



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS

Facultad de Ingeniería

Campus I

Coordinación de Investigación y Posgrado



**“Diseño, construcción y evaluación de una estufa solar
activa e indirecta, para el secado de madera en Tuxtla
Gutiérrez, Chiapas”**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

ING. ARMANDO LEÓN GÓMEZ PS1278

DIRECTOR DE TESIS:

DR. MIGUEL ÁNGEL AGUILAR SUÁREZ

TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS; NOVIEMBRE DE 2021.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS
FACULTAD DE INGENIERÍA C-I



Tuxtla Gutiérrez; Chiapas.
A 31 de mayo del 2021
Oficio. FI. 01/729/2021

C. Armando León Gómez
Maestría en Ingeniería con formación en Hidráulica
Presente.

Por este medio comunico a usted, que se autoriza la impresión de su trabajo de tesis denominado:
"Diseño, construcción y evaluación de una estufa solar activa e indirecta, para el secado de madera
en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas", para que pueda continuar con los trámites de titulación para la obtención
del Grado de la Maestría en Ingeniería con formación en Hidráulica.

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

Atentamente.
"Por la conciencia de la necesidad de servir"

Dr. José Alonso Figueroa Gallegos
Encargado de Dirección



C. c. p. Dra. Daisy Escobar Castillejos. Coordinadora de Investigación y Posgrado. - F.I.
Archivo Minutario.
JAFG/DEC/tcpg*

Tels. (961) 617-80-00 ext. 1560. (961) 615-03-22. www.ingenieria.unach.mx

Boulevard Belisario Domínguez, Km 1081, Sin Número. | Terán Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. México. C.P. 29050. | www.unach.mx



Código: FO-113-09-05
Revisión: 0

CARTA DE AUTORIZACIÓN PARA LA PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DE LA TESIS DE TÍTULO Y/O GRADO.

El (la) suscrito (a) Armando León Gómez,
Autor (a) de la tesis bajo el título de "Diseño, construcción y evaluación de una estufa solar activa e indirecta, para el secado de madera en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas",
presentada y aprobada en el año 20 21 como requisito para obtener el título o grado de Maestría en Ingeniería, autorizo a la Dirección del Sistema de Bibliotecas Universidad Autónoma de Chiapas (SIBI-UNACH), a que realice la difusión de la creación intelectual mencionada, con fines académicos para que contribuya a la divulgación del conocimiento científico, tecnológico y de innovación que se produce en la Universidad, mediante la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Consulta del trabajo de título o de grado a través de la Biblioteca Digital de Tesis (BIDITE) del Sistema de Bibliotecas de la Universidad Autónoma de Chiapas (SIBI-UNACH) que incluye tesis de pregrado de todos los programas educativos de la Universidad, así como de los posgrados no registrados ni reconocidos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad del CONACYT.
- En el caso de tratarse de tesis de maestría y/o doctorado de programas educativos que sí se encuentren registrados y reconocidos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), podrán consultarse en el Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma de Chiapas (RIUNACH).

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; a los 09 días del mes de diciembre del año 20 21.

Armando León Gómez
Nombre y firma del Tesista o Tesistas

DEDICATORIAS

A DIOS

*Fuente inagotable de luz, quien me
permite concretar cualquier
empresa.*

A MI PADRE

*Ahora eres luz, y he cumplido la
promesa que te hice. “En el hijo, se
puede volver...” Te amo.*

A MI MADRE

*Que siempre me apoyas y
acompañas. Gracias por tu vida,
madre amada.*

Ing. Armando León Gómez

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Dios, infinita presencia que inunda mi vida de luz y sentido. Que me permite transitar por este camino y acercarme a él con cada gota de conocimiento.

A mis padres, y en especial a mi madre que me acompaña y soporta en mi diario caminar. Soy lo que ellos han cultivado, mi base y ejemplo. Son los seres que me impulsan a ser mejor cada día. No hay manera de saldar la deuda que tengo con ellos.

Esta tesis y su concreción, no hubiese sido posible sin el invaluable apoyo del Dr. Miguel Ángel Aguilar Suárez, el Mtro. Juan José Muciño Porras y la Dra. Delva del Rocío Guichard Romero, a quienes agradezco sobremanera la confianza en mi persona y la posibilidad permitida para alcanzar este objetivo.

Desde el comienzo de mis estudios de maestría, el impulso de la Dra. Daisy Escobar Castillejos ha jugado un papel crucial para el desarrollo de la misma. Quiero agradecer con el corazón, su comprensión y apoyo institucional.

Ing. Armando León Gómez

ÍNDICE

DEDICATORIAS	4
AGRADECIMIENTOS	5
INTRODUCCIÓN	8
OBJETIVO GENERAL.....	9
OBJETIVOS PARTICULARES	9
JUSTIFICACIÓN	10
ALCANCES.....	10
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES	12
1.1 Reseña histórica sobre los métodos de secado.....	12
1.2 Clasificación de los métodos de secado de madera.....	15
1.2.1 Clasificación de acuerdo al tipo de transferencia de calor.....	15
1.2.2 Clasificación según la fuente de calor	16
1.2.3 Clasificación de los sistemas de secado por energía solar	16
1.3 Diseño de un secador solar	18
1.3.1 Disposiciones tradicionales en los hornos solares	18
1.3.2 Disposición 1: Horno solar con colector integrado	19
1.3.3 Disposición 2: Horno solar con colector lateral semi-integrado	20
1.3.4 Disposición 3: Horno solar con almacenamiento	21
1.4 Rendimiento de los hornos solares	22
CAPÍTULO 2: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SECADOR SOLAR	22
2.1 Criterios de diseño y construcción de un secador solar	22
2.2 Cálculo del ángulo de inclinación	23
2.3 Diagramas constructivos del secador solar	24

CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN DEL SECADOR SOLAR	30
3.1 Metodología de evaluación del secador solar.....	30
3.2 Análisis de resultados.....	32
CONCLUSIONES	39
BIBLIOGRAFÍA.....	40

INTRODUCCIÓN

México es considerado un país megadiverso, ya que forma parte del selecto grupo de países poseedores del 70% de la diversidad mundial de especies (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad); por otra parte, cuenta con 138 millones de hectáreas de vegetación forestal, equivalente al 70% de su territorio; de esta superficie, 64.9 millones de hectáreas corresponden a bosques y selvas, en donde habitan aproximadamente 11 millones de personas, quienes satisfacen sus necesidades básicas a partir de dicho capital natural (Zamora Martínez, 2016).

Una buena parte de la población mexicana halla en la venta de la madera o sus derivados mediante procesos de transformación, su principal fuente de ingresos, por tal motivo, es importante orientar esfuerzos en el desarrollo de tecnologías que eleven la calidad de la madera al momento de su comercialización. Existen múltiples ventajas al utilizar la madera, por ejemplo, su alta resistencia a esfuerzos paralelos a las fibras, su considerable aislamiento térmico y acústico, sin mencionar sus efectos visuales estéticos. Sin embargo, estas ventajas solo se pueden obtener de manera óptima cuando la madera posee un nivel adecuado en su contenido de humedad (CH) para las condiciones de servicio ($CH < 18\%$).

Es evidente que el secado de la madera constituye una fase de suma importancia en el proceso de industrialización. Existen diversos métodos para su secado, entre los que destacan el secado al aire libre y el secado mediante estufas industriales. La implementación de todo proceso de secado implica una inversión inicial que, en el caso del secado mediante estufas industriales, suele ser considerablemente alto para el pequeño productor. Con el fin de reducir este impacto

económico, se han desarrollado tecnologías que aprovechan el uso de la energía solar en el proceso de secado de la madera.

En este trabajo de investigación aplicada, se estudia un prototipo de estufa solar para el secado de madera, en el que se implementa un sistema de convección forzada para optimizar su eficiencia de secado, diseñado y construido en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

OBJETIVO GENERAL

Diseñar, construir y evaluar una estufa solar activa e indirecta, implementando un sistema de convección forzada para el secado de madera.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Analizar y comparar los valores de humedad y temperatura al interior de la estufa solar, con respecto a estos valores en el exterior.
- Evaluar la eficiencia de la estufa solar en el secado de la madera, operada en un término de 15 días.

