

Diseño y construcción de un secador solar para el secado de madera de baja densidad

Design and construction of a solar dryer for drying low-density Wood

Luis Miguel Llamas Tulumba¹, Raúl Yamil Hidalgo Sandoval¹, Hugo Diaz Avalos¹, Hugo Guillermo Diaz Panduro¹

¹ Universidad Nacional de Ucayali (UNU). Carretera Federico Basadre km 6.2, Pucallpa, Ucayali, Perú. Email: iarondiava23@outlook.es. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4280-8185>

Resumen

La presente investigación tuvo como finalidad demostrar que el uso de aceite residual como fluido de transporte de calor y el uso de cascarilla de arroz como aislante térmico es una alternativa eficiente para el aprovechamiento en mayor plenitud de la energía solar. Para ello se diseñó y construyó un prototipo de secador solar conformado por un concentrador térmico solar plano y un concentrador térmico cilíndrico parabólico (CCP), este fue validado mediante el secado de *Guazuma crinita*, Mart. (Bolaína blanca) y monitoreado por un Higrómetro de contacto. Se realizaron cinco pruebas, la primera prueba fue considerada como testigo, en la que no se usó fluido de transporte de calor y aislantes térmicos, y en las cuatro pruebas siguientes se combinó dos tipos de fluidos de transporte de calor (aceite residual de motor y salmuera) y dos tipos de aislantes térmicos (aserrín de madera y cascarilla de arroz), obteniendo como resultado que la prueba más eficiente fue la número tres conformado por aceite residual de motores como fluido de transporte de calor y cascarilla de arroz como aislante térmico. Con la prueba más eficiente se procedió a validar el prototipo mediante el secado de madera de baja densidad, logrando reducir la humedad de la madera de 45.8% a 12.3% en diez días soleados.

Palabras clave: Aislantes térmicos; concentrador térmico plano; fluidos de transporte de calor; radiación solar

Abstract

The purpose of this research was to demonstrate that the use of residual oil as a heat transport fluid and the use of rice husk as a thermal insulator is an efficient alternative for the greater use of solar energy. For this, a prototype of a solar dryer was designed and built consisting of a flat solar thermal concentrator and a parabolic cylindrical thermal concentrator (CCP), this was validated by drying *Guazuma crinita*, Mart. (White ball) and monitored by a contact hygrometer. Five tests were carried out, the first test was considered as a control, in which heat transport fluid and thermal insulators were not used, and in the following four tests two types of heat transport fluids were combined (residual motor oil and brine) and two types of thermal insulators (wood sawdust and rice husk), obtaining as a result that the most efficient test was number three, consisting of residual motor oil as heat transport fluid and rice husk as thermal insulator. With the most efficient test, the prototype was validated by drying low-density wood, reducing the humidity of the wood from 45.8% to 12.3% in ten sunny days.

Keywords: Thermal insulation; flat thermal concentrator; heat transport fluids; solar radiation

Introducción

La creciente demanda de energías no renovables tales como energía eléctrica, combustibles fósiles, leña, carbón, entre otros, usados para el

funcionamiento de secadores industriales, contribuye de una u otra forma a generar mayor impacto hacia el ambiente (calentamiento global) y a la salud de las personas (Echagüe, 1997). A raíz de ello nace la necesidad de

aprovechar fuentes de energía renovable, como la energía solar.

Es por ello que la presente investigación tuvo como objetivo principal el diseñar y construir un prototipo de secador solar, para secar madera de baja densidad, aprovechando la radiación solar y utilizando fluidos de transporte de calor y aislantes térmicos. La importancia del proyecto se refleja en el aprovechamiento de radiación solar, dicha energía es emitida por el sol, que, al llegar a la superficie terrestre, sufre un proceso de debilitamiento por la difusión, reflexión en las nubes, absorción por las moléculas de gases (como el ozono y el vapor de agua) y por las partículas en suspensión (Pardo & Tacury, 2009).

Metodología

Dimensionamiento de la cámara de secado

Las dimensiones de la cámara dependen de la cantidad y de las dimensiones de la madera a secar, así como también condiciones de ocupación del espacio impuestas por el tipo particular del secador de que se trate, como la madera debe manipularse en el interior de la cámara, los medios de acceso a las muestras que deben distribuirse en lugares estratégicos de las pilas, para que sean representativos de la evolución del secado (Bonilla, 2015). La Tabla 1 muestra las especificaciones para la construcción de la cámara de secado.

Tabla 1

Especificaciones y dimensiones de la cámara del prototipo de secador solar

Especificaciones	Dimensión
Espesor de las paredes	0.058 m
Ancho de la cámara	2m
Alto de la cámara	2m
Largo de la cámara	2m
Volumen de la cámara	8 m ³
N° de puertas	1
Cantidad de ventilas	4
Diámetro de las ventilas	0.30m
N° de ventiladores	2
Caudal de aire	2.52m/s
Numero de bombas	1
Tipo de bomba	Eléctrica/periférica
Caudal	0.66 l/s
Longitud lineal del circuito de tubería	35.22 m
Diámetro del tubo	0.0254m
Radio externo del tubo	0.0127m
Radio interno del tubo	0.009525m
Área interna del tubo	0.00029m ²
Volumen del fluido de transporte de calor	12 L
Tanque receptor	5 L

Diseño y dimensiones del concentrador térmico cilíndrico parabólico (CCP)

Tomado como referencia las ecuaciones matemáticas de (Paredes, 2012) se procedió a calcular las dimensiones del concentrador térmico y del tubo receptor. Para calcular el lado recto y foco, se utiliza la fórmula del arco de una curva, por la cual se puede conocer la longitud de esta.

$$F(x) = y = \frac{x^2}{4 \times F}$$

Para el cálculo del foco se utiliza la siguiente fórmula matemática:

$$\rho = \sqrt{W^2 + (F - Y^2)}$$

Mediante los cálculos y el diseño se obtuvo datos de dimensión del concentrador térmico cilíndrico parabólico, mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2

Especificaciones y dimensiones del Concentrador térmico cilíndrico parabólico

Especificaciones	Dimensión
Foco	0.325 m
Lado curvo	1.51 m
Lado recto	1.30 m
Diámetro del tubo receptor	0.0254 m
Longitud del tubo receptor	1.80 m
Material del tubo receptor	Aluminio
Material reflectante	Espejo
Material de estructura de soporte	Metal

Dimensionamiento del concentrador térmico plano

La Tabla 3 nos muestra las dimensiones planteadas para la construcción del concentrador térmico plano.

Cálculo del diámetro del tubo receptor

Para el cálculo del diámetro del tubo receptor se tuvo que calcular el ángulo de apertura α y la distancia ρ mediante las ecuaciones matemáticas planteadas por Paredes (2012), obteniendo un valor α igual a 133° y una distancia ρ igual a 0.212 m empleando la siguiente ecuación se calculó el diámetro

mínimo del tubo receptor obteniéndose como resultado 0.016m

$$\phi_{\min} = \frac{2 \times \rho \times \tan 16^\circ}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

En base al cálculo obtenido sobre el diámetro del tubo receptor se determinó que el diámetro interior es 0.01905 m y el exterior es de 0.0254 m.

