

NOTA TECNICA No. 5

Secador Solar para madera – Condiciones operativas

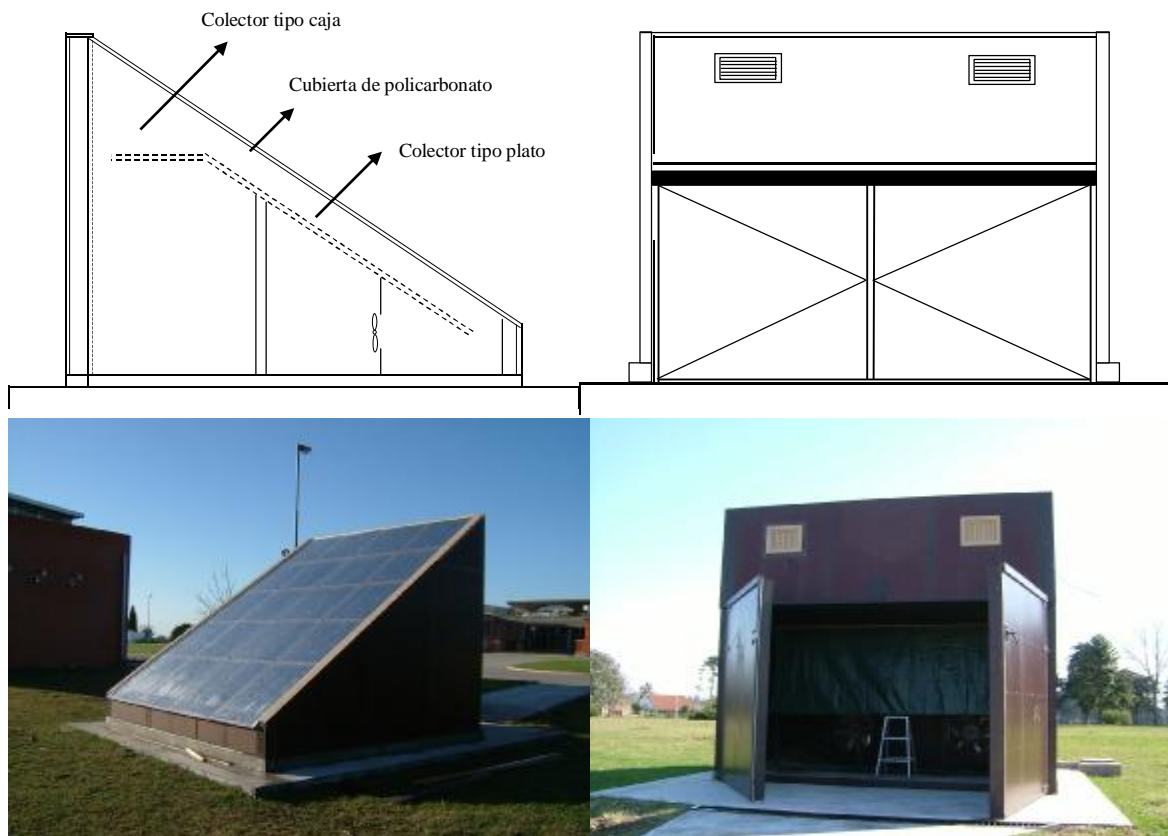
Ing. Andrés Ono (aono@latu.org.uy)

Ing. Agr. Alejandro Venturino (aleventu@latu.org.uy)

La investigación y el desarrollo de energías alternativas tienen cada vez más importancia en los procesos industriales. El aprovechamiento de la energía solar como alternativa a los combustibles fósiles es un área de gran desarrollo en las últimas décadas. El secado solar de la madera es un proceso que puede complementar el secado en horno convencional, con una inversión no muy elevada y costos operativos mínimos.

Desde octubre de 2004 está funcionando en el predio del LATU un horno de secado solar para madera. A continuación se presentan algunas características relevantes:

- Ubicación: Lat. 34° 54' 43'' S, Long. 56° 04' 28'' W, Alt. 26.7 m s.n.m.
- Horno tipo Semi-Invernadero con aislación de poliestireno expandido.
- Techo de policarbonato 24 m²
- Colector solar tipo plato y tipo caja (contrachapado fenólico negro).
- Ventiladores: 2 de 1/2 HP cada uno (60 cm de diámetro) con variadores de velocidad.
- Ventilás: 2 al frente del horno.
- Piso: losa de hormigón 25 m² y 15 cm de profundidad.
- Capacidad: 2,5 m³ de madera.
- Area de colector por volumen de capacidad: 9.6 m²/m³