JUSTIFICACIÓN

El secado de la madera proporciona una materia prima de mejor calidad, adicionando ventajas técnicas dentro de las que se encuentran: la resistencia a la pudrición, el aumento de la resistencia mecánica, la conservación de formas y dimensiones, la reducción de peso, inmunización, conservación del color, mejor soporte para acabados y mejor calidad de maquinado (Arango Johnson, 1990).

El desarrollar un dispositivo de bajo costo, y de dimensiones menores a las que se encuentran comercialmente, que permita secar madera en un tiempo mucho menor que el secado al aire libre, permitirá que el pequeño productor tenga acceso a un equipo que proporcione un valor agregado a sus productos, reduciendo a su vez los costos derivados de la transportación de la madera, impactando de manera positiva en la economía de este sector productivo.

ALCANCES

En el presente trabajo de investigación se analizará el funcionamiento de una estufa solar activa e indirecta para el secado de madera en la cual se ha instalado un sistema de convección forzada operada por dos extractores de aire de 16 watts. Mediante sensores MEMS se realizarán mediciones continuas de humedad y temperatura al interior y exterior de la estufa solar, durante un periodo de 15 días, contemplados entre el 10 y 25 de febrero de 2021. De esta manera se evaluará la respuesta de la estufa solar.

No se realizará el estudio de transferencia de calor del colector solar mediante el cual opera la estufa solar, puesto que no se cuenta con los medios técnicos para el registro de datos.

Se analizará la eficiencia de secado de la estufa solar mediante el registro del contenido de humedad de 500 pies/tabla de madera de cedro (cedrela odorata) al inicio y final de un periodo de experimentación de 15 días.

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES

1.1 Reseña histórica sobre los métodos de secado

En la onceava conferencia internacional de secado de la madera IUFRO, realizada en Skelleftea, Suecia, en el año 2010, Mihaela Campean aseguró que la madera ha acompañado al ser humano desde sus primeras etapas de desarrollo, por lo tanto, la necesidad de secar la madera antes de usarla para la fabricación de diversos objetos, fue reconocida desde épocas muy tempranas. En la antigüedad, el secado al aire libre y el secado con arena eran las únicas técnicas utilizadas y, no fue sino hasta finales del siglo XVII que la posibilidad de utilizar la energía solar para acelerar el proceso de secado fue descubierta, cuando fueron utilizados los invernaderos en la corte del rey francés Luis XIV (1638-1715) no solo para el cultivo de hortalizas sino también para el secado de madera.

Se estima que el secado de madera en horno comienza a principios del siglo XVIII, cuando los primeros secaderos de madera fueron construidos en las proximidades de astilleros, industrias metalúrgicas e industrias de construcción de maquinaria en las primeras etapas de la revolución industrial, estos eran de calentamiento simple y utilizaban los gases resultantes de la quema de residuos de madera como agente secante. Alrededor de 1850, en cuanto fueron reconocidos los beneficios de la circulación forzada del aire, el secado en horno dio un paso, iniciando la etapa del secado artificial, este se perfeccionó en los Estados Unidos y posteriormente se introdujo y desarrolló aún más en Europa, después de la segunda guerra mundial.

Existen diversos estudios sobre el desarrollo histórico del secado de la madera. En 2010,

Mihaela Campean, estableció la siguiente secuencia cronológica:

Antes de Cristo: Secado al aire libre, secado en arena, secado con humo.

1700: Primeros secadores de convección natural.

1720: Método Cumberland (Secado en arena).

1844: Inicios del secado artificial con convección forzada.

1865: Patente de secado con vapor (Robbins).

1867: Patente de secado a alta temperatura (Allen and Campbell).

1879: Secado por ebullición de aceite (Proceso Boulton).

1893: Patente de secado al vacío (Howard).

Secado en ozono (Lyon).

1900: Inicios del secado tradicional tal como se conoce hoy en día.

1914: Método de secado eléctrico (Proceso Nodon).

1928: Patente de secado a alta frecuencia (Whitney).

1930: Patente de secado químico (Stamm) y primeros avances con modificaciones térmicas (Stamm and Hansen).

1933: Patente de secado con solventes (Stamm).

1934: Secado solar (Schwalbe and Bartels).

1935: Secado infrarrojo (Rawling).

1937: Secado por oscilación (Grau).

1943: Secado por centrifugación (Kastmark).

1945: Patente de secado al vacío con calentamiento a alta frecuencia (Luth and Krupnick).

1960: Primeros intentos en la aplicación de microondas en el secado de la madera (Resch et al.).

- 1965: Patente de secado al vacío (Pagnozzi).
- 1968: Secado por congelación (Erickson et al.).
- 1971: Proceso Royal (Haeger).
- 1976: Patente de deshumidificación por condensación.
- 1980: Secado por pulsión al vacío (en Rusia).
- 1986: Patente de secado por compresión (Haygreen).
- 1990: Avances en la investigación del secado a alta frecuencia (Avramidis et al.).
- 1991: Sistema ecológico de secado (Ishii); comienzo de tecnologías modernas de modificación térmica.
- 1992: Proceso I/D (Stahl et al.).
- 1999: Avances en la investigación científica sobre el secado en microondas (Antii).
- 2002: Secado con movimiento de aire alternativo rápido en pilas de madera (Campean).
- 2003: Secado en condiciones climáticas oscilantes (Welling et. al.; Alexandru et al.).
- 2004: Se retoma el secado centrifugo para leña (Krämer).
- 2005: Maduración de métodos combinados de secado de madera.
- Actualidad: Mejoramiento de las propiedades de la madera a través del secado y modificaciones térmicas.

El esfuerzo orientado al desarrollo de métodos para el secado de madera ha sido ingente, y continua en la actualidad, en búsqueda de procesos más efectivos que impacten en mínima medida al medio ambiente. En este sentido, a partir de la segunda mitad del siglo XX se han desarrollado diversos diseños de hornos solares, especialmente en áreas con clima cálido (Sur América, Australia, África, Asia del Sur, etc.), donde este método demostró la máxima eficacia.

1.2 Clasificación de los métodos de secado de madera

La clasificación de los métodos de secado puede realizarse de acuerdo a varios criterios, dentro de los cuales, Campean en 2010, propone los siguientes:

1.2.1 Clasificación de acuerdo al tipo de transferencia de calor

De acuerdo al tipo de transferencia de calor que se lleva a cabo entre el medio circundante y la madera, estos pueden ser por:

- Conducción
- Convección
- Radiación

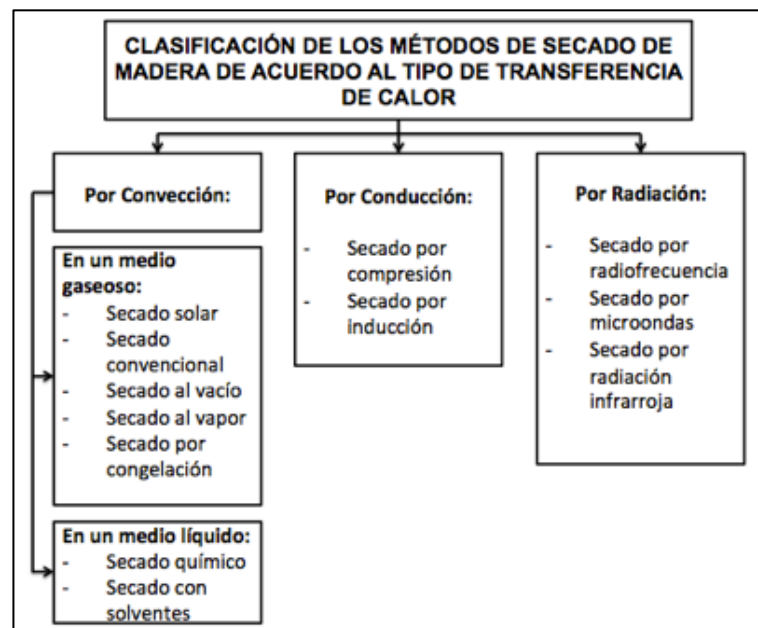


Figura 1. Diagrama de clasificación de acuerdo al tipo de transferencia de calor (Adaptado de: Campean, 2010).