Tabla 3

Especificaciones y dimensiones del Concentrador térmico plano

Especificaciones	Dimensión
Alto	0.10 m
Ancho	1.46 m
Largo	2.06m
Material del cajón	Madera
Material de recubierta	Vidrio 2 mm
N° tubos horizontales	2
Diámetro de tubos horizontales	0.508 m
N° de tubos verticales	8
Diámetro de tubos verticales	0.0254 m
Material de tubos	Aluminio
Largo de cubierta de vidrio	2.10 m
Ancho de cubierta de vidrio	1.60 m

Selección del lugar de construcción del prototipo de secador solar

Para la instalación del prototipo se seleccionó un área ubicada en las instalaciones del “Cava” (Proyecto de manufactura de madera perteneciente al IIAP), debido a que se encuentra con una mayor área despejada y es de fácil acceso. El Instituto de Investigaciones de

la Amazonia Peruana-IIAP, se encuentra ubicado en el Km 12.300 de la carretera Federico Basadre, Distrito de Yarinacocha, Provincia de Coronel Portillo, Región Ucayali. Coordenadas UTM 539729.88 E y 9071140.48 N.

Construcción del prototipo de secador solar

Con las dimensiones establecidas primero se armó la estructura del techo, paredes y puerta, luego en el área seleccionada se construyó un piso falso de 3 m de largo por 3 m de ancho y 0.05 m de espesor. Con las paredes y el piso construido se procedió al armado de la cámara de secado mediante la unión de las paredes formando una figura cubica. Con la cámara de secado construida se instaló el concentrador térmico plano ubicándolo en la parte superior, teniendo un ángulo de inclinación de 12°, delante de ello se construyó un armado con cuatro columnas para sostener el concentrador térmico cilíndrico parabólico con una orientación de este a oeste. Se instaló una electrobomba de 0.5 hp de marca ENZO en la parte posterior de la cámara, la misma que posee un caudal de 0.66 litro/ seg, dicho caudal fue ideal debido a que la bomba solo hizo recircular el fluido por las tuberías generando su propio flujo másico. Finalmente se instaló el radiador, ventiladoras, el sistema de tuberías y el sistema de control.

Cálculo de la radiación solar directa sobre una superficie horizontal

Para realizar el cálculo se utilizó una base de datos de irradiación global de la ciudad de Pucallpa, esta fue proporcionada por el software informático PvSyst que permite realizar el diseño, simulación y análisis de datos de una instalación fotovoltaica. Con la irradiación global sobre la superficie terrestre se procedió a calcular la radiación directa, mediante las fórmulas matemáticas planteadas por García, (1983), el ángulo de salida del sol, factor de excentricidad, radiación extraterrestre, índice de claridad, fracción difusa e irradiación difusa.

a. Radiación directa

$$H_{dm} = G_o - D_o$$

Donde:

G_o = Irradiación global horizontal sobre la superficie de la tierra (BD)

D_o = Irradiación difusa horizontal sobre la superficie de la tierra

b. Angulo de salida del sol

$$W_s = -\arcsin(-\tan(\delta) \cdot \tan(\theta))$$

Donde:

W_s = Declinación solar θ = Latitud del lugar

c. Factor de excentricidad

$$E_o = 1 + 0.033 \cos(360dn/365)$$

d. Radiación extraterrestre superficie horizontal

$$H_o = (T/\pi) \times I_o \times E_o [(\pi/180) \times (W_s \times \sin(\theta) \times \sin(\delta) - (\cos(\theta) \times \cos(\delta) \times \sin(W_s)))]$$

Donde:

T = 24 días

I_o = constante solar 1367 w/m²

E_o = factor de excentricidad

W_s = ángulo de salida del sol al amanecer

θ = Latitud del lugar

δ = Declinación solar

e. Índice de claridad

$$K_{tm} = (G_o/H_o) \times 100$$

Donde:

G_o = Radiación directa horizontal sobre la superficie de la tierra

H_o = Radiación extraterrestre sobre la superficie horizontal

f. Fracción difusa

$$F_{dm} = 1 - 1.13 (K_{tm})$$

g. Irradiación difusa horizontal sobre la superficie de la tierra

$$D_o = F_m \cdot G_o$$

Donde:

F_m = Fracción difusa

G_o = Irradiación global sobre la superficie de la tierra

Cálculo del rendimiento del concentrador térmico cilíndrico parabólico

Para calcular en rendimiento se empleó la fórmula matemática que plantea (Paredes, 2012) la cual viene dada como el cociente entre la energía térmica útil suministrada por el

colector y la energía solar incidente sobre el colector:

$$\eta_{Global} = Q_{util}/Q_{sol}$$

Por lo tanto, el rendimiento del concentrador solar cilíndrico dependió de la limpieza del colector, ya que ello ayudo a la reflectividad de los rayos solares. Un valor típico del rendimiento óptico pico es aproximadamente 0.75, para un grado de limpieza del 100%.

a. Energía solar incidente en el colector solar:

La energía solar incidente sobre un colector cilindro parabólico viene dada por:

$$Q_{sol} = S_c \cdot I_o \cdot \cos(\theta)$$

Donde:

Q_{sol} = energía solar incidente sobre el colector (W).

S_c = Área de apertura de la superficie reflexiva del colector (m²)

I_o = Radiación solar directa (W/m²)

θ = Ángulo de incidencia

b. Potencia útil del fluido de transporte de calor.

El fluido seleccionado que se utilizó para recircular en los tubos fue el aceite quemado de motores cuyas propiedades son:

- Densidad = 875 kg/m³
- Viscosidad cinemática = 3.86x10⁻⁶ m²/s⁻¹
- Calor específico = 2070 J/kg^oK
- Conductividad térmica = 0.128 J/s.m.k
- Velocidad del = 2m/s
- Viscosidad dinámica = 1,936 N/m²

Calculo del rendimiento del concentrador térmico plano y la radiación directa sobre un plano inclinado

Se calculó el rendimiento mediante la expresión planteada por (Pardo & Tacury, 2009).

$$N_c = (Q_{ut} / E_{tm} \times A_c) \times 100$$

Donde:

Q_{ut} =Calor útil

E_{tm} = Radiación solar directa sobre una superficie inclinada

A_c =Area del concentrador térmico plano

a. Radiación solar directa sobre una superficie inclinada: Para el cálculo de la radiación solar directa sobre y el factor de corrección de la radiación directa en el concentrador térmico se utilizó las siguientes fórmulas matemáticas (Garcia-Badell, 2003).

$$H_{(\beta, \alpha)} = H_{dm} \cdot K$$

Donde:

H_{dm} =Radiación directa sobre la superficie horizontal.

k =Factor de corrección de la radiación directa

b. Calor útil: Para el cálculo del calor útil se utilizó las formulas planteadas por (Pardo & Tacury, 2009).

$$Q_u = A_c \times Fr [S - UL (T_p - T_a)]$$

Donde:

A_c = Área del concentrador

F_c =Factor de remoción de calor

UL = Perdidas térmicas

T_p =Temperatura ambiente

T_a =Temperatura de la placa Promedio

S =Radiación absorbida

Calculo del volumen de fluido transportador de calor

Para calcular el volumen del fluido se tomó en cuenta las dimensiones del área interior del tubo receptor y su longitud total, incluyendo la longitud lineal del radiador, de esta manera se contó con 12 litros, calculado mediante la siguiente ecuación matemática:

$$V_f = A_{ti} \times L$$

Donde:

V_f =Volumen del fluido transportador de calor.

