

UNIVERSIDAD AMAZÓNICA DE PANDO
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL



Tesis de Grado

**DISEÑO DE UN SECADOR SOLAR TIPO INVERNADERO, COMO
ALTERNATIVA EN EL PROCESO DE SECADO DE MADERA ASERRADA
EN LA AMAZONIA DE PANDO**

POSTULANTE: Univ. DIEGO ARMANDO QUISBERT CABRERA

TUTOR: Ing. Joaquin Esteban Plata Gutierrez

ASESOR: Msc.Ing. Ludwing Arcienega Baptista

Cobija-Pando-Bolivia

2026

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme salud y su infinita gracia me ha dado la dicha de poder superarme con mucha humildad y sabiduría.

A mi familia, en especial a mi hermana Mónica Quisbert Cabrera quien fue el apoyo de perseverancia y que hoy pueda culminar uno de mis objetivos trazados.

El más sincero agradecimiento a la Universidad Amazónica de Pando, por nutrirme de conocimientos durante el tiempo de estudio, a la Asociación de Carpinteros de Pando A.C.A.M.P.E, por la firme decisión de apoyar a la investigación en este campo y finalmente al Ingeniero Oscar Farfán Mealla por su aporte técnico en el desarrollo de la presente tesis.

DIEGO A. QUISBERT CABRERA

DEDICATORIA

Dedico esta investigación a Dios quien es mi espíritu y alma, por permitirme llegar a esta etapa de mi vida, protégeme en el camino y dame la fuerza necesaria para superar las dificultades que se presentaron.

De manera especial, elevo este logro al cielo en memoria de mi Señor padre Branio Quisbert, que con lo suficiente motivo mi formación personal y académica.

Finalmente, a mi hija Leticia, quien llego a mi vida para inspirarme con perseverancia, actitud y amor incondicional.

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo diseñar, construir e implementar un prototipo de secador solar tipo invernadero para el secado de madera aserrada en el departamento de Pando, Bolivia, comparando su desempeño con el método tradicional de secado al aire libre.

La construcción del prototipo demandó 72 horas de trabajo, utilizando materiales de bajo costo y disponibilidad local, e incorporando un colector solar metálico, una cubierta de plástico transparente y un sistema de ventilación.

Las pruebas experimentales de ambos sistemas se realizaron con muestras de cinco piezas de madera especie marfil de dimensiones 1,5" × 6" × 76 cm por cada lote producido, siguiendo los lineamientos de las Normas Bolivianas NB 107001:2010 y NB 107002:2010. El proceso se acompañó de un exhaustivo control de variables como la temperatura, el contenido de humedad, la humedad relativa, y el flujo y renovación del aire.

El secador solar tipo invernadero logró reducir el tiempo de secado en un 63 %, alcanzando un promedio de contenido de humedad 17,4 % en un periodo de 42 días y defectos de 12%, mientras que el método de secado al aire libre requirió 115 días, obteniendo una humedad final fuera de especificación (24,6 %) y una pérdida por defectos de calidad del 26 %.

El costo operativo del secador solar fue de Bs 861,13/m³, superior al del secado al aire libre Bs 266,66/m³. No obstante, al considerar la productividad temporal (42 días frente a 115 días) y el bajo índice de pérdida por defectos, el secador solar triplica la rotación de lotes en el mismo periodo, lo que representa un incremento proyectado del 63,6 % en los ingresos anuales por ventas.

Finalmente, el secador solar tipo invernadero demuestra ser una alternativa técnica viable y sostenible para el secado de madera aserrada en regiones tropicales como Pando, contribuyendo a la eficiencia productiva, la reducción de pérdidas y el aprovechamiento de fuentes de energía limpia y renovable.

. **PALABRAS CLAVE:** Secado de Madera, Contenido de Humedad, Efecto Invernadero.

ABSTRACT

This research aimed to design, construct, and implement a greenhouse-type solar dryer prototype for drying sawn timber in the department of Pando, Bolivia, and to compare its performance with the traditional open-air drying method. The prototype was built in 72 hours using low-cost and locally available materials and incorporated a metallic solar collector, a transparent plastic cover, and a ventilation system.

Experimental tests for both systems were conducted using five pieces of *marfil* wood per batch, each measuring 1.5" × 6" × 76 cm, following the guidelines of Bolivian Standards NB 107001:2010 and NB 107002:2010. The process included comprehensive monitoring of variables such as temperature, moisture content, relative humidity, and air flow and renewal.

The greenhouse-type solar dryer reduced drying time by 63%, achieving an average moisture content of 17.4% within 42 days, while the open-air drying method required 115 days, resulting in a final moisture content outside specification (24.6%) and a 26% loss due to quality defects. The operating cost of the solar dryer was Bs 861.13/m³, higher than open-air drying (Bs 266.66/m³). However, considering time productivity (42 days versus 115 days) and the lower defect loss rate, the solar dryer can triple batch turnover within the same period, representing a projected 63.6% increase in annual sales revenue.

In conclusion, the greenhouse-type solar dryer proves to be a technically viable and sustainable alternative for drying sawn timber in tropical regions such as Pando, contributing to production efficiency, reduction of material losses, and the utilization of clean and renewable energy sources.

Keywords: Wood Drying, Moisture Content, Greenhouse Effect.

INDICE

Capítulo 1.	7
Introducción	7
1.1. Planteamiento del problema	9
1.2. Objeto de estudio	9
1.3. Objetivos General	10
1.3. Objetivos específicos	10
1.4. Hipótesis	10
Capítulo 2.	11
Marco Teórico	11
2.1. Madera Aserrada	11
2.2. Características de la Madera	12
2.2.1 Marfil (<i>Aspidosperma macrocarpon C.Martius</i>)	12
2.2.2. Higroscopia	14
2.3.2. Determinación del Contenido de Humedad de la Madera.	15
2.3.3. Humedad de Equilibrio de la Madera.	17
2.3. Defectos de Calidad	18
2.3.1. Tipos de Defectos de Calidad	19
2.3.2. Defectos Causados por Infección de Hongos e Insectos	23
2.4. Proceso de secado de madera	24
2.4.1. Tipos de secador para madera	25
2.4.2. Secadores por convección	25
2.4.3. Secadores al Vacío	27
2.4. Secado al aire libre	29
2.5. Secador Solar	30
2.5.1. Funcionamiento del Secador Solar	32
2.5.2. Diseño y Construcción de un Secador Solar	34
2.5.3. Parámetros Involucrados en el Secado de Madera	36
2.5.4. Velocidad de Secado	36
2.5.5. Velocidad o Flujo de Aire	37
2.5.6. Temperatura	39

2.5.7. Efecto Invernadero	39
2.5.8. Humedad del Aire	40
2.5.9. Humedad Especifica del Aire	41
2.6. Eficiencia del secador solar	44
Capítulo 3.	46
Metodología.....	46
3.1. Tipo y Enfoque de Investigación.....	46
3.2. Diseño y Alcance de la Investigación.....	46
3.3. Población y Muestra	47
3.4. Materiales y Métodos	48
3.4.1. Material Biológico	48
3.4.1. Material de Campo	48
3.4.1. Equipos.....	49
3.5. Procedimiento Experimental.....	51
3.5.1. Construcción del Prototipo de Secador Solar Tipo Invernadero.....	51
3.5.2. Ubicación Geográfica	51
3.5.3. Características Ecológicas.....	52
3.5.4. Cálculo y Dimensionamiento del Secador Solar	52
3.5.5. Mecánica de fluidos	58
3.5.6. Diseño y Construcción del Secador Solar	68
3.5.7. Socialización del Proyecto	72
3.5.8. Flujograma del Proceso de Producción de Muebles.....	72
3.5.9. Selección y Preparación de la Muestra	76
3.5.10. Estimación de Tiempos de Secado.....	77
3.5.11. Pruebas de Funcionamiento	78
3.5.12. Carga de las Pilas de Madera	81
3.5.13. Curvas de Secado	84
3.5.14. Evaluación de la Calidad Final de la Madera	86
3.6. Técnicas de Medición y Recolección de Datos	87
3.6.1. Medición del Contenido de Humedad	88
3.6.2. Monitoreo de Variables Ambientales	88