Figuras 1 y 2.- Esquemas y vistas del secador solar

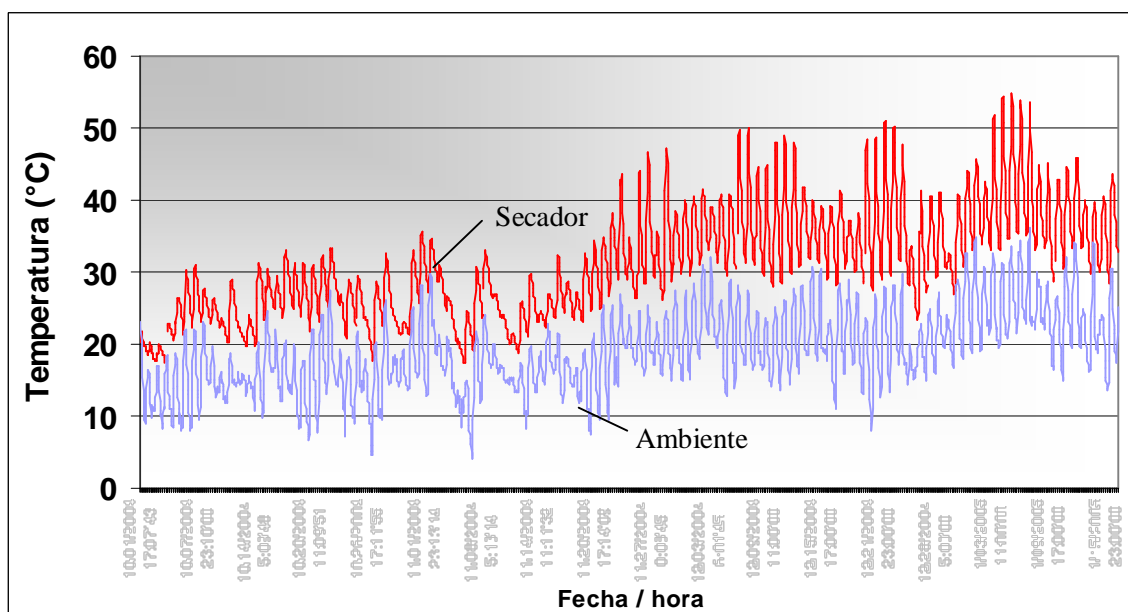
Condiciones de secado dentro del horno solar

A continuación se resumen los factores que inciden en las condiciones que se desarrollan dentro del horno solar. Las condiciones fueron registradas en el período comprendido entre octubre y enero (primavera-verano) durante una corrida de secado de *Eucalyptus tereticornis* (colorado). Los valores de temperatura y humedad relativa (HR) dentro del secador se registraron utilizando 2 sensores, uno en la parte superior de la estiba y otro en la parte inferior de la misma, los datos que se presentan en los gráficos son un promedio.

Temperatura

Como se observa en el gráfico 1, la temperatura en el horno solar sigue el mismo patrón que la temperatura ambiente siendo superior en promedio 12°C. La máxima diferencia entre la temperatura del horno y la ambiente fue de 28.8°C. La mínima diferencia luego de comenzado el secado fue de 0.9°C (un día con una humedad relativa de 79.5 % y una temperatura ambiente de 22.7°C a las 15 hs).

Gráfica 1.- Temperatura dentro y fuera del secador solar

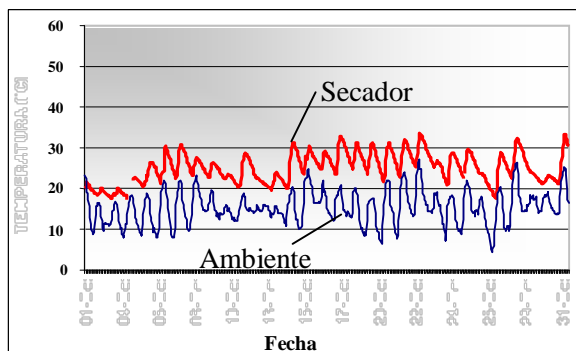


Se presentan asimismo, los datos de temperatura para dos meses, Octubre y Enero, en donde se pueden apreciar las diferencias en cuanto a temperaturas máximas alcanzadas y tendencia durante estos dos meses.