A_{ti} = Área del tubo receptor

L =Longitud lineal del tubo receptor

El aceite residual se adquirió en los lubricentros y para la salmuera se disolvió por cada 20 litros de agua, 2 kg de sal.

Calculo del volumen del aislante térmico

Para el cálculo del volumen del aislante térmico se tuvo en cuenta la dimensión de las paredes de la cámara de secado. El volumen del aislante térmico a utilizar fue de $2m^3$, calculado mediante la siguiente fórmula matemática:

$$V_{at} = A_p \times E_s \times 5$$

Donde:

V_{at} =Volumen de aislante térmico

A_p =Área de la pared

E_s =Espesor requerido

El aserrín fue adquirido del aserradero Valera E.I.R.L., la cascarilla de arroz fue adquirida de la piladora Campo Verde S.A.C.

Después de la construcción del prototipo se realizó las pruebas correspondientes en diferente tiempo, estas fueron distribuidas de acuerdo a la Tabla 4.

Realización de las pruebas

Tabla 4
Distribución de las pruebas

Aislantes térmicos	Fluidos térmicos	Pruebas
V	V	P1 (Testigo)
AM	ARM	P2 (AM-ARM)
AM	S	P3 (AM-S)
CA	ARM	P4 (CA-ARM)
CA	S	P5 (CA-S)

Dónde: V= Vacío, CA=Cascarilla de arroz, VM=Aserrín de madera, ARM= Aceite residual de motores, S= Salmuera, P= Prueba

Evaluación y selección la prueba eficiente

Se evaluó el comportamiento de cada prueba a través del sistema Arduino, el cual arrojaba datos de temperatura y humedad relativa durante el día y la noche del interior y exterior de la cámara, con el mismo sistema se abría y cerraba las ventilas de manera automática en horas específicos del día para expulsar el aire cargado de humedad. Para la selección de la prueba eficiente se tuvo en cuenta la temperatura máxima que se alcanzada dentro de la cámara durante el día, así como también la temperatura mínima que se alcanzaba durante la noche, siendo un factor importante a tener en cuenta la potencia del fluido transportador de calor y la resistencia al flujo de calor del aislante.

a. Calculo de la potencia de los fluidos de transporte de calor: Se calculó mediante la fórmula planteado por (Paredes, 2012).

$$q = \frac{T - T_{\infty}}{\left(\frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2 \times \pi \times k_f \times \text{aluminio}} \right) + \left(\frac{1}{h \times 2 \times \pi \times l \times r_2 \times 180 / 360} \right)}$$

Donde:

T= Temperatura media en el tubo

T_{∞} = Temperatura ambiente

r_2 = Radio exterior tubo de aluminio

r_1 = Radio interior del tubo de aluminio

l = Longitud del tubo

b. Calculo de la resistencia térmica de los aislantes térmicos: Se calculó la resistencia térmica mediante la siguiente expresión matemática planteado por (Palomo, 2017):

$$R = e / \lambda$$

Donde:

e= el espesor de la capa (m)

λ = conductividad térmica del material, W/(K•m).

Validación de la eficiencia del secador solar en el secado de madera de baja densidad aprovechando la radiación solar

Se eligió la especie *Guazuma crinita*, Mart. (Bolaina blanca) por la accesibilidad, esta fue extraída de una parcela del Instituto de Investigación de la Amazonia Peruana-IIAP. Se hizo una pila con las tablas y se procedió a secar la madera con una humedad inicial promedio de 45.8%, durante los días 21, 22, 25, 27, 28 del mes de octubre y los días 2, 5, 6, 13 y 17 del mes de noviembre, haciendo un total de 11 días. Se monitoreó la temperatura y humedad relativa del aire dentro de la cámara, se insertaba calor dentro de la cámara mediante la recirculación del fluido con la ayuda de una electrobomba, dando inicio a su funcionamiento a las 8 am y culminando a las 5 pm, también en el mismo horario funcionaban las ventiladoras. El sistema Arduino funcionaba todo el día y toda la noche registrando los datos en una memoria micro SD. Para el control del aire cargado de humedad dentro de la cámara se abría las ventilas de manera automática a las 8 am, 1 pm y 4 pm por un tiempo de 30 minutos.

Tratamiento de datos

Se hizo un análisis mediante comparación de medias de temperatura (Anva de un factor), donde se determinó si existe o no existen diferencias significativas o altamente significativas entre pruebas. Así mismo se hizo un análisis de prueba de Tukey para probar todas las diferencias entre las medias de temperatura de las pruebas correspondientes, se analizó a un nivel de confianza del 95%.

Resultados y Discusión

Construcción del prototipo de secador solar con concentradores térmicos para el secado de madera de baja densidad

Mediante las dimensiones y características obtenidos del diseño de la cámara del prototipo de secador solar con concentradores térmicos, se pudo secar un volumen de 0.3m³ de madera, mientras que (Herrera, Ruiz, Santiago, & Sarmiento, 2017) indican que su prototipo de secador solar tuvo una capacidad de 1.7m³, por lo que se puede apreciar una diferencia considerable, aun así ambos volúmenes de madera son aceptables para un estudio a nivel prototipo, ya que el tamaño de la carga depende de la capacidad y tipo de secador a ser empleado (Vizcarra, 1998).

Tabla 5

Rendimiento del concentrador térmico cilíndrico parabólico (CCP) durante los meses de septiembre, octubre y noviembre del 2019

Mes	Angulo de incidencia RS	Perdidas geométricas (W/m ³)	Perdidas Térmicas (W/m ²)	Energía solar incidente (w)	Potencia útil del fluido (w)	Rendimiento del CCP (%)
Sep.	0.95	0.44				
Oct.	0.76	0.38	49.21	976.83	708.07	72.49
Nov.	0.93	0.43				

Rendimiento del concentrador térmico cilíndrico parabólico y plano

Mediante los cálculos y el diseño establecido se obtuvo datos del rendimiento del concentrador térmico cilíndrico parabólico y plano (Tabla 5 y 6).

Tabla 6

Eficiencia del concentrador térmico plano durante los meses de septiembre, octubre y noviembre del 2019

Numero Nusselt	Factor eficiencia de calor	Radiación Absorbido w/ m ²	Eficiencia del concentrador (%)
2.21	0.63	2007.45	51.22

Respecto al resultado obtenido del diseño y la construcción del concentrador térmico plano se obtuvo una eficiencia de 51,22% considerándose muy competitivo y eficiente respecto al concentrador térmico plano construido por Pardo & Tacury (2009), quienes obtuvieron un 40% de rendimiento en su estudio. Del mismo modo sucede con el concentrador térmico cilíndrico parabólico, el cual obtuvo un rendimiento de 72.49%, siendo este resultado similar a lo obtenido por Paredes (2012), quien obtuvo un rendimiento de 70%.