1.2.2 Clasificación según la fuente de calor

Todos los sistemas de secado se pueden clasificar principalmente según su temperatura de funcionamiento, de esta manera puede dividirse entre secadores de alta temperatura y secadores de baja temperatura. Sin embargo, los secadores se clasifican más comúnmente de acuerdo con sus fuentes de calor en secadores de combustibles fósiles (más comúnmente conocidos como secadores convencionales) y secadores de energía solar o simplemente secadores solares. Estrictamente, todos los diseños de secadores de alta temperatura funcionan con combustibles fósiles, mientras que los secadores de baja temperatura son sistemas basados en combustibles fósiles o energía solar (Ekechukwu et al, 1999).

1.2.3 Clasificación de los sistemas de secado por energía solar

Ekechukwu y Norton, en 1999, ilustraron una clasificación sistemática de los sistemas de secado, indicando las subclases y grupos de los sistemas de secado solar. Los sistemas de secado por energía solar se clasifican principalmente según sus modos de calefacción y la forma en que se utiliza el calor solar.

En términos generales, se pueden clasificar en dos grandes grupos, a saber:

1. Sistemas activos (la mayoría de los cuales se denominan a menudo, secadores solares híbridos).
2. Sistemas pasivos (convencionalmente denominado sistemas de secado solar de circulación natural).

Se pueden identificar tres subgrupos distintos de los sistemas de secado solar activo y pasivo (que varían principalmente en la disposición de diseño de los componentes del sistema y el modo de utilización del calor solar, a saber:

1. Secadores solares de tipo integral.
2. Secadores solares de tipo distribuido.
3. Secadores solares de modo mixto.

Se ilustran las principales características de los diseños típicos de las diversas clases de secadores solares en la Figura 2.

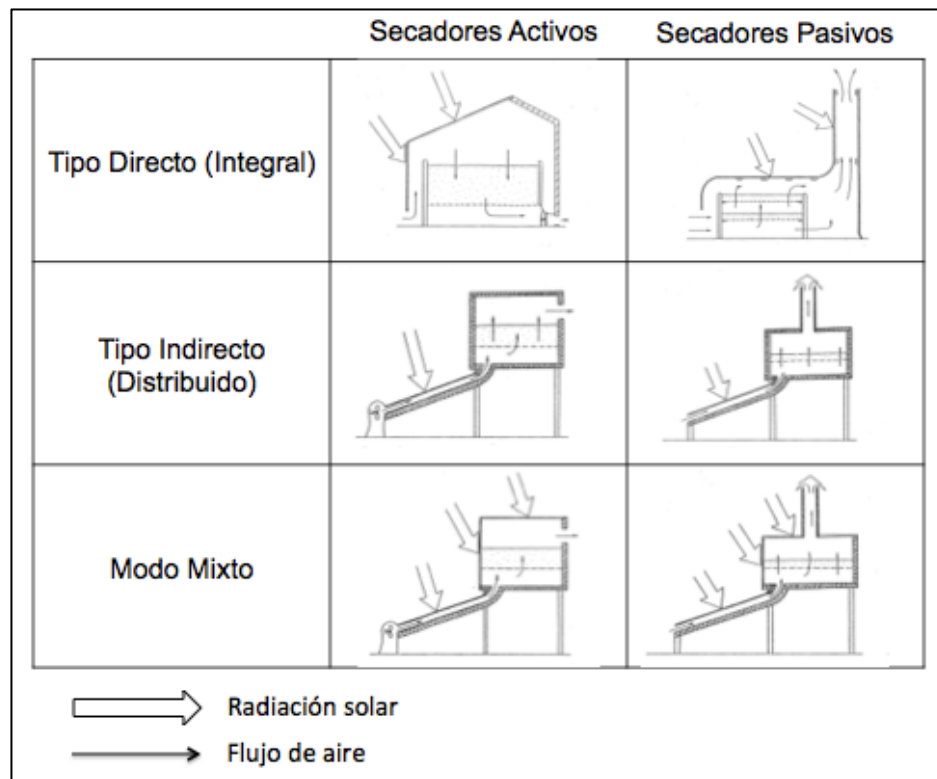


Figura 2. Tipos de secadores solares (Adaptado de: Ekechukwu y Norton, 1999).

1.3 Diseño de un secador solar

La investigación sobre el secado solar de la madera se inició simultáneamente en India (Rehman y Chawala 1961) y EE. UU. (Johnson 1961) en 1961 (Sattar, 1993). Los hornos solares reportados en la literatura son básicamente de dos tipos:

1. El horno tipo invernadero, que consta de un marco cuyas paredes y techo están cubiertos con material translucido con el colector solar dentro de la estructura.
2. El horno tipo colector externo, que consta de una cámara aislada cerrada en una estructura separada que está conectada al horno por conductos aislados.

Hay algunos parámetros que influyen significativamente en el secado solar. Un factor importante en el diseño de un horno solar es la relación entre el área del colector y la capacidad del horno; una relación demasiado baja, puede resultar en un tiempo de secado largo, mientras que una relación demasiado alta deriva en un excesivo costo de construcción que podría compensar el aumento en el rendimiento. No hay pautas específicas en la literatura para ayudar en el diseño de la relación óptima. Diferentes proporciones son necesarias en diferentes climas y ubicaciones. Por esta razón, las relaciones varían desde valores menores de la unidad, hasta $14.4 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (Sattar, 1993).

1.3.1 Disposiciones tradicionales en los hornos solares

Como se mencionó anteriormente, el estudio formal de los hornos solares data desde la década de 1960; el desarrollo en los sistemas de secado ha sido extenso, a la fecha se pueden encontrar hornos que van desde sistemas simples, con poca capacidad de almacenamiento, hasta secadores con sistemas automáticos de gran capacidad. A continuación se presentarán

tres disposiciones o configuraciones típicas utilizadas en los diseños de estos y que han sido clasificados según la disposición de los componentes principales (Luna et al, 2009).

1.3.2 Disposición 1: Horno solar con colector integrado

El horno solar con colector integrado es un sistema en el que todas las unidades forman parte de una misma construcción, donde el colector solar siempre se coloca por encima de la pila de madera a secar, o directamente sobre el techo de la cámara, tal como se muestra en los esquemas de la Figura 3. Esta disposición es la más antigua, pero también la que se ha utilizado con más frecuencia a lo largo de los años, ya que es compacta y fácil de construir. Existen dos subgrupos típicos:

1. Uno en el que el aire se extrae del colector solar y se descarga hacia la pila de madera (buena distribución del aire en el colector solar).
2. Uno en el que el aire se extrae de la pila de madera y se descarga hacia el colector (buena distribución del aire en la pila de madera).

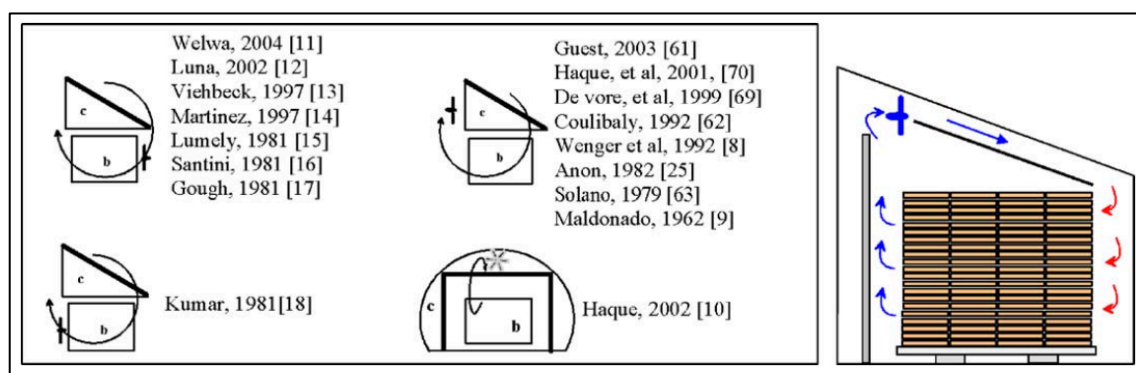


Figura 3. Esquemas sobre hornos solares con colector integrado (Fuente: Luna, Nadeau & Jannot, 2009).