3.6.3. Observación Directa Estructurada de la Calidad de Madera	89
3.6.4. Estabilidad Dimensional	90
3.6.5. Calculo de Aprovechamiento	90
3.6.6. Registro Fotográfico	90
3.7. Operacionalizacion de Variables	91
3.8. Métodos y Análisis de Datos	91
Capítulo 4.	96
Resultados	96
4.1. Análisis e Interpretación de Resultados	96
4.1.1. Secado Lote -1	96
4.1.2. Secado Lote -2	98
4.1.3. Secado Lote -3	100
4.1.4. Curvas de Secado Solar vs Aire Libre	102
4.1.5. Calidad Final de la Madera	104
4.1.6. Costos Operativos Secador Solar vs Aire Libre	111
4.1.7. Relación Costo /Beneficio (RCB)	112
4.2. Matriz Comparativa	116
Capítulo 5.	117
Discusión	118
5.1. Conclusiones	121
5.2. Recomendaciones	123
6. BIBLIOGRAFIA	125

INDICE DE FIGURAS

Figura 1	<i>Madera Aserrada y Superficies Para su Cubicación</i>	11
Figura 2	<i>Madera Aserrada</i>	13
Figura 3	<i>Presencia de Agua Libre en la Estructura de la Madera</i>	14
Figura 4	<i>Presencia de Grietas Superficiales (Rajaduras en la Madera)</i>	19
Figura 5	<i>Presencia de Grietas Internas</i>	20
Figura 6	<i>Defecto de Alabeo o Cóncavo en Madera</i>	23
Figura 7	<i>Defecto Manchas de Hongos</i>	24
Figura 8	<i>Secador Convencional Para Madera</i>	26
Figura 9	<i>Secador al Vacío para Madera</i>	28
Figura 10	<i>Secado de Madera al aire Libre o Tradicional</i>	29
Figura 11	<i>Secador Solar para Madera en Funcionamiento</i>	31
Figura 12	<i>Funcionamiento Interno del Secador Solar</i>	33
Figura 13	<i>Posición e Inclinación del Colector Solar con Respecto Sol</i>	35
Figura 14	<i>Funciones Principales de la Velocidad del Aire</i>	38
Figura 15	<i>Psicrómetro para Medición de Humedad Relativa</i>	43
Figura 16	<i>Ubicación del Área de Estudio en el Km 4 Carretera Cobija–Porvenir</i>	52
Figura 17	<i>Área útil e Contacto Para Flujo de Aire</i>	59
Figura 18	<i>Densidad del Aire en Función de la Temperatura y Humedad Relativa</i>	62
Figura 19	<i>Símbolos y Unidades ISO, 5801-96 (E), UNE 100-230-95</i>	64
Figura 20	<i>Símbolos y Unidades ISO, 5801-96 (E), UNE 100-230-95 Uso Para el Cambio de Diámetro</i>	66
Figura 21	<i>Ruta crítica de 46hr en las Actividades A, D, E, G, I, K</i>	70
Figura 22	<i>Flujograma del Proceso de Fabricación de Muebles ACAMPE</i>	73
Figura 23	<i>Acomodo e Identificación de las Muestras Testigo</i>	77
Figura 24	<i>Pruebas de funcionamiento 7dias</i>	79
Figura 25	<i>Pruebas de Funcionamiento 7dias</i>	80
Figura 26	<i>Apilado de Madera Método Horizontal</i>	83
Figura 27	<i>Apilado de Madera Método Tradicional</i>	84
Figura 28	<i>Condiciones Ambientales Dentro el Secador Solar-Lote 1 Horas del Día</i>	96

Figura 29	<i>Curvas de Secado- Lote 1</i>	97
Figura 30	<i>Curvas de Secado Solar vs Aire Libre –Lote 1</i>	97
Figura 31	<i>Condiciones Ambientales Dentro el Secador Solar-Lote2, Horas al Dia</i>	98
Figura 32	<i>Curvas de Secado-Lote 2</i>	99
Figura 33	<i>Curvas de Secado Solar vs Aire Libre- Lote 2</i>	99
Figura 34	<i>Condiciones Ambientales Dentro el Secador Solar-lote 3, Horas al Dia</i>	100
Figura 35	<i>Curvas de Secado-Lote 3</i>	101
Figura 36	<i>Curvas de Secado Solar vs Aire Libre-Lote 3</i>	101
Figura 37	<i>Resumen Curvas de Secado por Lote</i>	102
Figura 38	<i>Cuadro Resumen Secador Solar vs Aire Libre</i>	103
Figura 39	<i>Defectos de Calidad Post Secador Solar</i>	105
Figura 40	<i>Defectos de Calidad - Secador Solar</i>	106
Figura 41	<i>Aprovechamiento Volumétrico - Secador Solar</i>	107
Figura 42	<i>Defectos de Calidad Post Secado Aire Libre</i>	108
Figura 43	<i>Aprovechamiento Volumétrico – Secado Aire Libre</i>	109

INDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Ficha Técnica de la Especie Marfil</i>	13
Tabla 2	<i>Contenido de Humedad de la Madera Destinado a Distintos Usos</i>	16
Tabla 3	<i>Promedios Anuales de Temperatura Media, Humedad Relativa y Contenido de Humedad de Equilibrio de la Madera en Bolivia</i>	17
Tabla 4	<i>Tiempo de Pre calentamiento de la Madera Según su Densidad y Espesor</i>	25
Tabla 5	<i>Equipos Utilizados Para la Recolección de Datos de Secado</i>	49
Tabla 6	<i>Presupuesto de Construcción Secador Solar</i>	69
Tabla 7	<i>Diagrama CPM para la Construcción del Secador Solar</i>	70
Tabla 8	<i>Descripción del Proceso de Fabricación de Productos Acabados</i>	74
Tabla 9	<i>Características de los Listones Separadores</i>	82
Tabla 10	<i>Matriz de Variables</i>	91

Tabla 11 <i>Matriz Estadística de Variables</i>	92
Tabla 12 <i>Prueba estadística Humedad Final y Tiempo de Secado entre Sistemas</i>	103
Tabla 13 <i>Prueba de Correlación de Pearson Humedad Final y Tiempo de Secado</i>	104
Tabla 14 <i>Defectos de Calidad - Secador Solar</i>	106
Tabla 15 <i>Defectos – Secado Aire Libre</i>	109
Tabla 16 <i>Tabla de Contingencia, Defectos de Calidad Según el Sistema de Secado</i>	110
Tabla 17 <i>Prueba estadística (Chi-Cuadrado) Defectos de Calidad Según el Sistema de Secado</i>	111
Tabla 18 <i>Costos operativos por tipo de secado</i>	112
Tabla 19 <i>Flujo de Caja Proyectado Con un Crecimiento de 5% por periodo - Secador Solar</i>	115
Tabla 20 <i>Comparación Técnica Entre el Secado al Aire Libre y el Secador Solar Para Madera Aserrada</i>	116

Capítulo 1.