Evaluación y selección del fluido de transporte de calor y aislante térmico

Para la selección del fluido del transporte de calor y aislante térmico que conserve y resista el flujo de calor se realizaron cinco (05) pruebas incluyendo el testigo, obteniendo los siguientes resultados de temperatura:

a. Prueba N° 01 (Testigo): Para evaluar el comportamiento del testigo respecto a la temperatura dentro de la cámara, no se utilizó fluidos de transporte de calor ni aislantes térmicos, obteniéndose el siguiente resultado:

Durante el día 1 la temperatura dentro de la cámara alcanzo una temperatura máxima de 31°C entre las 14 y 15 horas. Durante el día 2 se alcanzó una mayor temperatura con respecto al día 1, llegando a 33°C entre las 15 y 14 horas,

siendo esta la mayor temperatura alcanzada dentro de la cámara durante los días de prueba del testigo. El tercer día solo se obtuvo una temperatura de 32°C durante las 15 horas; con esto podemos decir que durante el día las

temperaturas máximas solo se diferencian de 1 a 2°C. Por otro lado, durante las horas nocturnas la temperatura mínima fue de 25°C alcanzada en los 3 días de pruebas.

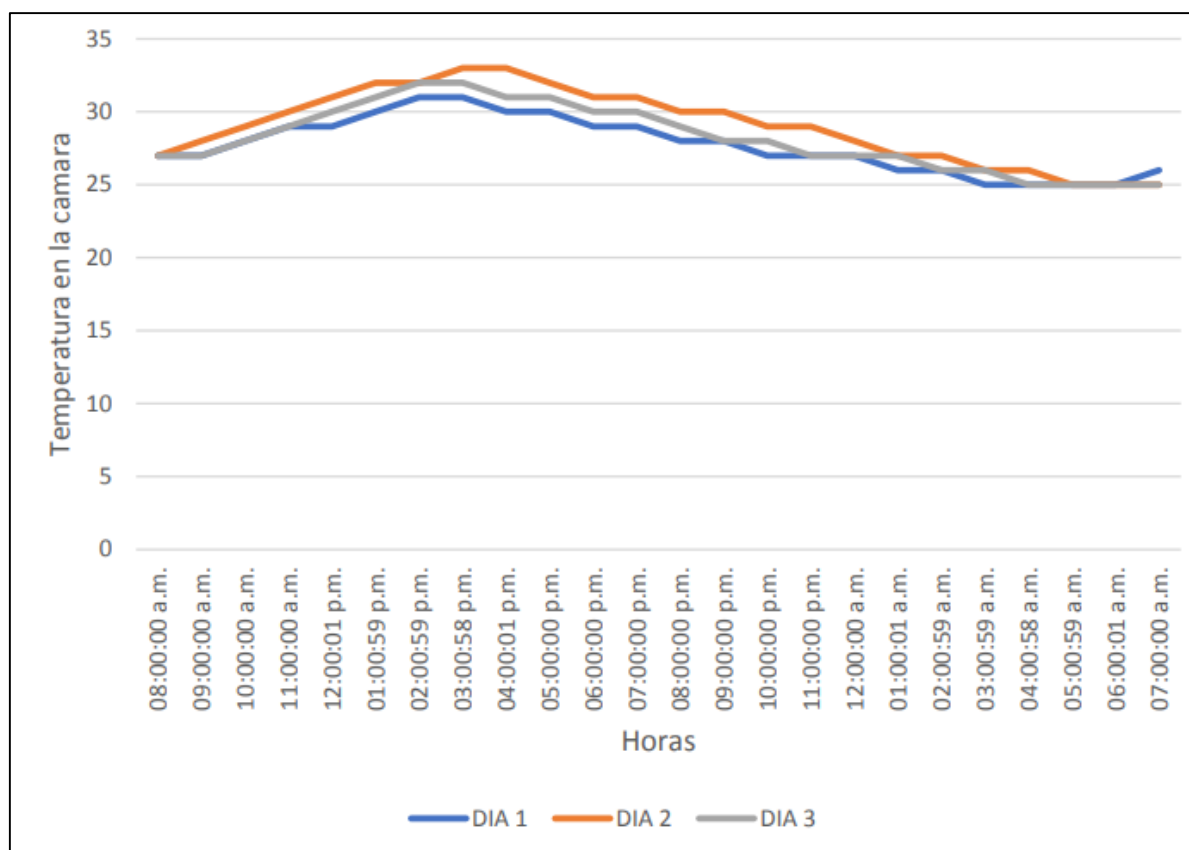


Figura 1: Comportamiento de la temperatura dentro de la cámara de secado

b. Prueba N° 02 (AM-ARM): La prueba N° 02 tuvo como fluido de transporte de calor al aceite residual de motor y como aislante térmico al aserrín de madera (aserrín de Bolaina blanca), obteniendo el siguiente resultado con respecto a la temperatura:

En la Figura 2, se observa el comportamiento de la temperatura dentro de la cámara a lo largo de las 24 horas en cada uno de los 3 días que se

realizó las pruebas; las temperaturas máximas dentro de la cámara se registran entre las 15 y 17 horas diurnas. El primer día de prueba se obtuvo una temperatura máxima de 46°C entre las 16 y 17 horas; mientras que el segundo día de prueba se obtuvo una temperatura de 48°C a las 16 horas; y el tercer día de prueba se obtuvo una temperatura de 48°C a las 16 horas. Por otro lado, durante las horas nocturnas, el primer día se obtuvo la menor temperatura 27°, el

segundo y tercer día de pruebas se obtuvo la temperatura más baja (27°C).