1.3.3 Disposición 2: Horno solar con colector lateral semiintegrado

En el horno solar con colector lateral semiintegrado, las unidades están separadas, unidas solo por los componentes de interacción, los conductos de aire y el ventilador; algunos esquemas pueden apreciarse en la Figura 4. Varios autores han sugerido este arreglo. Por supuesto, en un principio los hornos utilizaban circulación de aire natural, pero posteriormente los cambios han introducido un ventilador para aumentar la eficiencia del secado. El posicionamiento del ventilador y el componente de interacción, difiere en cada modelo. Por ejemplo, algunos autores colocan el ventilador entre la cámara y el colector (parte inferior), otros lo ponen por encima de la pila de madera.

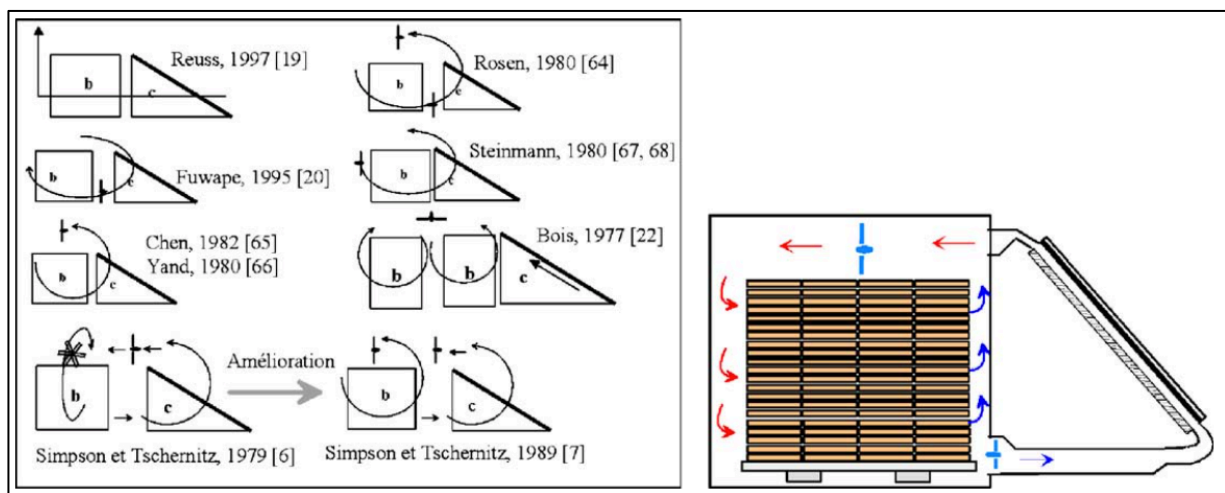


Figura 4. Esquemas de hornos solares con colector lateral semi integrado (Fuente: Luna, Nadeau & Jannot, 2009).

1.3.4 Disposición 3: Horno solar con almacenamiento

Este arreglo representa una modificación de la disposición 2, incorporando almacenamiento de energía, tal como se aprecia en los esquemas de la Figura 5. Encontramos dos variaciones para este tipo de arreglo.

La primer variación tiene una batería de colectores de base líquida. Estos colectores utilizan una tubería como componente de interacción para vincular una unidad de almacenamiento de agua; esta agua calienta el aire por medio de un intercambiador de calor en la unidad de secado.

La otra variante consiste en un horno solar con un lecho de piedras debajo de la pila de madera. El aire fluye desde el colector a través de las piedras y luego pasa a la pila de madera. Obviamente, la energía suministrada a la madera durante el día será determinada por la capacidad de acumulación del lecho de piedras. Esta solución no se ha utilizado mucho debido a la naturaleza algo engorrosa del lecho de piedras.

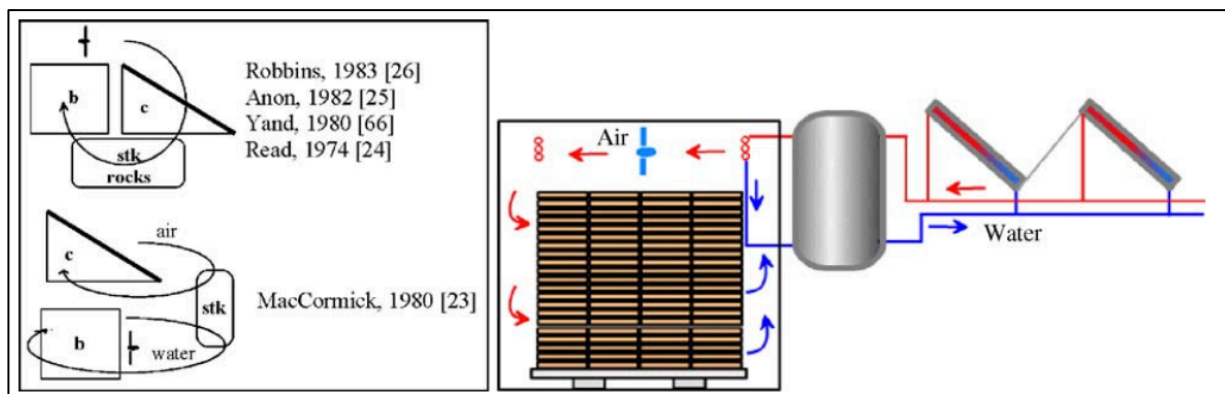


Figura 5. Esquemas de hornos solares con almacenamiento (Fuente: Luna, Nadeau & Jannot, 2009).

1.4 Rendimiento de los hornos solares

En casi toda la literatura, se ha informado que el rendimiento de los hornos solares es muy satisfactorio. Se ha observado que la temperatura dentro de los hornos solares es superior a la del ambiente, registrando temperaturas máximas de entre 50°- 62° C, contra temperaturas ambientales de 25°-30° C. El incremento de temperatura dentro del horno fue sucedido de un decremento en la humedad relativa. Además se encontró que la madera se ha secado de 1.5 a 3 veces más rápido en comparación con el secado al aire libre y lo que es más importante, el secado solar puede reducir el contenido de humedad de la misma a niveles más bajos que los logrados por secado al aire libre. La mayoría de los trabajadores han mencionado que se han obtenido niveles de contenido de humedad de entre 10% y 12%, incluso han secado madera hasta obtener 6% de contenido de humedad en hornos solares (Sattar, 1993).

CAPÍTULO 2: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SECADOR SOLAR

2.1 Criterios de diseño y construcción de un secador solar

Para el diseño y construcción del secador solar, se consideró la fabricación de un secador solar con un colector integrado activo, en el que el aire se extraerá del colector solar mediante extractores, para ser descargado sobre la pila de madera y posteriormente al ambiente, arrastrando consigo cierto contenido de humedad de la misma.

Para su construcción, fueron considerados los siguientes criterios:

1. El secador solar deberá ser capaz de almacenar 1275 pies- tablares (3m^3) de madera para secar.
2. Deberá ser móvil; podrá rotar y trasladarse para dos fines principales:
 - Orientarse de manera idónea en cualquier época del año.
 - Reubicar el secador cuando no sea utilizado.
3. Estará ubicado en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; a una latitud geográfica de 16.7597° latitud norte.
4. Se utilizará *Aislacustic R-19*, de la empresa Owens Corning, como material aislante.
5. Se colocarán dos extractores de aire de 4 pulgadas y 16 watts de potencia para la convección forzada.
6. Se utilizarán láminas Acipol translucidas, de la empresa LETSA, como cubierta del colector solar, por ser la alternativa más económica y resistente.

2.2 Cálculo del ángulo de inclinación

El secador solar, contará con ruedas giratorias en su base, lo que permitirá su rotación y ajuste del ángulo acimutal en cualquier fecha del año. Por otra parte, el ángulo de inclinación del colector solar será fijo, por tal motivo será necesario determinar un ángulo que sea óptimo para captar, bajo esta condición, la mayor irradiancia solar.

Para tal efecto es importante conocer la declinación específica de la tierra para cada día.

Una ecuación aproximada para este caso, es la siguiente (Cooper, 1969):

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen}\left(360 \frac{284 + n}{365}\right)$$

Por otra parte existe una ecuación que relaciona la latitud y declinación para la determinación del ángulo de inclinación (Duffie & Beckman, 2013):

$$\beta = |\phi - \delta|$$

en donde ϕ es la latitud en donde se encuentra el colector solar.