Introducción

El departamento de Pando posee aproximadamente el 30% de los recursos forestales maderables de Bolivia, con una superficie boscosa estimada en 5.800.000 hectáreas, rica en una gran diversidad de especies (ACEAA, 2017). Esta vasta disponibilidad convierte al sector forestal en una de las actividades económicas más relevantes de la región.

Dentro de la cadena productiva, el proceso de secado de la madera constituye una etapa clave. Según CICPANDO (2011), el 74% de las pequeñas y medianas industrias (PYMES) en el departamento realiza esta fase de manera tradicional al aire libre, lo que representa una seria limitación en términos de eficiencia y calidad del producto final.

El secado al aire libre, ampliamente utilizado por su bajo costo, presenta importantes desventajas, como largos tiempos de secado, exposición directa a la radiación solar, escasa circulación de aire, y una alta incidencia de defectos como agrietamientos, deformaciones y rajaduras. Estos factores derivan en niveles de humedad superiores al 20%, muy por encima de los valores recomendados por la norma boliviana para trabajar productos acabados destinados a distintos usos.

Si bien existen alternativas como los hornos convencionales de secado, su adopción es limitada debido a los altos costos de inversión y operación, la necesidad de mano de obra calificada, la complejidad de los sistemas de control y el uso de fuentes de energía costosas y no sostenibles, como leña o combustibles fósiles (AETN, 2023).

En este contexto, se identifica la necesidad de desarrollar tecnología intermedia que constituyan una solución viable, accesible y sostenible para el sector maderero. En particular, se plantea la implementación de un sistema de secado solar tipo invernadero, que utilice la energía solar como fuente térmica. Este sistema se basa en un colector solar, encargado de elevar la temperatura del aire y facilitar su circulación controlada a través de la madera, lo que permite acelerar el proceso de secado de manera eficiente en tiempos, reduciendo contenido de humedad y mejorando la calidad final del producto.

La eficacia de este tipo de tecnología ha sido comprobada en países como Costa Rica, Uruguay, México, Chile, Ecuador y Estados Unidos, donde los secadores solares han sido utilizados durante más de dos décadas, consolidándose como una alternativa ecológica, de bajo costo y altamente accesible para los pequeños y medianos productores.

En ese contexto, el objetivo de la presente investigación fue implementar un prototipo de secador solar tipo invernadero para el secado de madera aserrada con un espesor de 1,5 pulgadas, adaptado a las condiciones climáticas de la región amazónica del departamento de Pando, Bolivia. El estudio se desarrolló durante el período de mayor demanda del producto, comprendido entre los meses de julio y noviembre.

El material bibliográfico considerado para este estudio abarca temas específicos como el manual de construcción y operación, viabilidad económica, diseño y operación, validaciones y factibilidad, entre otros. Las fuentes consultadas incluyen a Fuentes (1994), Muñoz (2008), Segovia (2012), Muñoz, Fuentes, Luna, Osorio y Corona (2003), Bond, Espinoza y Araman (2011), Estrella y Cruz (2003), y Viehbeck (1999), López P., V., (1985), Álvarez y Fernández (1990). los cuales proporcionaron una base teórica fundamental para el presente estudio.

1.1. Planteamiento del problema

El método tradicional de secado de la madera al aire libre, si bien presenta un bajo costo de implementación, evidencia limitaciones significativas en la eficiencia del proceso y el control de calidad. Este sistema genera resultados fuera de especificación, caracterizados por tiempos de secado prolongados y contenidos de humedad finales superiores a la de equilibrio 18 %, esta situación que provoca inestabilidad dimensional en la madera y favorece la aparición de defectos como agrietamientos, deformaciones y rajaduras.

Como consecuencia, la madera obtenida mediante este método no cumple con los estándares establecidos por la normativa boliviana para la fabricación de productos terminados, entre ellos marcos, puertas, ventanas, mesas y muebles, lo cual restringe la competitividad y el valor agregado de la producción del sector maderero, en particular de las asociaciones y pequeñas industrias como ACAMPE.

1.2. Objeto de estudio

El objeto de estudio de la investigación es el análisis del desempeño del secado de madera aserrada utilizando un prototipo de secador solar tipo invernadero, considerando las condiciones climáticas particulares de la región tropical amazónica del departamento de Pando. Este estudio se centra en evaluar aspectos como la eficiencia en la reducción del contenido de humedad, la estabilidad dimensional de la madera y la reducción de defectos, en comparación con el método tradicional de secado al aire libre, con el fin de determinar la viabilidad técnica económica y la aplicabilidad de esta tecnología para pequeñas y medianas industrias maderera local.

1.3. Objetivos General

Implementar un prototipo de secador solar tipo invernadero para el secado de madera aserrada marfil de 1,5 pulgadas de espesor, aplicado al período de mayor demanda (julio a noviembre) en la Asociación de Carpinteros y pequeños empresarios (ACAMPE).

1.3. Objetivos específicos

- ✓ Diseñar y construir un prototipo de secador solar tipo invernadero con una capacidad de producción de 3 m³ de madera aserrada.
- ✓ Elaborar curvas de secado para determinar el contenido de humedad, estabilidad dimensional y calidad final de la madera en ambos sistemas, secador solar y secado aire libre.
- ✓ Analizar el costo de operación y la relación costo beneficio del secador solar tipo invernadero, en relación con el sistema de secado al aire libre.

1.4. Hipótesis

El sistema de secado solar tipo invernadero reduce el contenido de humedad de la madera por debajo de la humedad de equilibrio 18% y mejora la calidad final del producto, especialmente en términos de estabilidad dimensional, en comparación con el secado al aire libre.

Capítulo 2.

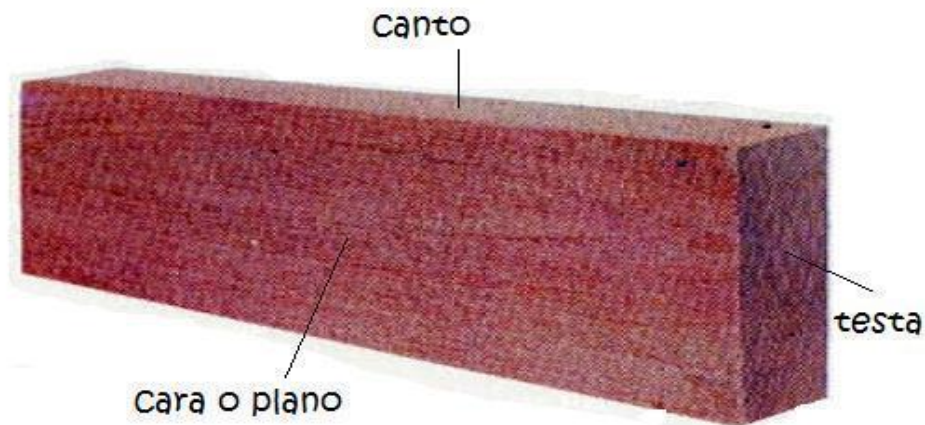
Marco Teórico

2.1. Madera Aserrada

La madera aserrada es el más simple de los productos de madera elaborada, el más fácil de producir y el que se utiliza desde hace más tiempo. Continúa siendo la forma más común de elaboración de la madera, Son Piezas maciza generalmente es cuadrada, es decir, con caras paralelas entre sí y cantos perpendiculares a las mismas, obtenidas por aserrado de madera en rollo o trozas de madera. Las dimensiones se obtienen por diversos cortes y despieces que buscan el mejor aprovechamiento del tronco.