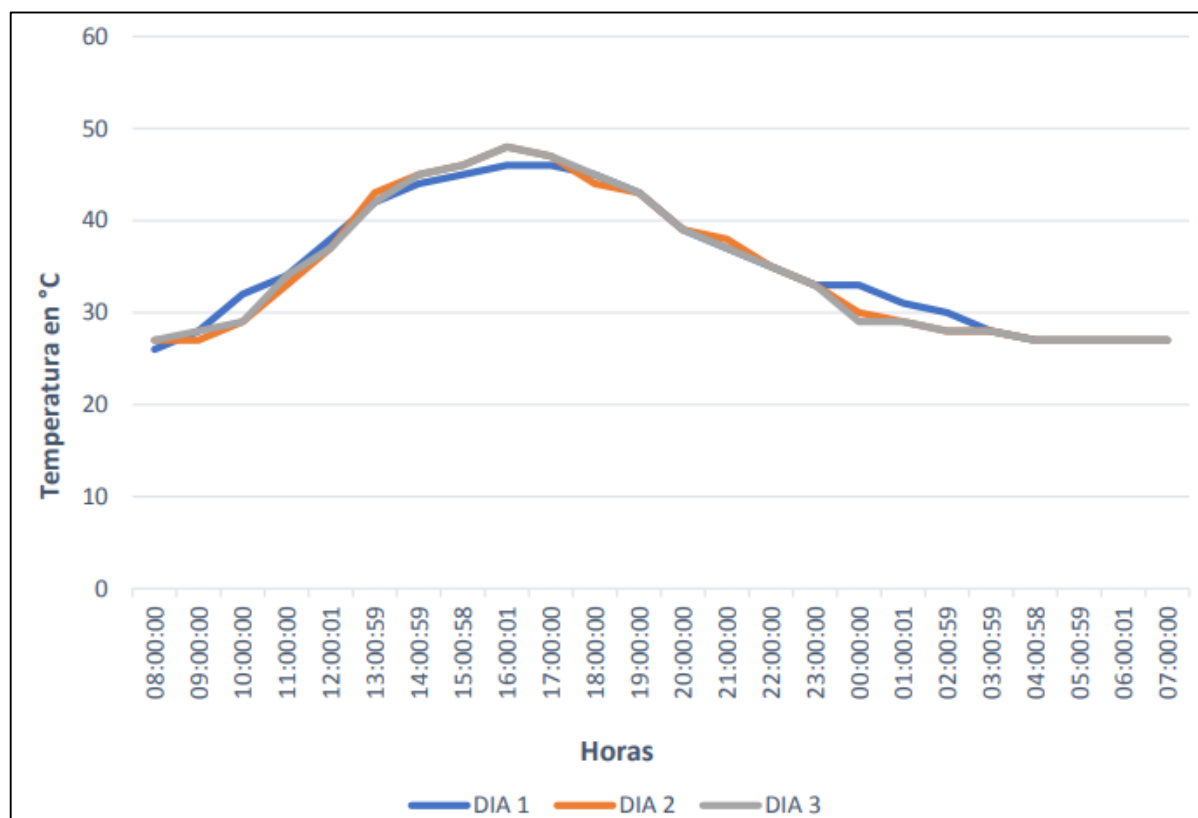


Figura 2: Comportamiento de la temperatura en el interior de la cámara para la prueba N° 2

c. Prueba N°03 (AM-S): La prueba N°03 tuvo como fluido de transporte de calor a la salmuera y como aislante térmico al aserrín de madera (aserrín de bolina blanca), obteniendo el siguiente resultado con respecto a la temperatura:

En la Figura 3, se observa el comportamiento de la temperatura dentro de la cámara a lo largo de las 24 horas en cada uno de los 3 días que se realizó las pruebas; las temperaturas máximas dentro de la cámara se registran entre las 15 y 17 horas diurnas. El primer día de prueba se obtuvo una temperatura máxima de 42°C a las

15 horas; mientras que el segundo día de prueba se obtuvo una temperatura también de 42°C entre las 15 y 17 horas; y el tercer día de prueba se obtuvo una temperatura de 42°C entre las 15 y 16 horas. Por otro lado, durante las horas nocturnas, durante los tres días de prueba se registró una temperatura más baja de 27°C . Al comparar los valores obtenidos en esta prueba, tiene valores menores que los de la prueba N°1 durante el día, y durante la noche alcanza los mismos valores que los de dicha prueba.



Figura 3: Comportamiento de la temperatura en el interior de la cámara para la prueba N° 3

d. Prueba N°04 (CA-ARM): La prueba N°04 tuvo como fluido de transporte de calor al aceite residual de motor y como aislante térmico a la cascarilla de arroz, obteniendo el siguiente resultado con respecto a la temperatura:

En la Figura 4, se observa que en el primer día de prueba se obtuvo una temperatura máxima de 48°C entre las 16 y 17 horas; mientras que el segundo día de prueba se obtuvo una temperatura también de 48°C también entre las 16 y 17 horas, y el tercer día de prueba se obtuvo

una temperatura de 48°C, pero durante las 15 y 17 horas. Por otro lado, durante las horas nocturnas, el primer día se tuvo una temperatura mínima de 29°C, en el día 2 se obtuvo una temperatura de mínima 30°C y finalmente en el día 3 se tuvo una temperatura mínima de 30°C.

e. Prueba N°05 (CA-S): La prueba N°05 tuvo como fluido de transporte de calor a la salmuera y como aislante térmico a la cascarilla de arroz, obteniendo el siguiente resultado con respecto a la temperatura:

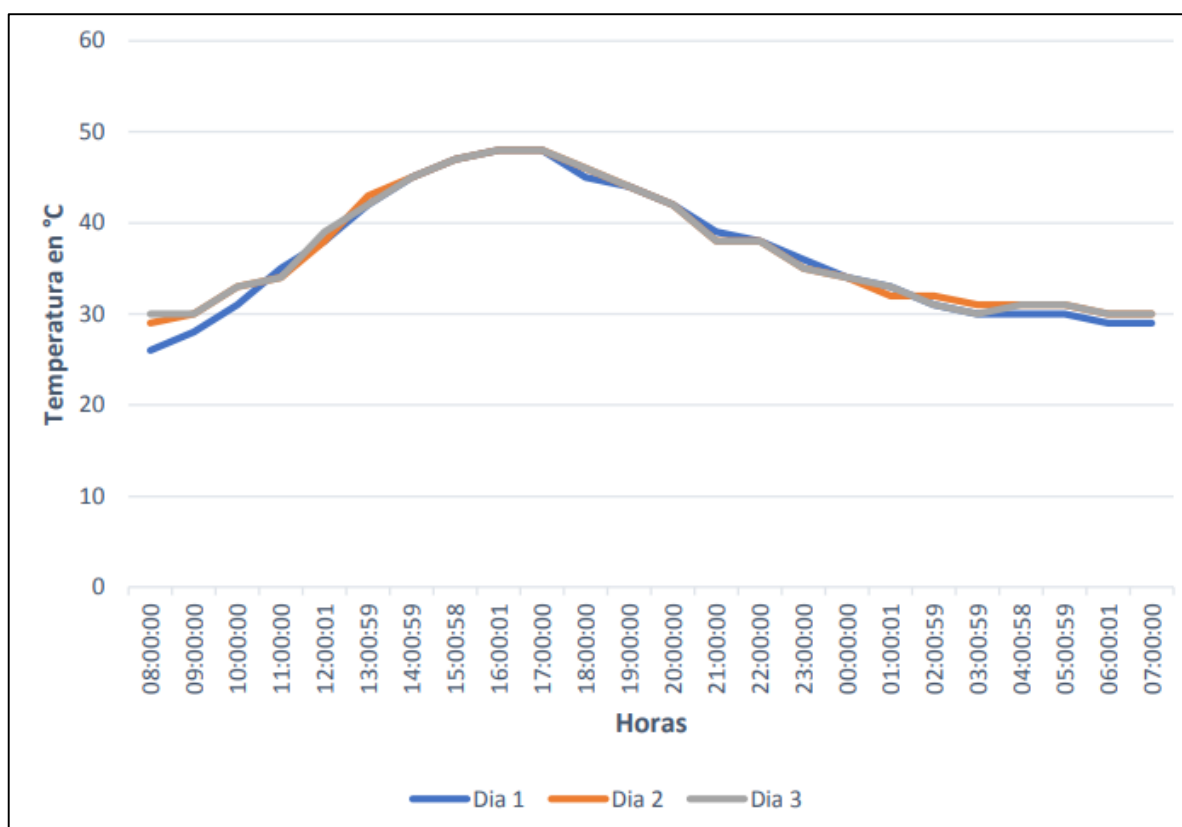


Figura 4: Comportamiento de la temperatura en el interior de la cámara

En la Figura 5, se observa el comportamiento de la temperatura en el primer día de prueba una máxima de 43°C a las 16 horas; mientras que el segundo día de prueba se obtuvo una temperatura menor de 42°C a las 15 horas, y el tercer día de prueba se obtuvo una temperatura de 43°C a las 16 horas. Por otro lado, durante las horas nocturnas, el primer día se tuvo una temperatura mínima de 31°C, en el día 2 se obtuvo una temperatura de mínima de 30°C y finalmente en el día 3 se tuvo una temperatura mínima de 31°C.

Según los valores obtenidos en las cinco pruebas, se determinó que la prueba N°4 que

tuvo aceite residual de motor como fluido de transporte de calor y cascarilla de arroz como aislante térmico, es la que alcanzo mayor temperatura dentro de la cámara de secado, siendo esta de 48°C.

La potencia útil del aceite residual de motor fue 64.37 w, mientras que de la salmuera fue menor, la resistencia al flujo de calor de la cascarilla de arroz fue 1.4 m²°C/W, mientras que del aserrín de madera 0,52 m²°C/W, por lo que es importante mencionar que la eficiencia de cada prueba dependió de la potencia del fluido y resistencia de los aislantes térmicos.

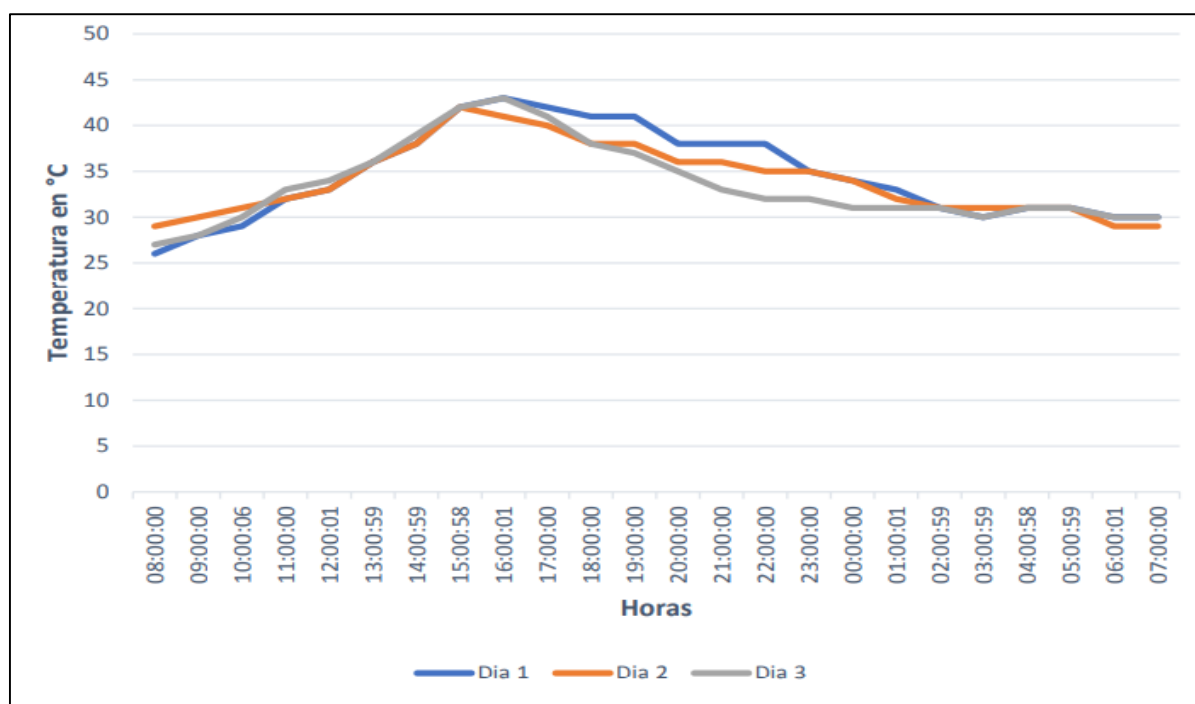


Figura 5: Comportamiento de la temperatura en el interior de la cámara

Determinación estadística de la prueba eficiente

Se hizo el análisis de varianza (ANVA) de un factor, en el que se comparó las medias de

temperatura dentro de la cámara de secado de cada prueba, de esta manera se determinó si existen diferencias significativas o altamente significativas entre sí.

Tabla 7

Prueba ANVA para comparar medias de temperatura para las pruebas de Testigo, ARM/AM, S/MA, ARM/CA y S/CA

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	P valor	Sig.
Entre pruebas	1037.198	4	259.300			
Dentro de las pruebas	3508.135	115	30.506	8.500	0.00	**
Total	4545.333	119				

Nota: ** Altamente significativo

La prueba estadística ANVA (análisis de varianza) muestra que existe diferencias altamente significativas entre las medias de temperaturas de la prueba P1 (testigo) con las

P2 (aceite residual de motor/aserrín de madera), P3 (salmuera/aserrín de madera), P4 (aceite residual de motor/cascarilla de arroz) y P5 (salmuera/cascarilla de arroz).

Tabla 8

Prueba de Tukey HSD para las temperaturas en la prueba Testigo, ARM/AM, S/MA, ARM/CA y S/CA

(I) Pruebas	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	P valor	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
P1 (Testigo)	P2 (ARM/AM)	-6,789	1.5944	0.00	**	-11.208 -2.370
	P3(S/AM)	-3.859	1.5944	0.117	N.S.	-8.278 0.559
	P4(ARM/CA)	-8,608	1.5944	0.00	**	-13.027 -4.189
	P5(S/CA)	-5,831	1.5944	0.003	**	-10.250 -1.412
P2 (ARM/AM)	P3(S/AM)	2.930	1.5944	0.357	N.S.	-1.488 7.349
	P4(ARM/CA)	-1.819	1.5944	0.784	N.S.	-6.238 2.599
	P5(S/CA)	0.958	1.5944	0.975	N.S.	-3.460 5.377
P3(S/AM)	P4(ARM/CA)	-4,749	1.5944	0.029	**	-9.168 -0.330
	P5(S/CA)	-1.972	1.5944	0.73	N.S.	-6.391 2.446
P4 (ARM/CA)	P5(S/CA)	2.777	1.5944	0.413	N.S.	-1.641 7.196

La prueba de Tukey HSD evidencio que existe diferencia altamente significativa entre la prueba P1 (testigo) y las pruebas P2 (aceite residual de motor/aserrín de madera), P4 (aceite residual de motor/cascarilla de arroz) y P5 (salmuera/cascarilla de arroz) y con la prueba P3 (salmuera/aserrín de madera) no se evidencia diferencia significativa. La prueba P3 (salmuera/aserrín de madera) y la prueba P4 (aceite residual de motor/cascarilla de arroz) también muestran diferencias significativas.