Con estas ecuaciones, se llevó a cabo un cálculo mediante una tabulación en Excel para los valores diarios del ángulo de inclinación. Se obtuvieron como valores máximos y mínimos, -6.6901° y 40.2095°, respectivamente; con estos dos valores se obtuvo un promedio de 16.7597°, que es igual a la latitud de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Por simplicidad en el proceso constructivo se utilizará el número inmediato superior, es decir $\beta = 17^\circ$.

2.3 Diagramas constructivos del secador solar

Dada la necesidad de construir un secador solar que fuese móvil y tan resistente como para soportar cargas considerablemente pesadas de madera, se decidió construir el secador solar con elementos metálicos asequibles y de fácil obtención en la región, a saber:

- Perfil Tubular de 1 pulgada, para la base.
- Perfil tubular de media pulgada para la estructura.
- Lamina de acero, calibre 24.

Se llevó a cabo el diseño estructural mediante el software Solidworks, mediante el cual se generaron diagramas constructivos, algunos de los cuales se presentan en las Figuras 6 a la 11.

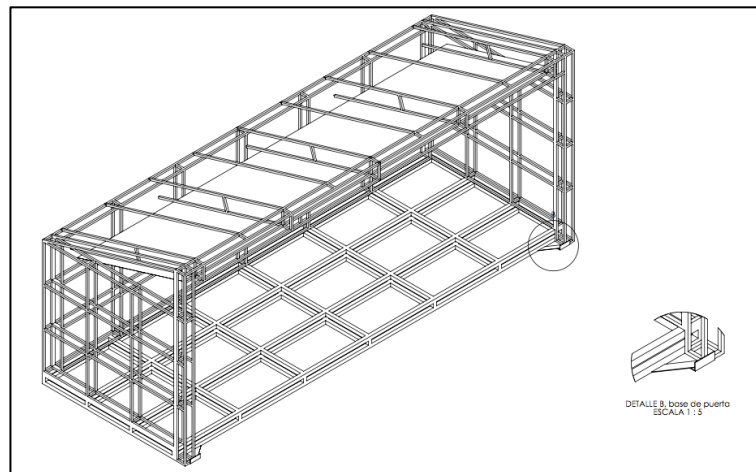


Figura 6. Vista isométrica de la estructura del secador solar (Fuente: Elaboración propia).

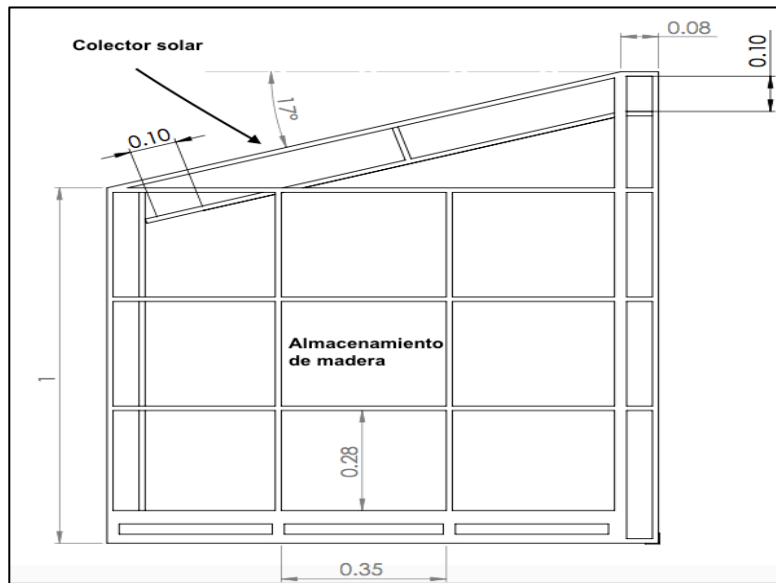


Figura 7. Corte transversal del secador solar (Fuente: Elaboración propia).

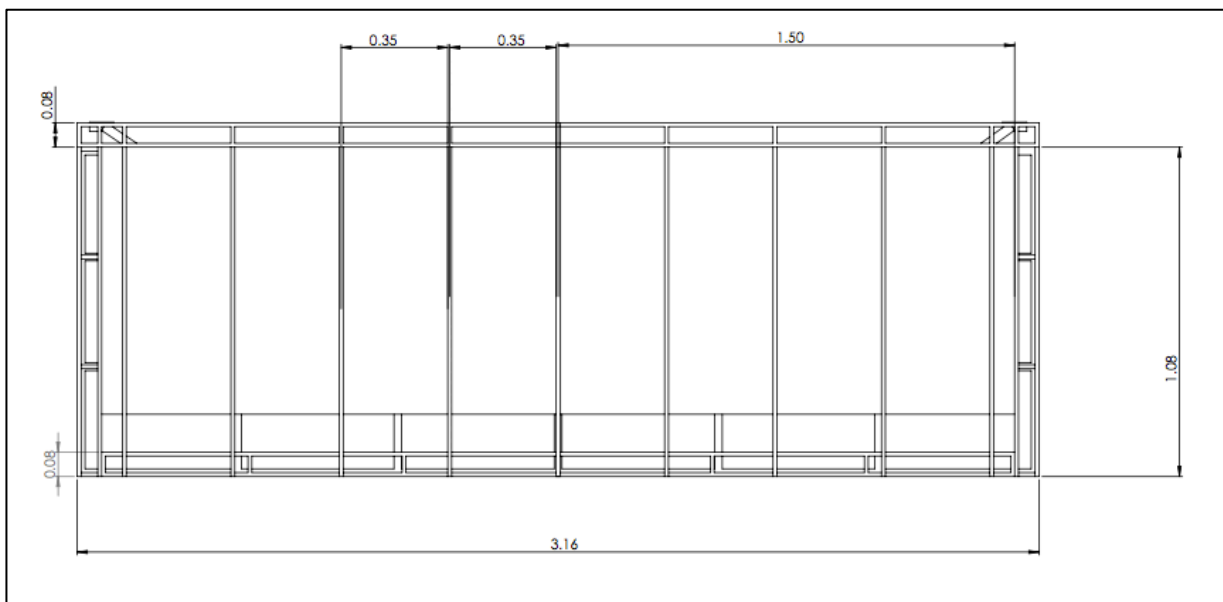


Figura 8. Vista en planta del secador solar (Fuente: Elaboración propia).

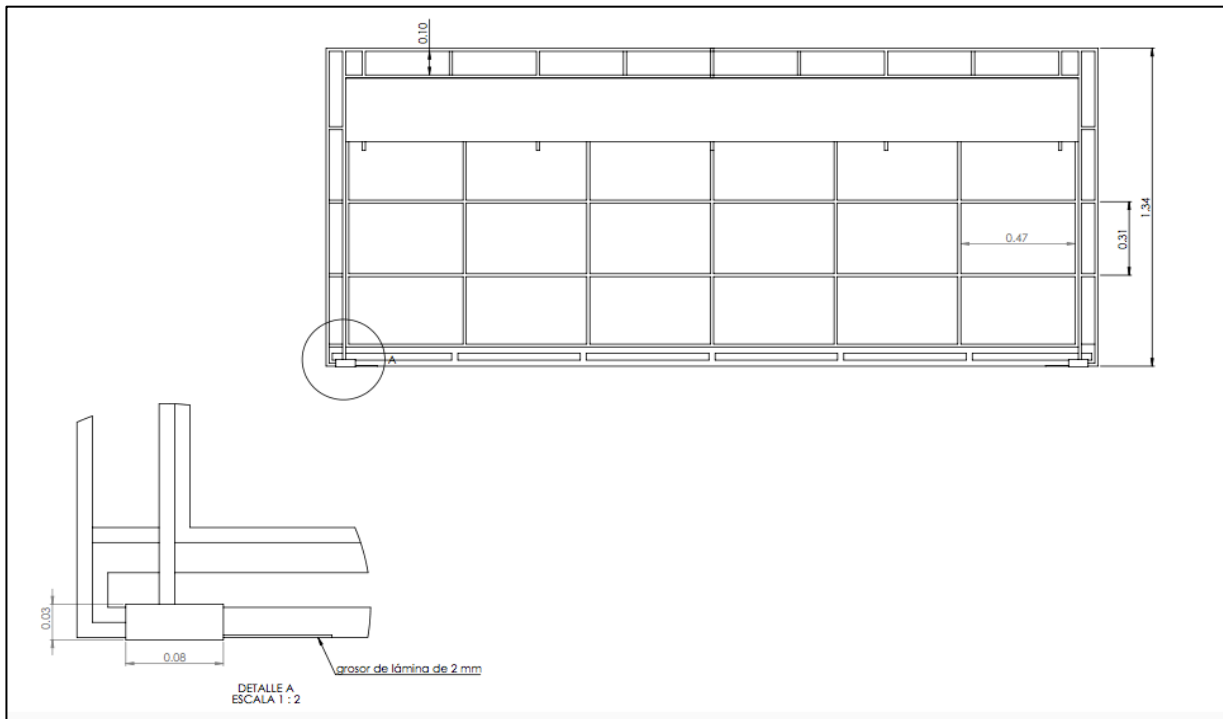


Figura 9. Vista posterior del secador solar (Fuente: Elaboración propia).