Figura 1

Madera Aserrada y Superficies Para su Cubicación



Nota. Reproducido por Google,2021(<https://es.scribd.com/document/319877895/CUBICACION>)

Partes

- ✓ Testa: superficie de la pieza que es perpendicular a su eje mayor.
- ✓ Cara: superficie de la pieza que tiene las mayores dimensiones.
- ✓ Canto: superficie de la pieza perpendicular a la cara y a la testa viveza

El principal componente químico de la madera es el agua. Sin embargo, el peso seco de sus paredes celulares está compuesto principalmente por polímeros a base de carbohidratos, como la lignina, la celulosa y la hemicelulosa. La madera está formada por cuatro constituyentes principales: las fibras de celulosa, que representan entre un 40 % y un 50 % de su composición; la hemicelulosa, que constituye aproximadamente entre un 25 % y un 35 %; y la lignina, que oscila entre un 20 % y un 30 %.

Por otro lado, los extractivos corresponden a impurezas orgánicas, como aceites que aportan color, o minerales como la sílice, la cual contribuye al desgaste de las hojas de sierra durante el proceso de corte. Estos extractivos pueden representar hasta un 10 % del peso total de la madera.

Además, la composición química de la madera seca está conformada aproximadamente por un 50 % de carbono, un 6 % de hidrógeno y un 44 % de oxígeno, además de trazas de otros compuestos inorgánicos (Rowell, 2005).

Según Baronasá et al. (2001), la estructura de la madera puede clasificarse en dos tipos principales: madera blanda y madera dura. Sin embargo, esta diferenciación no necesariamente está relacionada con la dureza física del material, sino con sus características anatómicas y botánicas. En el presente estudio, se trabajará con madera blanda, dado que representa la mayor demanda en nuestro contexto local.

2.2. Características de la Madera

2.2.1 *Marfil (Aspidosperma macrocarpon C.Martius)*

Figura 2*Madera Aserrada*

Nota. Reproducido por Google,2021 <https://es.dreamstime.com/foto-de-archivos-grietas-superficiales-de-la-madera>.

Tabla 1*Ficha Técnica de la Especie Marfil***DESCRIPCIÓN DE LA ESPECIE**

Nombre Científico	<i>Aspidosperma macrocarpon</i> C. Martius
Familia	APOCYNACEAE
Nombre comercial	Marfil, Jichituriqui, Leche caspi

PROPIEDADES FÍSICAS

Contenido humedad en verde	41%
Contenido humedad en seco	15.43%
Densidad Básica	0.64 g/cm ³
Densidad al 12% de humedad	0.70 g/cm ³
Densidad Verde	0.74 g/cm ³
Densidad Anhidrida	0.69 g/cm ³

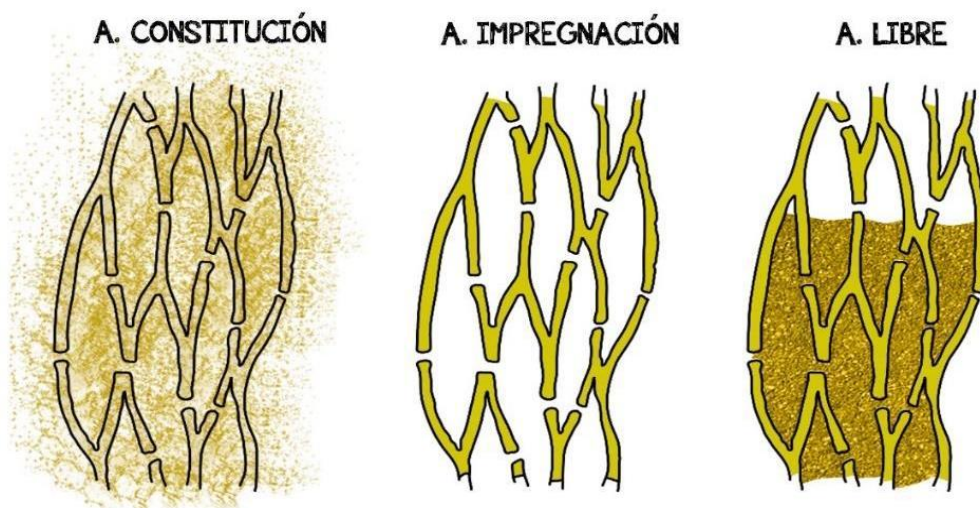
Nota. Reproducido, Maderas de la amazonia “capacidades resistentes y propiedades elásticas de cinco especies maderables”, por Lazo. 2013, Fundación PIEB.

2.2.2. Higroscopia

2.2.2.1. El Agua en la Madera. Según el *Manual del Grupo Andino para el Secado de Maderas* (1989), la higroscopicidad es la propiedad que tiene la madera, de intercambiar humedad con el ambiente. Esta capacidad de absorber o liberar vapor de agua está influenciada por factores ambientales como la temperatura y la humedad relativa. Dicho comportamiento constituye un aspecto fundamental, ya que determina las variaciones dimensionales y las posibles deformaciones que puede presentar la madera durante su uso o procesamiento

Figura 3

Presencia de Agua Libre en la Estructura de la Madera



Nota. Reproducido del *Manual del Grupo Andino para el Secado de Maderas*, 1989.

Según Lazo, M. (2013), entre los componentes moleculares de la madera, al igual que en cualquier organismo vivo, se encuentra el agua. Esta puede presentarse en tres formas principales: como agua libre, que ocupa los espacios celulares; como agua ligada, que impregna las paredes celulares; y como agua de constitución, que forma parte de la estructura molecular interna de la madera.

2.2.1.1.1. Agua Libre. Se encuentra en el interior de las cavidades celulares. Es el agua de más fácil extracción. Al eliminarla no se presentan modificaciones apreciables en las propiedades físicas y mecánicas del leño y se llega a un nivel de humedad de aproximadamente 30% en la madera. A este contenido de humedad se denomina Punto de Saturación de la Fibras (PSF). (Noboa, L.2006).

2.2.1.1.1. Agua Ligada o Impregnación. Es la que se encuentra adherida a las paredes celulares. Estas moléculas de agua están ligadas a la pared celular de la madera mediante enlaces químicos. Una vez iniciada la eliminación de esta forma de humedad a partir del PSF, se inician las modificaciones de las propiedades físicas y mecánicas de la madera como ser hinchazón y encogimiento esto ocurre entre 0% y aproximadamente 30% de contenido de humedad dependiendo la especie. (Noboa, L.2006)

2.3.2. Determinación del Contenido de Humedad de la Madera.

Existen varios métodos para determinar el contenido de humedad de la madera, los más comunes son el método gravimétrico y el método eléctrico.

Según Bond, Espinoza y Araman (2011), la determinación del contenido de humedad en la madera se basa exclusivamente en los valores del agua libre y del agua de saturación o higroscópica. En la práctica, se considera que la madera está completamente seca cuando, al ser sometida a secado en estufa a 103 ± 2 °C, alcanza un peso constante. El contenido de humedad (CH) se define como la cantidad de agua presente en una pieza de madera, expresada en función de su peso en estado seco al horno o anhidro.

