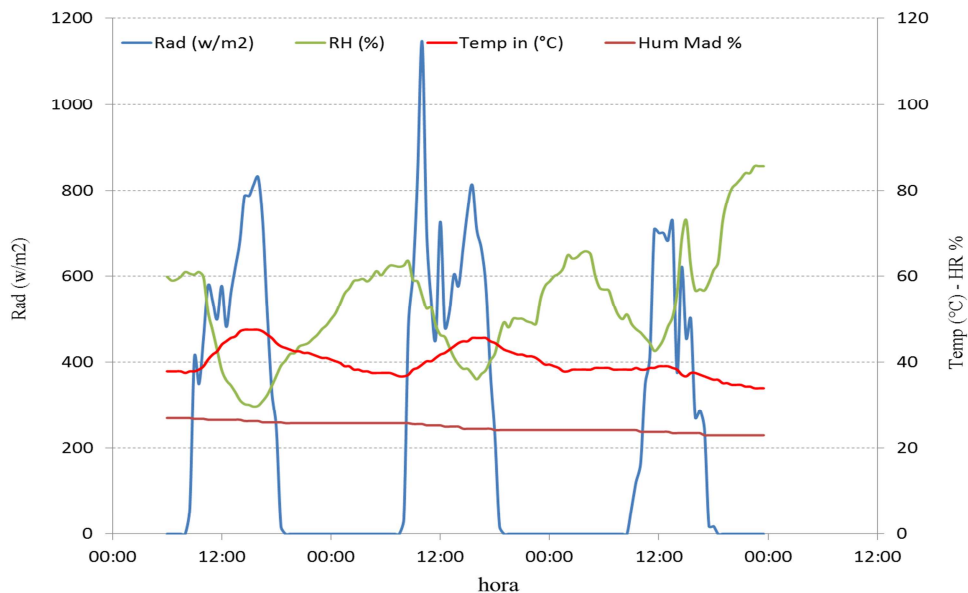


Figura 4. Curvas de temperatura, humedad, radiación y humedad en madera durante el segundo ensayo

Para llevar adelante el segundo ensayo se carga el secadero con 4.000 kg de madera con un contenido de humedad del 27% promedio. Luego de tres días la humedad de los testigos es de 23% promedio. Se puede observar en la Figura 4 que durante la noche se produce una importante disminución de la Hr% adentro del secadero, posiblemente por infiltraciones de aire seco desde el exterior debido al clima ventoso. La HR% se incrementa al final del tercer día por una importante disminución de la temperatura en el interior del secadero, pero esto no incide en el proceso de secado ya que no se observa un aumento en la humedad de la madera. Se estima que, con buen clima (sin lluvia) la madera podría alcanzar el 15% en quince a veinte días más.



Figura 5. Vista del secadero cargado parcialmente y de la pared sur con el forzador de aire instalado

CONCLUSIONES

Analizando los resultados de esta experiencia, 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 el secadero 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, utilizar el tipo de colector plano con cubierta transparente, así como un sistema de ventilación de convección forzada del flujo de aire caliente para evitar posibles complicaciones en la operatividad.

En relación a la operación del secadero, es oportuno aclarar que no resulta conveniente formar pilas con tablas de diferente grosor, ya que las piezas de mayor espesor tardan más en secarse. En el momento de preparar la carga, es necesario tener en cuenta que el secado se produce al pasar aire caliente y con bajo contenido de humedad a través de las tablas. Esta circulación debe ser lo más homogénea posible en cuanto a su velocidad, caudal y distribución, evitando la presencia de obstáculos o de

huecos. Cada capa se debe conformar colocando las tablas con sus cantos unidos para obligar al aire caliente del sistema a circular entre capas únicamente, aumentando así la eficacia.

Se espera que este estudio sirva de base para la construcción de otros dispositivos con la 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 los datos de secado que se obtuvieron, ya que constituyen una herramienta básica para la operación de este tipo de secadero.

REFERENCIAS

- Bistoni, S., Watkins M., Iriarte A., Luque V., Sanchez H. (2011) – Secadero con chimenea sola – VII Jornadas de Ingeniería del NOA – Catamarca – En prensa.
- Condori M., Echazú R., Saravia L. (2006). Secador solar indirecto con flujo de aire forzado para Huacalera, Quebrada de Humahuaca. Revista ERMA, Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 19, Art. N° 62. - ISSN 0328-932X.
- Grossi Gallegos, H. y Atienza, G. (1988) Acerca de la representatividad temporal de los valores de radiación solar global medidos por la Red Solarimétrica. En *Actas de la 12a. Reunión de Trabajo de la ASADES*, Salta, Argentina, vol. 1, pp. 101-106.
- Iriarte A., C. Rodríguez, V. García y V. Luque. (2009). Secadero de productos agrícolas tipo tendalero transformado en secador solar pasivo. *Avances en energías renovables y medio ambiente*, Vol. 13, pág. 02.01-09.
- Sogari N., Saravia, L. (2003). Modelización de un secadero solar de maderas con circulación de aire por convección natural. *Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol 7, N°1, pág. 02.07 – 02.12.
- Sogari N, Gomez C. Busso A, Condori M. (2008). Secadero solar por convección de aire caliente para deshidratación de almidón de mandioca destinado a pequeños productores rurales de la provincia de corrientes en fase de construcción. *Revista ERMA, Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 22, Art. N° 24 - ISSN 0328-932X.
- Solís Rodríguez, Miguel A. Cerón Cardeña, Israel González Ahumada, (2003) - Diseño y operación de una estufa solar para secar madera. *Publicación del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)*, México, pág. 35 - 48

NOMENCLATURA

Parámetro	Denominación	Unidad de medida
D_p	Densidad de potencia solar	(W/m^2)
R	Radiación promedio	($h/día$)
D_e	densidad de energía	($KW-h/m^2 día$)
D_a	Densidad anual	($MW/m^2 año$)
d	N° de días claros por año	($días/año$)
P_{agua}	Peso total de agua a evaporar	($Kg/año$)
P_{mad}	Peso de madera a secar	($Kg/año$)
p	porcentaje de agua promedio	(%)
E_v	Entalpía de vaporización	(KJ/Kg)
E	Entalpía total	($MJ/año$)

ABSTRACT: This piece of work shows the first results obtained during trials of the solar dryer designed and built to be used in wood drying processes. The device is installed in the factory INGES S.A., province of Catamarca, Argentina, and is partially funded by SEPYME. The design is an adaptation of dryers to wood, fruit, and vegetable processing. Some solar radiation collectors were added arranged in line. Hot air goes into the drying chamber by the action of a forcer. The drying process using this technology allows us to get a wood with a controlled humidity, which impacts on a better end product quality. Tests with the device allows us determine performance and correct sizing, based on the amount and type of wood to be dried. Drying periods are higher than the process with a fuel furnace, but considerably lower than those of air drying.

Key Words: Solar energy - Drying - Technology - Transfer