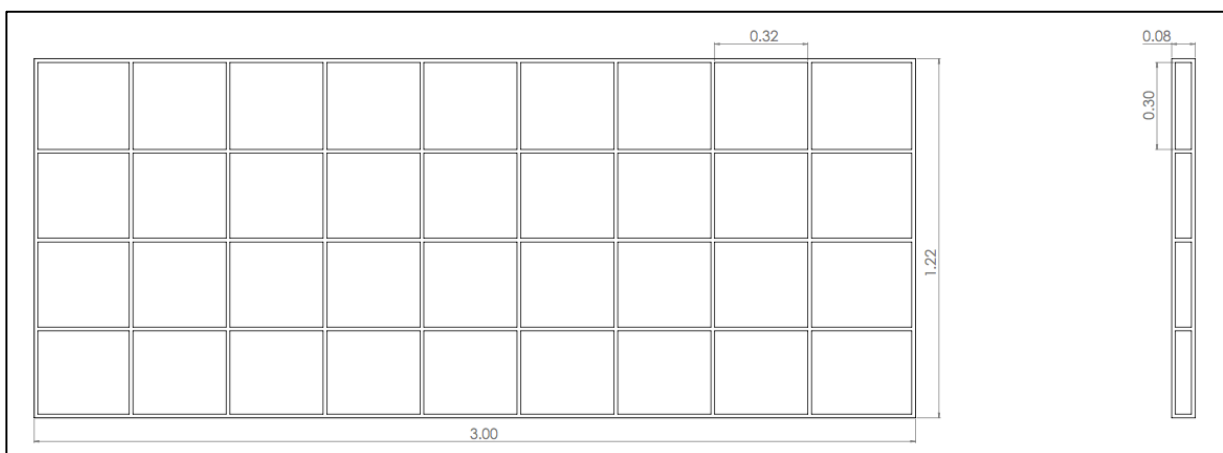


Figura 10. Diagrama constructivo de la puerta posterior (Fuente: Elaboración propia).

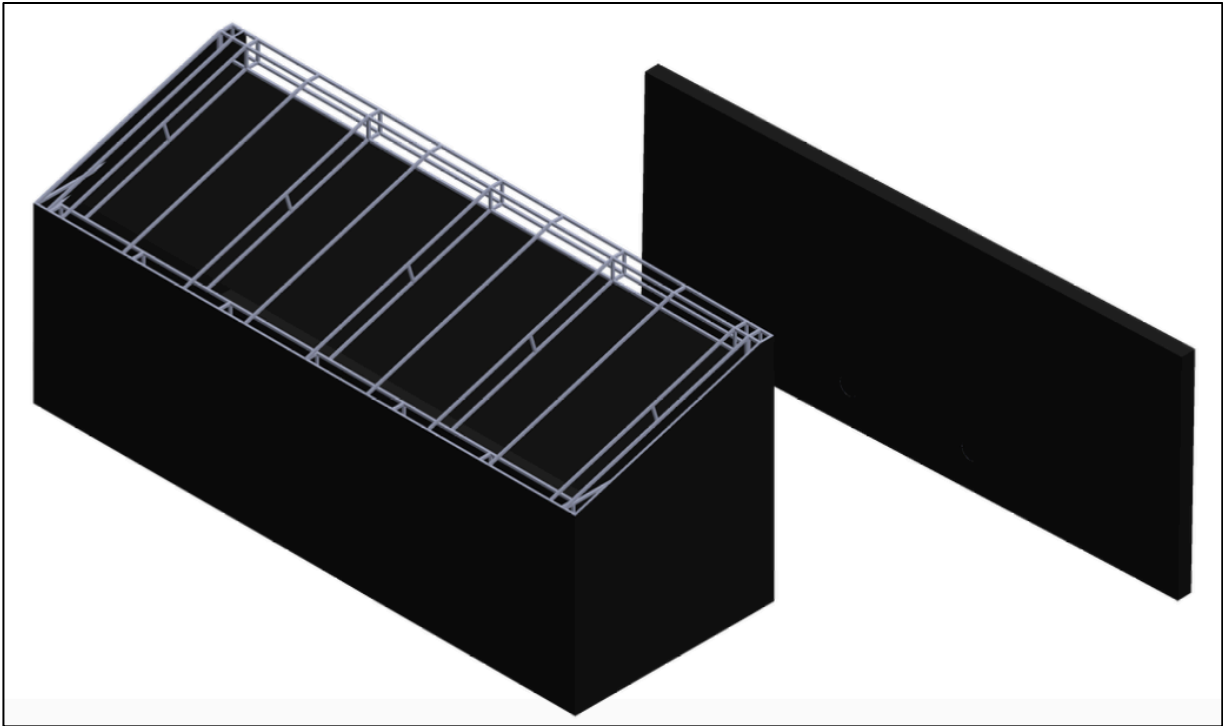


Figura 11. Diagrama explosionado del secador solar, revestido con lámina calibre 24 (Fuente: Elaboración propia).



Figura 12. Fotografía del secador en perspectiva, sin cubierta.



Figura 13. Fotografía posterior del secador.



Figura 14. Fotografía del secador en perspectiva, con cubierta.

CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN DEL SECADOR SOLAR

3.1 Metodología de evaluación del secador solar

Para la evaluación del secador solar, se utilizaron los siguientes instrumentos de medición:

Instrumento	Propiedades	Precisión
Termohidrómetro	Rango de temperatura: -20°C - 60°C Rango de humedad: 0% - 99%	Temperatura: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$. Humedad: $\pm 3\%$
Medidor de humedad	Rango de humedad : 0% - 53% Profundidad de medición: 19 mm	Humedad: $\pm 4\%$

Se llevó a cabo la carga de 500 pies/ tabla de madera de cedro (cedrela odorata) como se muestra en la Figura 15. Se colocaron barrotes de separación de una pulgada cuadrada entre tablas. Posteriormente se posicionaron sensores MEMS, uno al interior y otro al exterior del secador, tal como se muestra en la Figura 16.



Figura 15. Fotografía del secador, con la carga de 500 pies/tabla de madera de cedro.



Figura 16. Fotografía de sensor MEMS, ubicado al centro del interior del secador solar.