Su valor numérico se expresará en porcentaje y se determina por medio de la siguiente fórmula:

$$CH (\%) = \frac{Wh - Ws}{Ws} \times 100$$

CH : Humedad de la madera expresada como un porcentaje de su peso anhidro.

Wh : Peso de la madera en estado húmedo o peso inicial.

Ws : Peso de la madera en estado anhidro; peso final o constante.

El contenido de humedad según su uso previsto establece la norma Boliviana NB 107001:2010 establece un porcentaje para la madera que permita trabajar en la transformación y estabilidad en sus diferentes aplicaciones.

Tabla 2

Contenido de Humedad de la Madera Destinado a Distintos Usos

Uso de la Madera	Contenido de humedad %
Madera para tratamiento a vacío y presión	19 -25
Ataudes	15 -25
Carrocerias (vigas y vigetas)	15 -19
Madera de construcción	15 -19
Vigas laminadas	12 -14
Carpintería interior	11 -15
Muebles interiores(sin calefacción)	10 -14
Parquet normal	9 -13
Parquet mosaico	8 -12
Instrumentos musicales	7 -9
Contrachapado (urea formaldehído)	6 -8
Muebles en ambiente con calefacción central	6 -8
Contrachapado (fenólico)	4 -6

Nota. Reproducido de la norma NB 107001:2010 “Secado de madera”

2.3.3. Humedad de Equilibrio de la Madera.

La humedad de equilibrio de la madera (HEM) se define como el contenido de humedad que alcanza la madera cuando se encuentra en equilibrio higroscópico con el ambiente, es decir, cuando no se produce ganancia ni pérdida neta de humedad frente a las condiciones de humedad relativa y temperatura del aire (Forest Products Laboratory, 2010).

El control adecuado del contenido de humedad hasta valores cercanos a la humedad de equilibrio es un factor crítico para evitar defectos como deformaciones, rajaduras y agrietamientos, así como para garantizar el cumplimiento de normas técnicas y mejorar la calidad del producto final (Simpson, 1991). Simpson, W.T. (1998).

Tabla 3

Promedios Anuales de Temperatura Media, Humedad Relativa y Contenido de Humedad de Equilibrio de la Madera en Bolivia

Lugar	Promedios			Contenido de humedad de Equilibrio			
	años	°T Media °C	Hum.Relv.%	Promedio	Minimo	Maximo	Rango
Beni	44	25,8	75	14,3	12	16,1	4,1
Cochabamba	55	17,2	50	9,4	8,3	11,3	3
Chuquisaca	51	15,4	55	10,3	7,7	13,2	5,5
La Paz	38	11,5	53	10	8	12,7	4,7
Oruro	51	10,4	44	8,5	7,2	10,7	3,5
Pando	49	25,7	80	16,1	13,3	18,0	4,7
Potosi	35	9,7	51	9,7	7,9	12,5	4,6
Santa cruz	61	24,4	70	13,1	10,6	14,8	4,2
Tarija	57	18,6	57	10,6	9,9	12,6	3,7

Nota. Reproducido de la norma NB 107001:2010 “Secado de madera” a partir de la información de contenido de humedad de equilibrio de la madera de Bolivia, Silverio Viscarra

Este equilibrio se alcanza cuando la presión de vapor del agua contenida en la madera es igual a la presión de vapor del aire circundante, lo que detiene el intercambio de humedad entre ambos medios (Simpson & TenWolde, 1999)

2.3. Defectos de Calidad

Los defectos de calidad que se generan en algunas etapas del proceso de secado son consecuencia, en gran medida, de cambios bruscos en la temperatura y en el gradiente de humedad. Estos factores afectan la estructura de la madera debido a la alta velocidad de secado.

La calidad final de la madera depende en gran medida del método de secado utilizado, ya que este influye en sus propiedades físicas, mecánicas y estéticas. El secado solar y el secado al aire libre son métodos empleados y cada uno obtuvo ventajas y limitaciones específicas.

El secado solar permite un mayor control de las condiciones ambientales, lo que reduce defectos como el colapso celular, la deformación y el agrietamiento superficial. Estudios previos, como los de Martínez-Pinillos (1997), han demostrado que este método mejora la estabilidad dimensional de la madera y reduce los tiempos de secado en comparación con el secado al aire libre.

Por otro lado, el secado al aire libre es un proceso más prolongado y depende directamente de las condiciones climáticas. Si bien este método es de bajo costo y energéticamente eficiente, presenta riesgos como la proliferación de hongos y la deformación irregular debido a la falta de control de la temperatura y la humedad (Muñoz, 2008).

2.3.1. Tipos de Defectos de Calidad

2.3.1.1. Grietas Superficiales y en los Extremos. Las grietas en la superficie y en los extremos de las piezas de madera aserrada se presentan con mayor frecuencia en las primeras etapas del secado, cuando se aplica gradiente de secado alto, es decir, cuando la diferencia psicométrica es muy grande.

La causa de la formación de estas grietas es el secado rápido de la superficie de la madera y de las capas adyacentes, lo que provoca la contracción de esta zona. Como consecuencia de este fenómeno, se generan tensiones superficiales en la dirección perpendicular, que pueden llegar a ser tan grandes que superen la resistencia de la madera en esa dirección, originando las grietas (Álvarez N., H.; Fernández, J. L., 1990).

Figura 4

Presencia de Grietas Superficiales (Rajaduras en la Madera)



Nota. Reproducido por Google,2021 <https://es.dreamstime.com/foto-de-archivosgrietas-superficiales-de-la-madera-image70160990>.

Una de las principales causas de los defectos en la madera son las rajaduras y agrietamientos, Estas separaciones longitudinales de las fibras atraviesan la pieza de una cara a la otra generalmente, ocurren en los extremos de una tabla debido a una rápida pérdida de agua, lo que genera esfuerzos de tensión. De todos los tipos de agrietamiento experimentados, este es probablemente el más común y severo.

2.3.1.2 Grietas Internas. Pueden atribuirse a un control incorrecto del proceso de secado y pueden evitarse por medio de la selección de un programa de secado adecuado. Como consecuencia del endurecimiento superficial, éste debe detectarse a tiempo y eliminarse para evitar de este modo su aparición (Solano, R., 1979).

Figura 5

Presencia de Grietas Internas



Nota. Adaptado de Manual de diseño para madera del Grupo Andino por R. Baronasá, J. I. del Valle y F. Velandia, 2001, Adaptado con fines académicos.

Generalmente, las grietas comienzan a formarse en las últimas etapas del secado, como resultado directo de las rigurosas condiciones en las primeras etapas. Estas condiciones originan esfuerzos intensos de tensión en la superficie y de compresión en el centro. Las grietas se desarrollan en el interior de la tabla, pudiendo extenderse hasta la superficie. El excesivo agrietamiento interno se denomina apanalamiento (Viscarra, S., 1998).

De lo mencionado, se puede concluir que las grietas internas son causadas por un proceso de secado incorrecto, el cual debe incluir rampas de temperatura ascendentes y mantenerse bajo un control exhaustivo, especialmente en la primera etapa, debido al alto contenido de humedad de la madera.

2.3.1.3 Deformaciones. Ocurre al inicio del proceso de secado, cuando el gradiente de secado es muy severo. Esto sucede especialmente en maderas con paredes celulares delgadas y una resistencia mecánica menor que las tensiones generadas en los meniscos de los capilares, como consecuencia de la evaporación del agua en la superficie de las piezas.