Para fines de proyecto de investigación y de acuerdo al análisis de las pruebas correspondientes se utilizó la P4 (aceite residual de motor/cascarilla de arroz) para la validación de prototipo, debido a que alcanzo mayor temperatura respecto a las demás pruebas, siendo esta de 48°C.

De acuerdo a los resultados obtenidos se consideró que el fluido de transporte de calor y aislante térmico utilizado son los adecuados para nuestro proyecto de investigación, por lo existe relación con el estudio planteado por Herrera, Ruiz, Santiago, & Sarmiento (2017), quienes manifiestan haber obtenido una temperatura máxima de 40.6°C dentro de la su cámara de secado con un secador solar de tipo invernadero, por lo tanto, el proyecto de investigación se considera competitivo y eficiente respecto a este estudio. Del mismo modo, se comparó con el estudio realizado por Muñoz (2015) donde se evaluó la respuesta al secado de caoba en el horno solar de la Unidad de Forestales de Zamorano, la cual alcanzó una temperatura máxima de 49°C, por tal motivo existe una relación estricta con el proyecto de investigación, y finalmente el proyecto de

investigación muestra ventaja significativa respecto a la temperatura obtenida, con el estudio realizado por Martínez-Pinillos (1997), quien logro una temperatura promedio de 39.8° C.

Comportamiento de la humedad relativa del aire dentro de la cámara durante el secado de madera

Para validar la eficiencia del secador solar se realizó el secado de madera de baja densidad, en este caso se utilizó la especie *Guazuma crinita*, Mart. (Bolaina blanca). Un factor importante durante la validación fue el manejo de la humedad relativa del aire (HR), por lo se obtuvo los siguientes resultados.

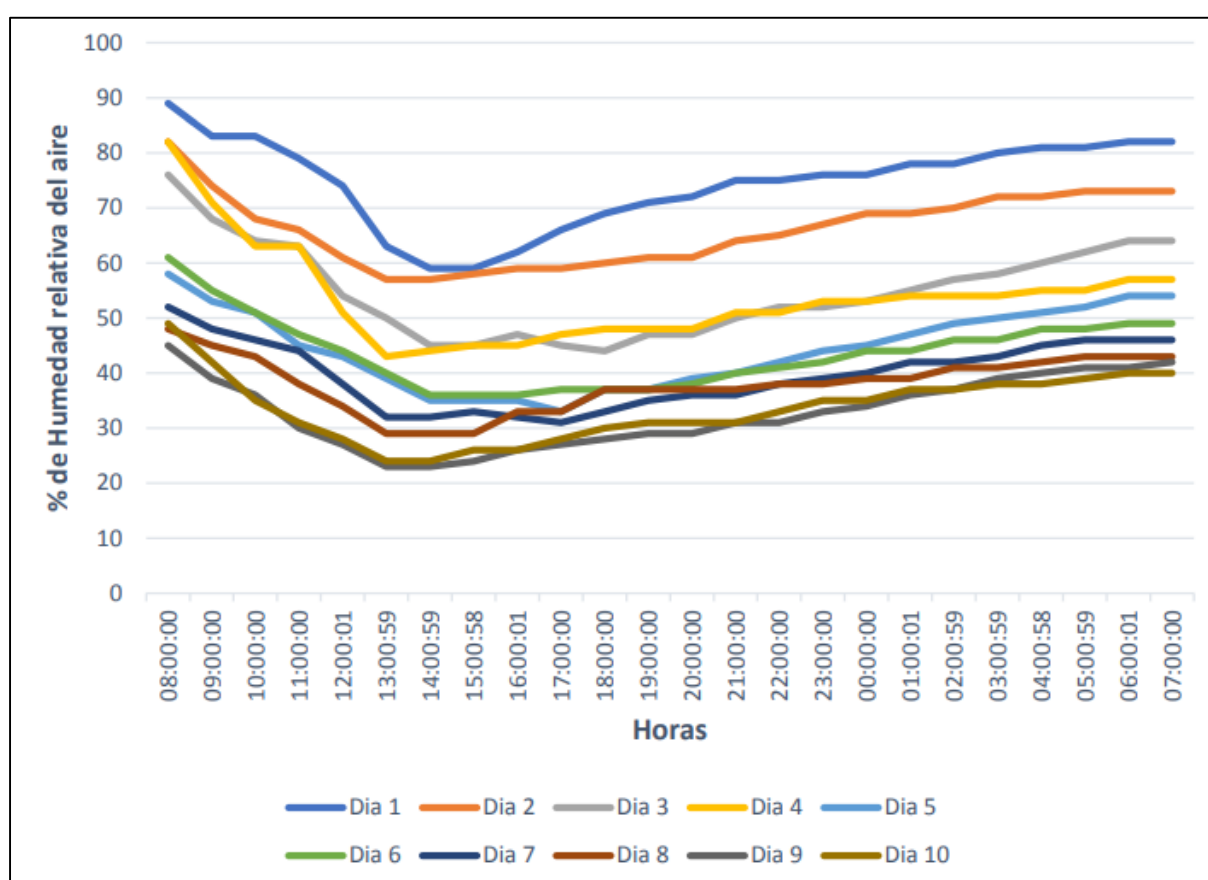


Figura 6: Comportamiento de la humedad relativa del aire dentro de la cámara

En la Figura 6, se observa el comportamiento de la Humedad relativa del aire por cada uno de los 10 días que duro el secado a lo largo de las 24 horas. Se muestra que a las 7 de la mañana de cada día se tiene el mayor contenido de

Humedad relativa y entre las 13 y 16 horas los menores. El día 7,8 y 9 el sistema Arduino arrojo una humedad relativa de 45% a las 8 de la mañana, pero en el día 10 el valor de la humedad relativa ascendió a 49% a la misma

hora, lo cual finaliza con un valor de 40% a las 8 de la mañana del día siguiente. Por lo tanto, se evidencio una considerable disminución de la humedad relativa desde el primer día donde se registró un valor de 89%, hasta el último día de secado, culminando con un valor de 40%.