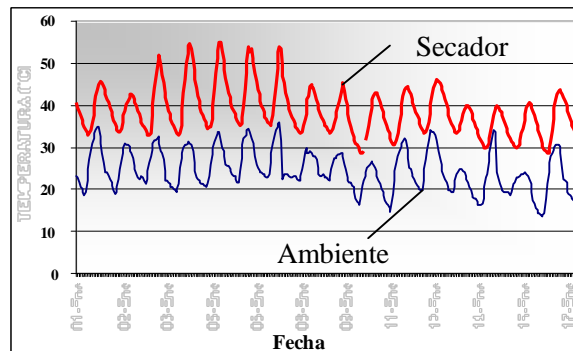
Tabla 1.- Resumen de condiciones alcanzadas

	Temperatura media (°C)		Temperatura máxima (°C)		Temperatura mínima (°C)	
	Ambiente	Secador	Ambiente	Secador	Ambiente	Secador
Octubre	15.3	25.1	27.4	33.5	4.5	17.6
Enero	24.6	38.7	36.1	54.9	13.7	28.6

Gráfica 2.- Temperaturas durante octubre

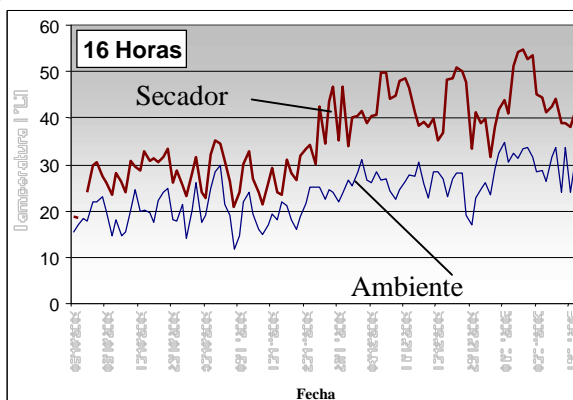
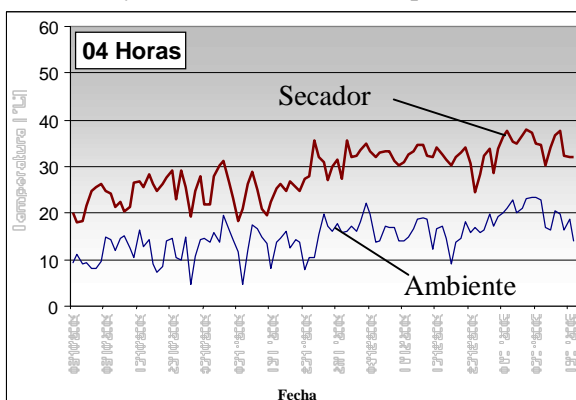


Gráfica 3.- Temperaturas durante enero



A continuación se presenta la evolución de la temperatura ambiente y la temperatura dentro del horno para una hora fija durante todo el período de secado. Las horas que se tomaron como referencia para contrastar fueron las 04 hs y las 16 hs. Es de notar que la diferencia máxima entre temperaturas exterior e interior fue registrada cerca de las 16 horas.

Gráficas 4 y 5.- Evolución de la temperatura a las 04 y a las 16 horas



Humedad relativa

Se pueden observar dos etapas claramente diferentes. Una primera etapa en la que la humedad relativa del horno se ve notoriamente influenciada por el contenido de humedad de la madera recién ingresada y el mantenimiento de las ventilas cerradas. En el secado de *E. tereticornis* la HR subió hasta 100% y se mantuvo durante 1 semana, hasta que el contenido de humedad de la madera bajó hasta aproximadamente 45%.

Una segunda etapa en la que se observa que la HR del horno sigue el mismo patrón que la HR ambiente cuando el contenido de humedad de la madera es inferior a 45%.

La HR en el interior del secador también está afectada por las condiciones de lluvia y viento, ya que el cierre de las puertas no es completamente hermético.

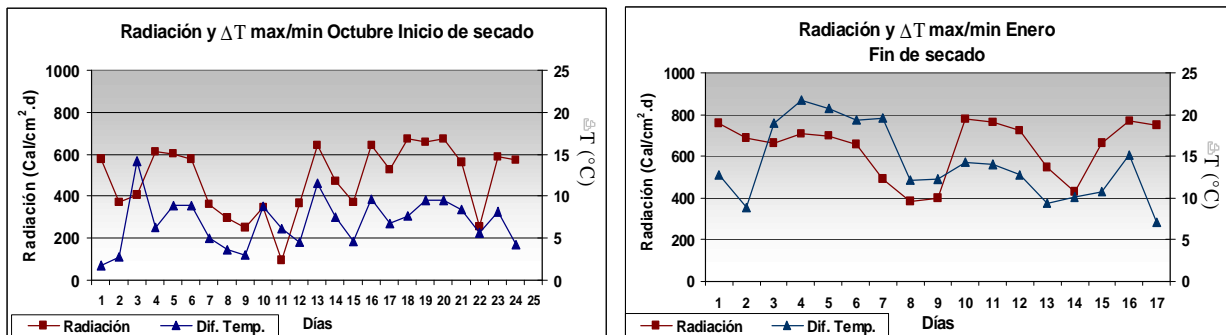
Tabla 2.- Resumen de las condiciones de HR