2.3.1.3.1. Torcedura. El término "torceduras" generalmente se considera en alguno de los siguientes casos:

Acanaladura o abarquillado, que es la tendencia de algunas tablas de corte plano a desarrollar una curvatura a lo ancho de la pieza.

Revirado, es la distorsión en el largo de la pieza.

Combadura o arqueado, cuando la curvatura se encuentra a lo largo de la cara de la tabla.

Encorvadura, que es la curvatura del lado o canto de una tabla.

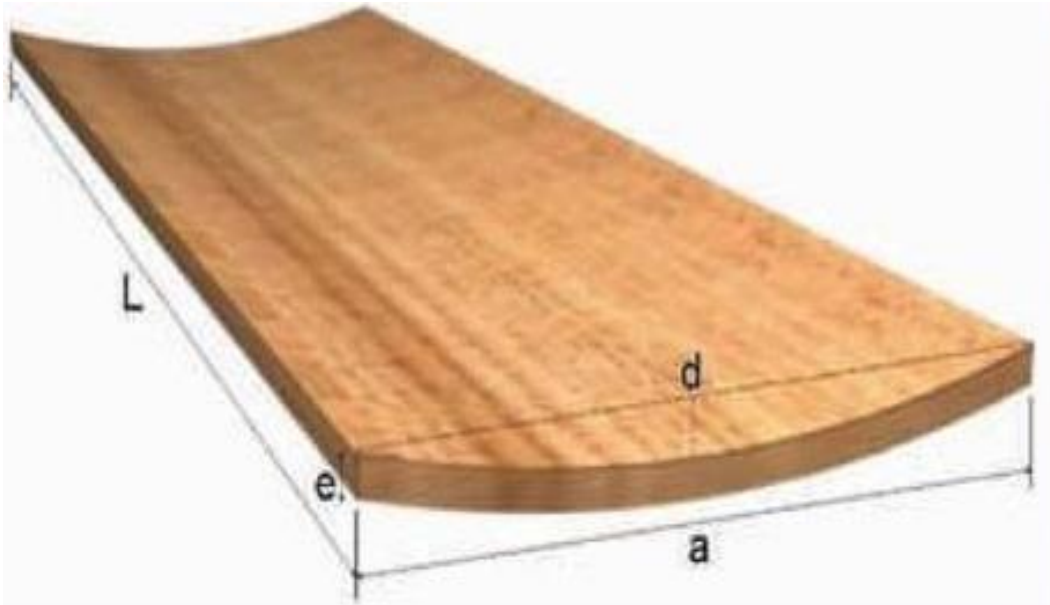
Viscarra (1998) menciona que el principal factor causante de las torceduras es un apilado incorrecto. Cuando la madera está expuesta a altas temperaturas, se vuelve más plástica y como resultado, adopta la forma dictada por los esfuerzos aplicados sobre ella. Si el espaciamiento de los separadores en una pila no está alineado verticalmente, el peso de la madera sobre una tabla particular provoca que la pieza se flexione alrededor del separador desalineado. De este modo, la madera en esa posición adquiere deformaciones permanentes. De manera similar, si los espaciamientos entre separadores son demasiado grandes, la tabla puede tender a hundirse entre ellos.

La variación en la tasa de contracción radial y tangencial es generalmente responsable de la tendencia de las tablas anchas de corte plano a desarrollar acanaladuras. En este caso, la cara de la tabla cerca al centro del tronco se aproxima más a un corte radial, comparado con las superficies opuestas y por ello se contrae menos en ancho y a esto se deben las diferencias, ya que los cantos exteriores de la tabla tienden a curvarse desde el centro o corazón. (Viscarra, 1998).

2.3.1.3.2. Alabeo. O combado de las piezas de madera durante el secado se debe a sus propiedades de contracción. Se define como la deformación que experimenta una pieza de madera debido a la curvatura de sus ejes longitudinal, transversal o ambos. Según el tipo de deformación, se considera abarquillado cuando las aristas o bordes longitudinales no se encuentran al mismo nivel que la zona central, lo que provoca que los bordes se levanten, adquiriendo un aspecto cóncavo o de barquillo a lo largo de la cara de la pieza. (Estrella C. & Cruz C., 2003).

Figura 6

Defecto de Alabeo o Cóncavo en Madera



Nota. Adaptado de Manual de diseño para madera del Grupo Andino por R. Baronasá, J. I. del Valle y F. Velandia, 2001, Adaptado con fines académicos.

2.3.2. Defectos Causados por Infección de Hongos e Insectos

A veces se desarrollan manchas de hongos por las condiciones particulares del horno y su funcionamiento esto ocurre a bajas temperaturas iniciales, lo que favorece el desarrollo de hongos. (Peck, 2013) del Laboratorio de Productos Forestales de Estados Unidos de Norteamérica, recomienda el vaporizado a 55 °C durante una hora para evitar la acción de los mohos.

Figura 7*Defecto Manchas de Hongos*

Nota. Adaptado de Manual de diseño para madera del Grupo Andino por R. Baronasá, J. I. del Valle y F. Velandia, 2001, Adaptado con fines académicos.

2.4. Proceso de secado de madera

El proceso de secado es una operación de transferencia de masa de contacto gas- sólido, donde la humedad contenida en el sólido se transfiere por evaporación hacia la fase gaseosa, el cual se obtiene la remoción (reducir contenido de humedad) para obtener un producto sin defectos ni alteraciones que disminuyan su valor y que puedan seguir transformándose y sin causar problemas derivados del secado.

Según la norma boliviana NB 107001:2010 indica que este proceso consiste en la elevación de la temperatura dentro de la cámara hasta alcanzar el valor deseado para la iniciación de secado, el tiempo de precalentamiento varía dependiendo de la especie y el espesor

de la madera. como regla general, se calcula 1hr por cada centímetro de espesor para maderas blandas y 2h por cada centímetro de espesor para madera dura.

Tabla 4

Tiempo de Pre calentamiento de la Madera Según su Densidad y Espesor

Densidad de la Madera	Espesores	
	≤3cm	≥3cm
<450kg/m ³	1,0h - 1,5h	1,5h - 2,0h
450kg/m ³ - 600kg/m ³	1,5h - 2,0h	2,0h - 2,5h
600kg/m ³ - 800kg/m ³	2,0h - 2,5h	2,5h - 3,0h
<800kg/m ³	2,5h - 3,0h	3,0h - 3,5h

Horas por 1,0cm de espesor

Nota. Reproducido de la norma NB 107001:2010 “Secado de madera”

2.4.1. Tipos de secador para madera

2.4.2. Secadores por convección

El sistema de convección es uno de los más utilizados en la industria maderera actual. En este tipo de sistema, se intercambia el aire saturado de agua con aire fresco, por lo que los secadores que emplean este sistema cuentan con salidas para el aire húmedo y un sistema de ventilación controlado de manera automatizada.

En el secado de la madera con aire caliente, se trabaja a temperatura media. Cuentan con una caldera de madera o carbón, que calienta el agua de 0° C a 100° C, para luego hacer pasar el líquido por unos intercambiadores de calor o radiadores (serpentines) instalados en el interior

del horno, en donde también se instalan ventiladores de gran capacidad que generan una fuerte corriente de aire caliente, gracias al paso de éste por los radiadores (Pang y Keey, 1995).

Figura 8

Secador Convencional Para Madera



Nota. Reproducido por Google,2021 <https://secamad.es/es/proyecto/485-secaderos-para-madera/> Adaptado con fines académicos.