Reducción del porcentaje de Humedad de la madera

En la Figura 7 se evidencia el control de la disminución del porcentaje de humedad en la madera:

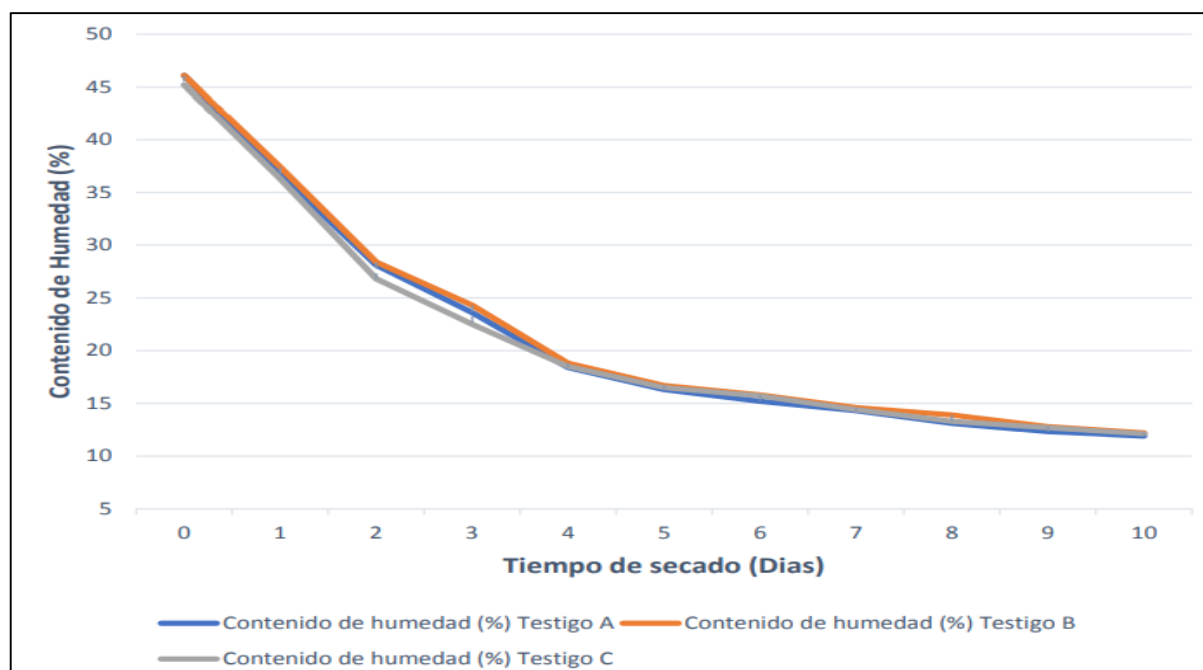


Figura 7: Reducción del contenido de humedad de la *Guazuma crinita*, Mart. (*Bolaina blanca*)

Según la Tabla 9, se muestra que existe una relación altamente significativa entre los días de secado y el contenido de humedad de la madera. El coeficiente de determinación (r^2) indica que el contenido de humedad (CH) de la madera depende un 98.01% de los días de secado.

Las tres probetas seleccionadas A, B y C, tuvieron un porcentaje de humedad al ingresar a la cámara de 46.1, 41.1 y 45.2 respectivamente; el cual según lo que se muestra en la Figura 7 disminuyó de forma similar en las 3 probetas

durante el día 1 y 2, siendo la probeta B la que tuvo mayor reducción en su contenido de humedad. El día 3 la probeta C tuvo una mayor disminución en su porcentaje de humedad reduciéndose a 22.5%, mientras que las probetas A y B redujeron su humedad hasta 23.6 y 24.3% respectivamente. En día 4 la probeta B fue el que obtuvo una mayor reducción en su humedad con un valor de 18.8%, seguido de la probeta A con un contenido de humedad de 18.4% y por último la probeta C con 18.5% de

humedad. El día 5 la reducción del contenido de humedad fue similar en las tres probetas, teniendo un valor en A de 16.3, en B de 16.7 y en C de 16.5. En los días 6, 7 y 8 la reducción de la humedad fue aproximadamente de 1% por día, donde la probeta A alcanzo el porcentaje menor con un 13.1%, seguido de la probeta C

con 13.3% y por último la B con 13.9%. El día 9 se alcanzó un contenido de humedad en la probeta A de 12.3, en B de 12.8 y en C de 12.7. El día 10 la probeta A fue la que más redujo su humedad con 11.9%, seguida de la probeta C con 12.1% y por último la probeta C con un 12.2% de contenido de humedad.

Tabla 9
Regresión lineal y ecuación de la curva de la reducción de humedad

Variables	r	r ²	Ecuación	r _{tab}		Sig.
				0.05	0.01	
Días de secado Vs Humedad de la Madera	- 0.99	0.9801	$y=50.228x^{-0.593}$	0.988	0.9995	**

Conclusiones

Al construir el prototipo de secador solar con concentradores térmicos cilíndrico -parabólico y plano, la cámara de secado tuvo una capacidad volumétrica de 8m³, y el rendimiento de los concentradores térmicos fue de 72.49% y 51.22 % respectivamente.

El aceite residual de motor como fluido de transporte de calor y la cascarilla de arroz como aislante térmico, son los componentes más eficientes, obteniendo una potencia útil del fluido de 64.37 w, y una resistencia al flujo de calor de 1.4 m²x°C/W por parte del aislante, logrando alcanzar una temperatura máxima de 48°C dentro de la cámara de secado, a una temperatura ambiente de 35°C.

Se validó la eficiencia del prototipo de secador solar, mediante el secado de 0.3m³ de volumen de madera de baja densidad *Guazuma crinita*, Mart. (Bolaina blanca), logrando la reducción del contenido de humedad final en un rango de 11.9 a 12.2% en 10 días óptimos.

Referencias bibliográficas

- Bonilla, F. (2015). Horno solar para secado de madera. Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica. Obtenido de <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/6112>
- Echagüe, G. (1997). Cambio Climático, hacia un nuevo modelo energético. 9-12. Colegio Oficial de Fisicos.

- García-Badell, J. (2003). *Cálculo de la energía solar*. Madrid, España: Bellisco.
- Herrera, O., Ruiz, F., Santiago, W., & Sarmiento, D. (2017). Secador solar: una alternativa de bajo costo para secar madera aserrada en la sierra Juárez, Oaxaca. 84-99. ResearchGate.
- Martínez-Pinillos, E. (1997). Diseño y ensayo de un secador solar para madera. 3(2), 13-28. Madera y Bosques. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/617/61730203.pdf>
- Muñoz, R. (2015). Evaluación de la respuesta al secado de madera de caoba (*Swietenia macrophylla* King) en el horno solar de la Unidad de Forestales de Zamorano. 9-11.
- Palomo, M. (2017). Aislantes Térmicos. Cálculo de la resistencia térmica de los aislantes térmicos. Universidad Politécnica de Madrid. Obtenido de http://oa.upm.es/47071/1/TFG_Palomo_Cano_Marta.pdf
- Pardo, C., & Tacury, C. (2009). Diseño, construcción y monitoreo de un sistema de secado de arroz por aire forzado con fuente de energía solar utilizando aceite térmico en la piladora de arroz “don lucho” en el Cantón Macará.
- Paredes, C. (2012). Diseño de captador solar cilíndrico parabólico para aplicaciones rurales en Paraguay. Paraguay: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas.
- Vizcarra, S. (1998). Guía Para el Secado de la Madera en Hornos. Santa Cruz, Bolivia: Proyecto de Manejo Forestal Sostenible (BOLFOR). Obtenido de https://rmportal.net/library/content/Forestry_Silviculture_CBNRM/documentos-bolfor/documentos-tecnicos/guia-para-el-secado-de-la-madera-en-hornos-agosto-1998/at_download/file