	HR media (%)		HR máxima (%)		HR mínima (%)	
	Ambiente	Secador	Ambiente	Secador	Ambiente	Secador
Octubre	85.3	74.4	100	99	36.4	49.5
Enero	79	34.9	100	59.5	28.8	17

Relación temperatura y radiación solar

En los siguientes gráficos se presenta la relación entre la radiación solar y la amplitud térmica, ΔT . Ésta es la diferencia entre las temperaturas máxima y mínima correspondientes al día en que se toma la radiación. Se presenta este parámetro dado que la radiación solar incide directamente en el aumento de la temperatura durante el día. Si bien la correlación no es excelente se puede observar la forma en que el ΔT acompaña a la radiación solar.

Gráficas 7 y 8.- Relación entre Temperatura y Radiación



Contenido de humedad de equilibrio teórico

En función de las condiciones de temperatura y humedad relativa dentro del horno se puede conocer el contenido de humedad de equilibrio (CHE) dentro del mismo. Se utilizó la ecuación 1 para el cálculo del CHE (Wood Handbook, 1999, pag. 3-5).

$$CHE = \frac{1800}{W} \left[\frac{KH}{1 - KH} + \frac{K_1 KH + 2K_1 K_2 K^2 H^2}{1 + K_1 KH + K_1 K_2 K^2 H^2} \right] \quad \text{Ec. 1}$$

con

$$W = 349 + 1.29T + 0.00135T^2$$

$$K = 0.805 + 0.000736T - 0.00000273T^2$$

$$K_1 = 6.27 + 0.00938T - 0.000303T^2$$

$$K_2 = 1.91 + 0.0407T - 0.000293T^2$$

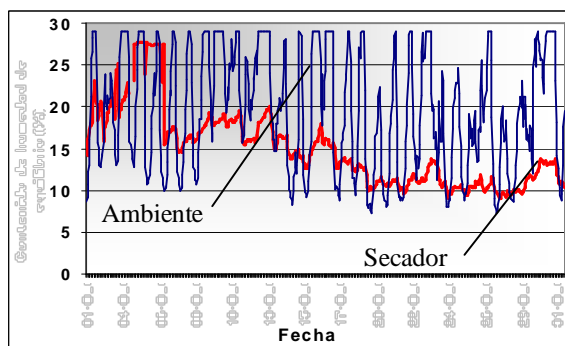
CHE = contenido de humedad de equilibrio (%)

T = temperatura (°C)

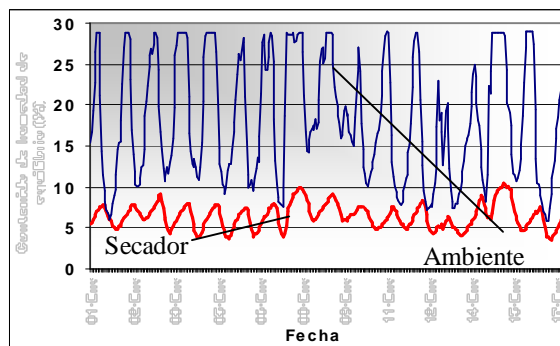
H = humedad relativa(%)/100

Las siguientes gráficas (10 y 11) muestran la evolución del contenido de humedad de equilibrio teórico dentro y fuera del horno para los meses de octubre (inicio del secado) y diciembre (final del secado).