La madera se expone a condiciones de temperatura y humedad relativa que pueden ser controladas. Se realiza en una cámara o compartimiento cerrado, con un sistema de calefacción que permite elevar la temperatura y dispositivos de regulación, para la variación de la humedad relativa. El aire es forzado por medio de ventiladores, en donde debe circular por las pilas de madera. Las condiciones que se aplican para cada etapa del secado están definidas por el programa, el que se establece según las características de la madera, calidad de secado, disponibilidad de recursos, etc. Las temperaturas que se utilizan van desde los 40°C hasta más

de 100°C, y las velocidades del aire van desde 1 a 7 m/s, lo que depende del tipo de secado en cámara que se esté realizando. (Red Madera, 2006)

A partir de lo expuesto, se concluye que el sistema de secado convencional se basa en procesos mecanizados para la generación de vapor, ventilación y control de parámetros, los cuales son gestionados mediante un sistema de monitoreo. No obstante, la alta inversión requerida para su implementación lo hace inaccesible para pequeños y medianos empresarios.

2.4.3. Secadores al Vacío

El secado de madera al vacío es generalmente de forma tubular de acero que consiste en un cierre hermético para permitir la generación de un vacío en el interior en este sistema al bajar la presión atmosférica se reduce la temperatura de ebullición del agua al pasar por la madera esto acelera el proceso de secado

La primera fase consiste en calentar la madera, que normalmente se apila sobre los carros de alimentación. En esta fase, la madera no se seca, sino que simplemente se calienta a la temperatura de secado, preparándola para la segunda fase. En esta etapa, se conecta la bomba de vacío, que succiona el aire húmedo de la cara externa de la madera, generando una temperatura de ebullición del agua inferior debido a la baja presión. En el interior de la madera, la temperatura es mayor que en la superficie, lo que provoca que la humedad fluya, acompañada del calor, hacia la superficie, donde se evapora con mayor facilidad gracias a la presión atmosférica reducida. Este proceso se repite continuamente hasta alcanzar el nivel de humedad deseado en la madera (Pozos, I., 2010).

Figura 9*Secador al Vacío para Madera*

Nota. Reproducido por Google,2022 <http://hf-woodworking.com/1-4-kiln-for-flooring-drying/187654/> adaptado para fines académicos

Sin embargo, el alto volumen específico del aire y el vapor asociado a la presión reducida representa una limitación significativa para el transporte de calor conectiva (Perré y Keey, 2006). Las soluciones a este problema varían desde la separación de los hornos en períodos alternados de presión atmosférica y presión reducida, hasta el uso de velocidades de aire superiores a 10 [m/s] para compensar la pérdida de capacidad térmica del aire.

A partir de lo mencionado, se puede concluir que el sistema de secado al vacío mejora los tiempos de secado de 4 a 5 veces en comparación con el secado convencional de madera. No obstante, esta tecnología presenta altos costos de inversión y requiere mano de obra.

2.4. Secado al aire libre

El secado natural o al aire libre consiste en exponer la madera a la acción de los factores climáticos de un lugar. Estos factores son la temperatura, la humedad relativa de la atmósfera y el aire que, en permanente movimiento, sirve de agente para establecer un equilibrio higroscópico entre el medio ambiente y la madera.

Es el sistema de secado de madera más antiguo se aplica frecuentemente en distintos lugares del mundo y para diversos casos, pero en especial cuando no se cuenta con recursos para montar otros sistemas. Consiste en colocar la madera al aire libre para que con el tiempo la madera alcance el equilibrio higroscópico del aire que la rodea.

Figura 10

Secado de Madera al aire Libre o Tradicional



Nota. Reproducido por Google, <https://maderasdemaria.es/servicios/secado/> adaptado para fines académicos

Uno de los problemas adicionales asociados a este proceso es la baja homogeneidad en los resultados obtenidos, ya que no toda la madera se seca de manera uniforme. Esta variabilidad dificulta la determinación precisa de la humedad final, la cual, generalmente, queda fuera de los valores establecidos para este sistema. Además, la exposición prolongada de la madera a condiciones ambientales extremas, como la radiación solar directa, afecta negativamente la calidad del material, provocando deformaciones como torceduras y rajaduras. También, este tipo de exposición incrementa la vulnerabilidad de la madera a los ataques de hongos, que pueden generar manchas azules y pudrición (De Castro, Cárdenas, Venturino, & Ono, 2008).

2.5. Secador Solar

El sistema de secado solar de madera aprovecha la energía calorífica del sol mediante un colector que tiene la capacidad de almacenar el calor generado por la incidencia de los rayos solares. Este calor almacenado se utiliza para elevar la temperatura dentro del secador, facilitando así el proceso de secado de la madera. Además, el sistema incorpora un mecanismo de ventilación forzada que genera una corriente de aire, la cual arrastra el vapor de agua presente en el interior del secador hacia el exterior de la cámara.

Específicamente, el secado solar está relacionado con dos fenómenos físicos interesantes: el fenómeno del cuerpo negro y el efecto invernadero. El primero se refiere a que, cuando un cuerpo pintado de negro recibe la incidencia de un haz luminoso, después de que se apaga la fuente de luz, el cuerpo negro emite espontáneamente cierta cantidad de energía térmica (en forma de calor) (Pozos, I., 2010).

Desde hace varias décadas, se ha investigado el uso de la energía solar para el secado de la madera. En general, se busca que, mediante un colector plano, la energía de radiación se convierta en energía térmica, alcanzando temperaturas de hasta 60°C. (Viehbeck, P., 1999)

En comparación con el secado al aire libre, se ha demostrado que el secado solar reduce el tiempo de secado entre dos y cinco veces y permite obtener contenidos de humedad final por debajo de la humedad de equilibrio del lugar. Respecto al secado artificial convencional, las instalaciones solares son mucho más baratas y los costos de secado se reducen considerablemente en las zonas tropicales con una radiación solar adecuada para secar madera. Aún en sus límites inferiores, estos secadores presentan una alternativa económica y técnica para las pequeñas industrias de la madera (López, P. V. 1985).

Figura 11

Secador Solar para Madera en Funcionamiento



Nota. Reproducido de "Secado al aire libre de madera aserrada de *Pinus hartwegii* Lindl", por LÓPEZ P., V. 1985, Relay.org, 50 p.

En México, Fuentes Salinas (1994), diseñó y construyó un secador solar tipo invernadero de bajo costo, con capacidad para 7.075 m³ de madera aserrada, destinado a los pequeños y medianos productores forestales. Para su construcción, se utilizaron materiales disponibles en la región. La evaluación de su funcionamiento se llevó a cabo mediante el secado de madera de *Pinus hartwegii* con un espesor de 2.54 cm, una longitud de 2.50 m y anchos variables. El proceso de secado alcanzó un contenido de humedad del 12% en un periodo de 17 días. Durante el funcionamiento del secador, la temperatura máxima alcanzada fue de 49 °C.

A partir de lo expuesto, se puede concluir que el aprovechamiento de la radiación solar en zonas tropicales, combinado con los materiales disponibles localmente para su construcción, posiciona al sistema de secado solar como una alternativa viable para la presente investigación. Este sistema destaca por su baja inversión económica y su compatibilidad con principios ecológicos, lo que lo convierte en una opción sostenible y alineada con la preservación del medio ambiente.