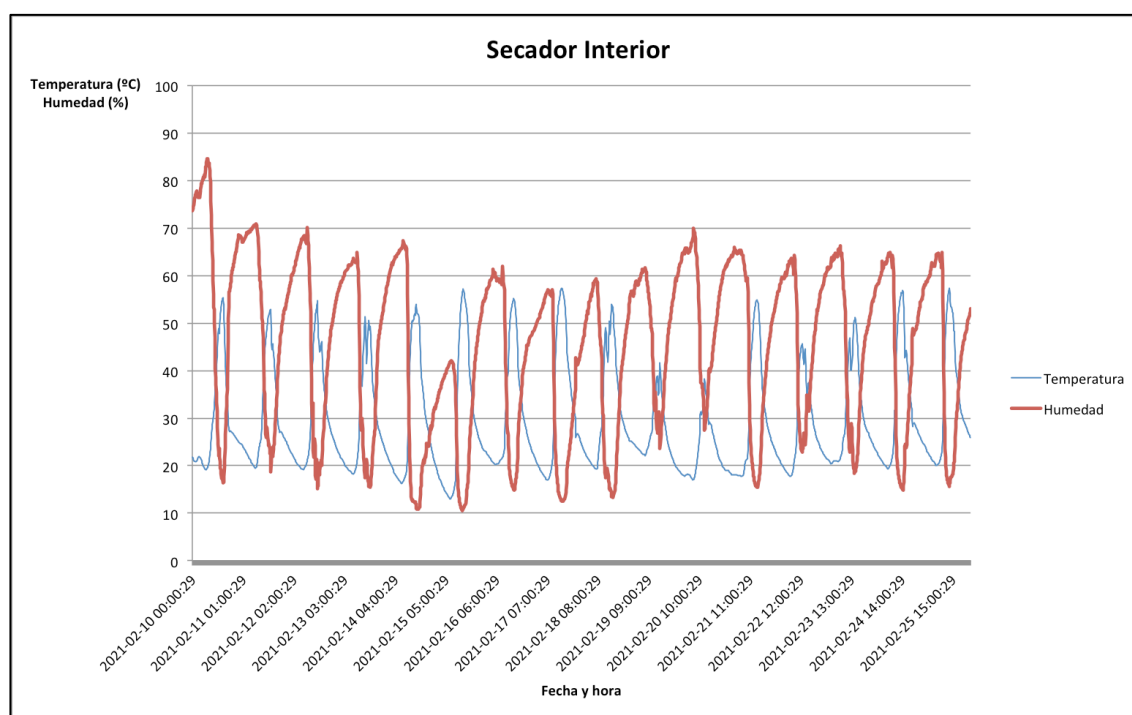
Estos sensores registraron mediciones de temperatura y humedad en lapsos de 10 minutos entre medición y medición, durante los 15 días de evaluación. Además, se realizaron 8 mediciones uniformemente distribuidas en cada una de las tablas de prueba; 4 por delante y cuatro por detrás, como se muestra en la Figura 17.



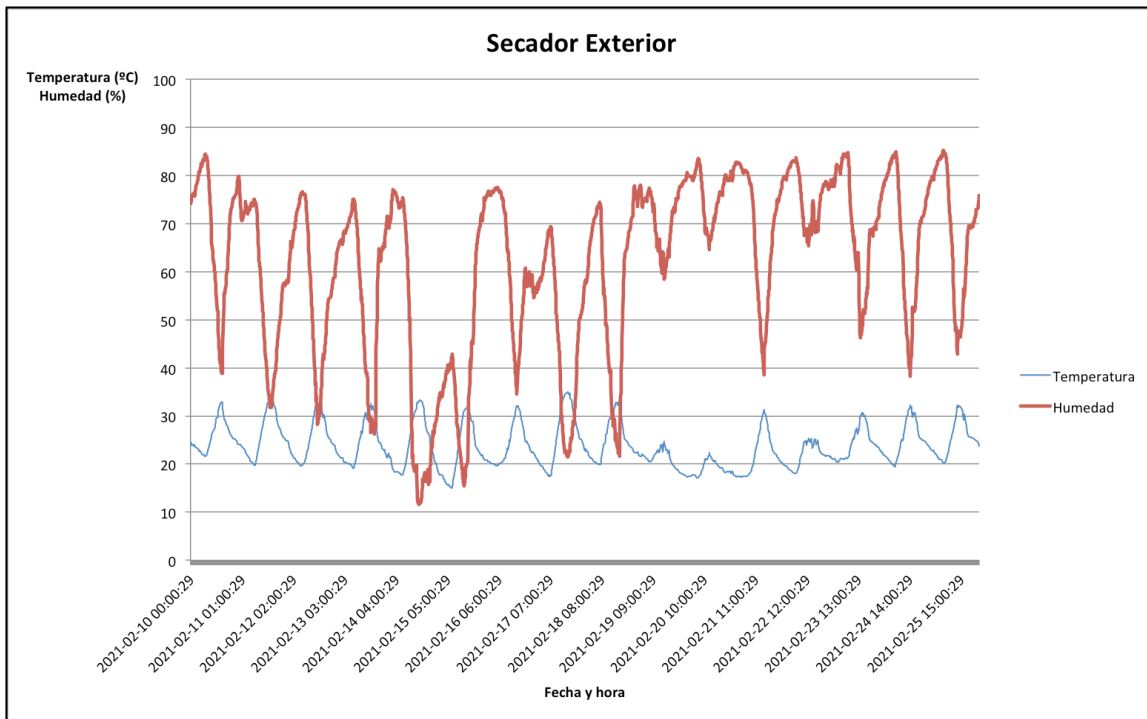
Figura 17. Medición de humedad en las tablas.

3.2 Análisis de resultados

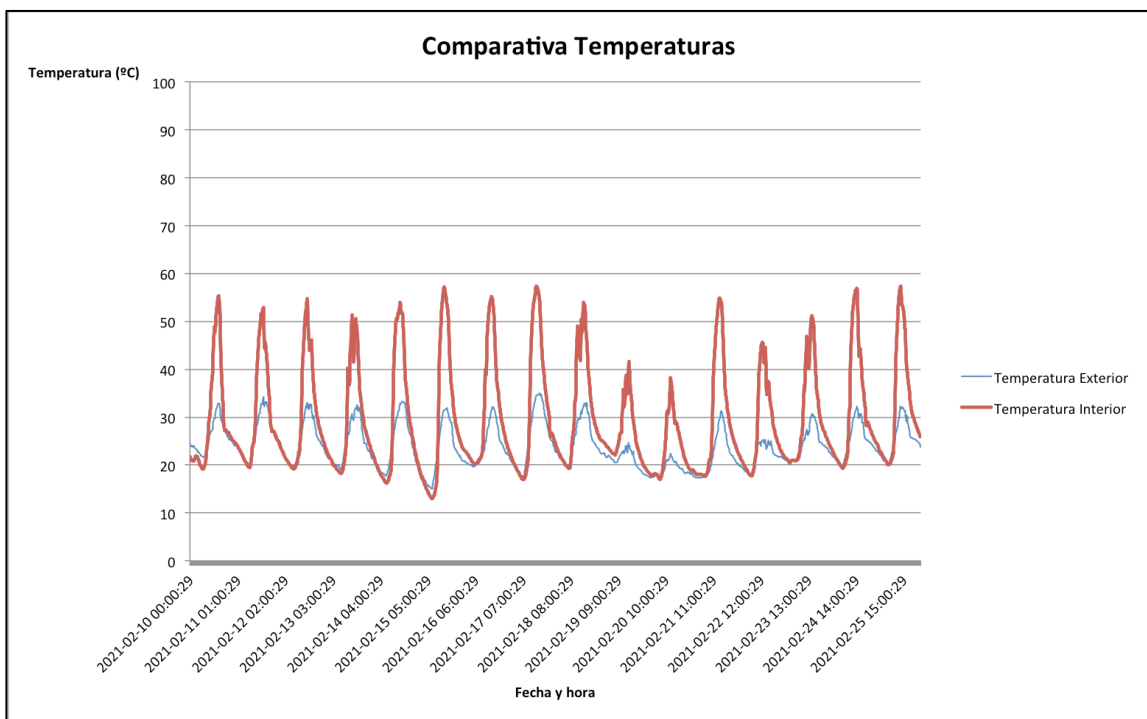
Los 2 sensores MEMS, dedicados a la medición de datos de temperatura y humedad al interior y exterior del secador solar, realizaron 4608 registros que en conjunto suman 9216 mediciones. A continuación, se presentan las Gráficas 1 y 2, en las que se observa el comportamiento de la humedad y temperatura al interior y exterior del secador; posteriormente, el análisis de los datos.