Gráfica 10.- CHE al inicio del secado



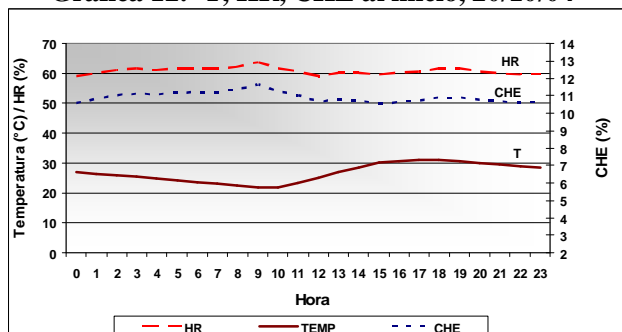
Gráfica 11.- CHE al final del secado



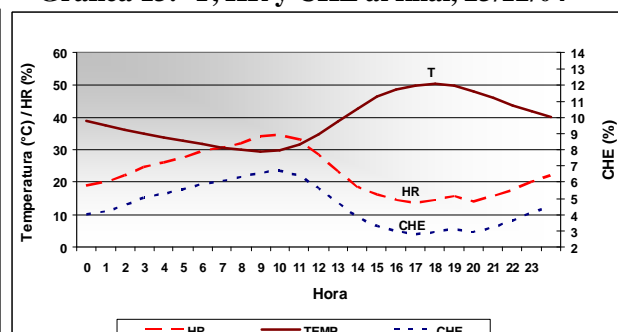
Como se observa en las gráficas, los valores de contenido de humedad de equilibrio (CHE) que se presentan dentro del horno son más atenuados (presentando picos no tan abruptos) lo que permite un secado de la madera más gradual que a la intemperie. Esto se suma al control del viento y al control de las ventilas. Los aumentos de CHE que se dan durante las noches actúan favorablemente como un acondicionamiento pero a temperaturas bajas. A su vez, y en especial en la etapa final del secado (graf. 11) se observa que el CHE dentro del horno es menor que el CHE a la intemperie lo cual resulta en un secado neto y un CH de la madera final menor que el que se podría obtener a la intemperie

A continuación se muestra la variación durante el día de la T y la HR para dos días diferentes, uno al inicio y el otro hacia el final del secado.

Gráfica 12.- T, HR, CHE al inicio, 20/10/04



Gráfica 13.- T, HR y CHE al final, 23/12/04



La gráfica 12 muestra las condiciones dentro del horno solar para un día soleado (658.6 cal/cm².d) y 20 días después de iniciado el secado. Puede observarse que las condiciones se mantuvieron relativamente constantes a temperaturas entre 20 y 30 °C y contenidos de humedad de equilibrio entre 10.5 y 11.5 %.

La gráfica 13 muestra las condiciones dentro del horno solar para un día soleado (791.2 cal/cm².d) y 83 días después de iniciado el secado. Se puede observar un primer período (de 01 a 13 horas) con una media de CHE de 5% y un segundo período (de 14 a 24 horas) con condiciones más severas con una media de CHE de 3.5%. Durante las 24 horas el CHE se mantuvo por debajo del 6% continuando con el secado de la madera. A diferencia de un día cercano al final del secado, un día en los comienzos presentó una variación menos pronunciada de los parámetros a lo largo del día. Esto se debe principalmente a dos factores, el primero, la estación, primavera, en donde la radiación solar aún no es tan fuerte y el segundo, y no menos importante, el alto CH de la madera

que, por estar en las primeras etapas del secado, hace que la HR dentro del horno se mantenga en valores altos.

Factores de manejo

En este caso las condiciones que se pueden controlar son: el viento, pudiendo regular su velocidad a través de los variadores de frecuencia de los ventiladores, y el sentido de circulación y la renovación de aire dentro del horno por apertura o cierre de las ventilas.

La velocidad del viento se midió para diferentes frecuencias de los ventiladores en una estiba de dimensiones: 87 cm de ancho, 3,10 m de largo y 1,20 de alto, construida con separadores de 25 mm de espesor distribuidos cada 40 cm. En el secado de *Eucalyptus tereticornis* se utilizaron velocidades de viento menores a 1 m/s debido al peso específico aparente básico de la madera y al espesor de las tablas.

Para casos en los que es necesario que la subida de temperatura sea gradual y las condiciones ambientales son extremas, se puede recurrir a un tejido de sombra para colocar sobre el policarbonato. A pesar de haber realizado un secado durante el verano, esto no fue necesario.

Cuando se necesita un aumento de la humedad relativa, se recurre a la utilización de bandejas de agua que por evaporación la aumentan.

Resultados preliminares de secado de *Eucalyptus tereticornis*

En el primer ensayo de secado realizado en el secador solar, se utilizó *Eucalyptus tereticornis* (colorado). La estiba consistió en tablas de 3,1 m de largo, 125 mm de ancho y 40 mm de espesor.

	CHM al inicio (%)	CHM seco (%)
Media	60.2	9.9
std	7.2	0.5
CV (%)	12.0	5.1
n	7	7
TIEMPO	108 días	

Tabla 3.- Resultados del secado (CHM, contenido de humedad de la madera)

A los 90 días del secado el contenido de humedad de la madera fue de 12%, sin embargo el secado se continuó hasta 108 días para evaluar si se logran niveles de CHM inferiores y el tiempo requerido.

Los resultados de tablas evaluadas luego del secado fueron positivos presentando contracciones volumétricas promedio de aproximadamente 15 % y un nivel defectos moderado tomando en cuenta que se trata de una madera difícil de secar.

En la siguiente nota técnica se presentarán en detalle los resultados de este secado.