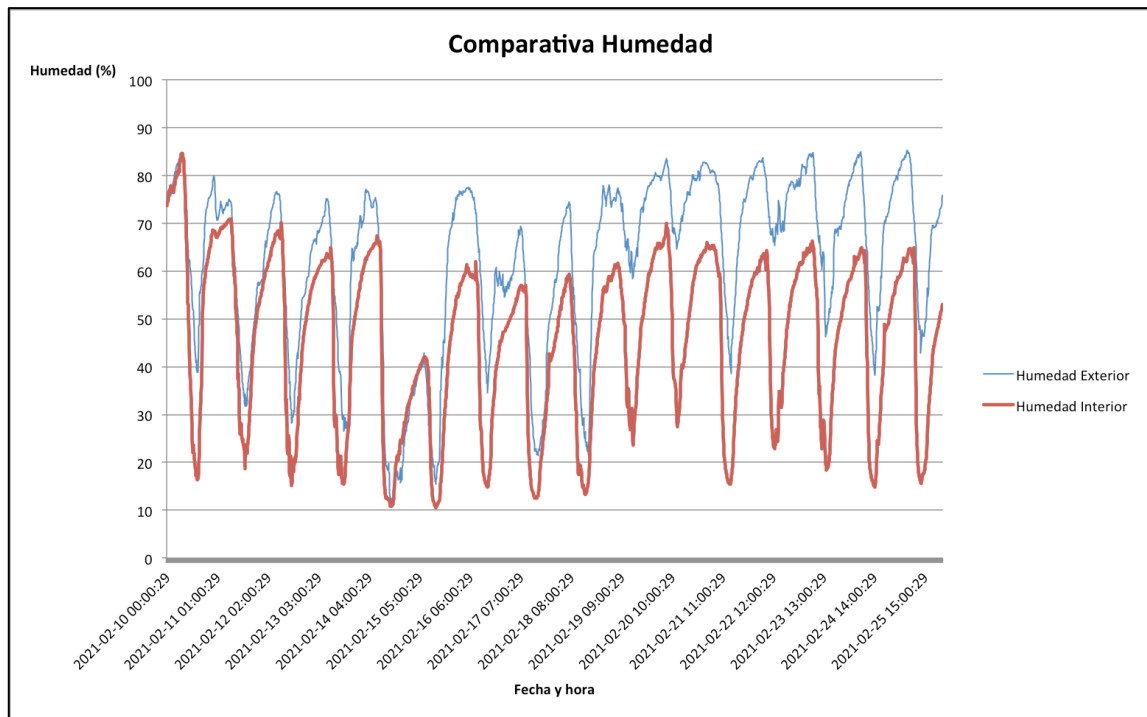
Gráfica 1. Mediciones de humedad y temperatura al interior del secador (Fuente: Elaboración propia).



Gráfica 2. Mediciones de humedad y temperatura al exterior del secador (Fuente: Elaboración propia).



Gráfica 3. Comparativa entre la temperatura interior del secador y la temperatura ambiente (Fuente: Elaboración propia).



Gráfica 4. Comparativa entre la humedad interior del secador y la humedad ambiental (Fuente: Elaboración propia).

Como puede observarse, las temperaturas máximas al interior del secador, oscilaron entre los 50 y 60 grados centígrados, mientras que en el exterior oscilaron entre los 30 y 40 grados centígrados. Es evidente una relación directa entre la temperatura y la humedad del ambiente, tanto en el interior como en el exterior, sin embargo se aprecia un decrecimiento paulatino de la humedad dentro del secador y, aunque esto sería materia de un estudio especial al respecto, podría estudiarse el efecto de la pérdida de humedad del ambiente, con relación a los niveles de humedad en el habitáculo del secador.

Las gráficas 3 y 4, de temperaturas y humedades comparadas, demuestran un comportamiento muy similar semejante a un desfaseamiento. Será de interés encontrar una relación funcional para la respuesta del secador en términos matemáticos.

Por otra parte, en las gráficas 1 y 2 se puede observar cómo los valores de temperaturas entre el interior y exterior, se igualan en sus valores mínimos pero no en su valores máximos, mientras que las gráficas de humedades comparadas parecen tener una relación funcional pero no comparten valores máximos ni mínimos.

Por otra parte, se realizaron mediciones del porcentaje de humedad de los tablones de madera sujetos a experimentación. De los 8 tablones introducidos, se tomaron 4 de ellos como muestra, a los cuales les fueron realizadas 8 mediciones, 4 en la parte frontal y 4 en la parte posterior, de esta manera se obtuvo un promedio del porcentaje de humedad. Las mediciones se realizaron al inicio y al final de los quince días de experimentación, arrojando los resultados que se muestran en las Tablas 1 y 2, respectivamente:

Tabla 1. Medición de humedad de las muestras – 10 de febrero de 2021.

P1	Humedad (%)				
Parte Frontal	25	24	28	13	
Parte Posterior	16	16	21	19	
Promedio general	20.5	20	24.5	16	20.25
P2	Humedad (%)				
Parte Frontal	42	18	28	24	
Parte Posterior	45	16	34	26	
Promedio general	43.5	17	31	25	29.125
P3	Humedad (%)				
Parte Frontal	19	25	36	12	
Parte Posterior	16	25	38	10	
Promedio general	17.5	25	37	11	22.625
P4	Humedad (%)				
Parte Frontal	30	19	20	19	
Parte Posterior	18	19	26	18	
Promedio general	24	19	23	18.5	21.125

Tabla 2. Medición de humedad de las muestras – 25 de febrero de 2021.

P1	Humedad (%)				
Parte Frontal	8	8	9	7	
Parte Posterior	7	7	8	6	
Promedio general	7.5	7.5	8.5	6.5	7.5
P2	Humedad (%)				
Parte Frontal	12	7	9	8	
Parte Posterior	11	6	10	9	
Promedio general	11.5	6.5	9.5	8.5	9
P3	Humedad (%)				
Parte Frontal	14	12	14	10	
Parte Posterior	14	12	13	11	
Promedio general	14	12	13.5	10.5	12.5
P4	Humedad (%)				
Parte Frontal	17	15	16	13	
Parte Posterior	10	12	15	12	
Promedio general	13.5	13.5	15.5	12.5	13.75

Al comparar los valores de humedad al inicio y al final de la experimentación, obtenemos un porcentaje de pérdida de humedad de 12.75 % para la muestra P1, 20.125 % para la muestra P2, 10.125 % para la muestra P3 y 7.35 % para la muestra P4.

CONCLUSIONES

El estudio de los secadores solares para madera es materia de suma amplitud, en los que están involucrados diversos estudios físicos y matemáticos, tales que, por la naturaleza de este trabajo, quedaron fuera de análisis, acotando el mismo a la obtención de datos que demuestran una gran eficiencia del secador solar; toda vez que la literatura sostiene que temperaturas de entre 60 y 70 grados centígrados son consideradas “altas” dentro del universo de los hornos solares, sin omitir que las mediciones fueron realizadas en invierno.

El secador solar aquí tratado, se construyó con materiales a los que cualquier persona puede acceder en el país, además solo se precisa de personal que cuente con conocimientos técnicos en materia de corte y soldadura de chapa y perfiles metálicos, alcanzando un costo aproximado de \$15,000.00 pesos mexicanos.

Mediante las pruebas realizadas, se pudo constatar el buen funcionamiento del secador solar, reduciendo en promedio un 13 % del porcentaje de humedad de la madera, en el periodo comprendido del 10 al 25 de febrero de 2021.

Aunque es importante fortalecer el estudio físico y caracterización de este secador en sucesivas investigaciones, puede asegurarse, a priori, que es factible su implementación para el uso de los pequeños productores y trabajadores de la madera en el país.

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Campean, M. (2010). Timber Drying Methods-Passing Through History Into the Future. *11th International IUFRO Wood Drying Conference* (págs. 3-16). Skelleftea: IUFRO.
- 2.- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (s.f.). *Biodiversidad Mexicana*. Obtenido de <https://www.biodiversidad.gob.mx/pais/quees>
- 3.- Cooper, P. (1969). The absorption of radiation in solar stills. *Solar energy* , 333-346.
- 4.- Luna, D., Nadeau, J.-P., & Jannot, Y. (2009). Solar timber kilns: State of the art and foreseeable developments . *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 1446-1455.
- 5.- Arango Johnson, A. (1990). *Secado de la madera*. Regional Antioquía, Colombia: Servicio Nacional de aprendizaje.
- 6.- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. .
- 7.- Ekechukwu, O., & Norton, B. (1999). Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. *Energy Conversion & Management* , 40 (6), 615-655.
- 8.- Sattar, M. (1993). Solar drying of timber- a review. *Holz als Roh-und Werkstoff* , 409-416.
- 9.- Zamora Martínez, M. C. (2016). Superficie Forestal Actual. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* , 7 (35), 4-5.