2.5.1. Funcionamiento del Secador Solar

El funcionamiento del secado solar está basado en la captación de energía mediante láminas de vidrio o material plástico, donde los rayos solares inciden, convirtiendo la energía solar en energía térmica a través de un colector, que eleva la temperatura del aire para hacerlo circular a través de la madera por medio de abanicos internos (FAO, 2008).

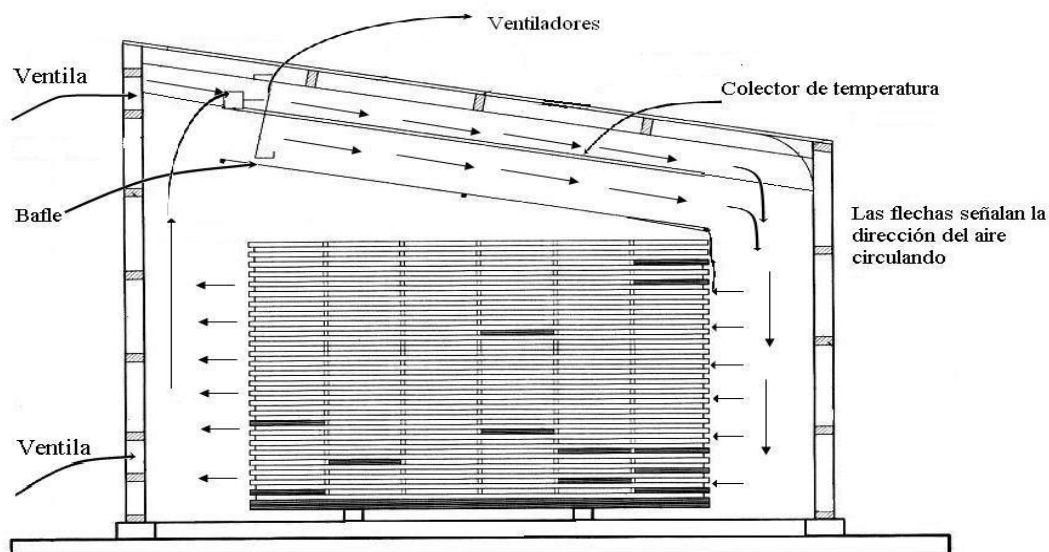
Por lo tanto, la orientación del techo debe ser tal que el ángulo de incidencia de los rayos solares sea el menor posible, con el fin de evitar su reflexión y aumentar el índice de refracción.

Esta orientación depende de la latitud; sin embargo, se debe procurar que el ángulo de incidencia no varíe más de 40° a lo largo de las diferentes épocas del año.

Durante su funcionamiento, los rayos solares deben atravesar el techo transparente y llegar al interior, donde la energía de radiación se transforma en energía térmica. (López P., V., 1985; Álvarez N., H.; Fernández, J. L., 1990).

Figura 12

Funcionamiento Interno del Secador Solar



Nota. Reproducido de “Diseño y construcción de un secador solar para madera” por Kurú: Revista Forestal (Costa Rica) 5 (14), 2008. Instituto Tecnológico de Costa Rica.

El funcionamiento de un secador solar, como unidad de precalentamiento del aire, dependerá en gran medida del índice de insolación para elevar la temperatura, además de otros factores como la orientación hacia el sol, el ángulo de incidencia, la superficie del colector o cuerpo negro. Finalmente, este proceso permitirá elevar la temperatura de la madera y favorecer la liberación del agua contenida en su interior, la cual será expulsada al exterior mediante ventilación forzada.

2.5.2. Diseño y Construcción de un Secador Solar

Los diseños con estas características dependerán de la demanda estimada de producción, el dimensionamiento, las dimensiones del producto (ancho y largo), los materiales utilizados y los equipos necesarios para la ventilación. Otro aspecto relevante es la localización en función de las latitudes del lugar y el cálculo térmico del secador solar.

El secador solar debe ser diseñado de manera que las pérdidas de calor sean mínimas, optimizando así su eficiencia. La evidencia demuestra que secar madera en un secador solar es más eficiente que hacerlo al aire libre. Las dimensiones del secador, sus componentes y la madera en sí están interrelacionadas y calculadas en función de parámetros como la eficiencia, los flujos de calor, las cantidades de aire que deben pasar por el secador, el calor requerido para evaporar el agua y otros parámetros calculados. (Segovia, R., 2012).

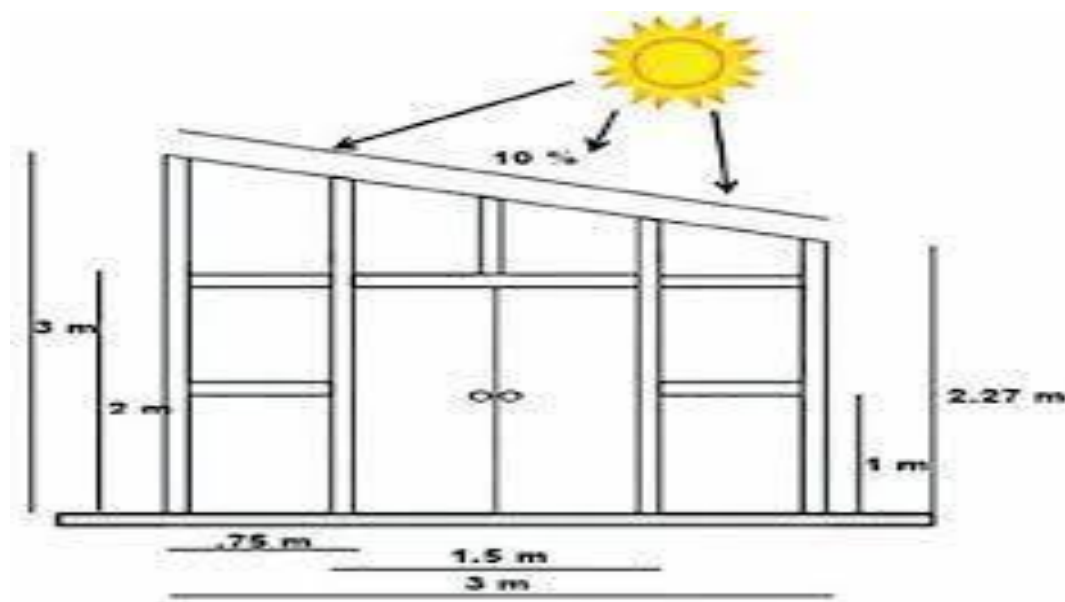
Cuando se diseña o construye un secador solar, es fundamental considerar que el tamaño óptimo de la cámara dependa de la demanda del volumen de madera. La experiencia en Costa Rica en 2008 y México 2003 indica que no es conveniente construir secadores con capacidades superiores a los 15 m³, ya que, a medida que la cámara aumenta de tamaño, la eficiencia del secado disminuye. Otro aspecto a considerar es el ancho del secador. El diseño debe garantizar una circulación uniforme del aire a través de la pila de madera que se pretende secar.

El techo de un secador solar debe garantizar la entrada de los rayos solares, pero evitar su salida. Para ello, se recomienda utilizar vidrio de 3 mm en su construcción y diseñar el techo con la inclinación adecuada según la latitud del lugar donde se construya la cámara de secado. El techo deberá tener una inclinación aproximada del 10% en la dirección Norte-Sur, con el

objetivo de que los rayos solares incidan perpendicularmente sobre el colector durante todo el año. (Salas, C., 2011).

Figura 13

Posición e Inclinación del Colector Solar con Respecto Sol



Nota. Reproducido de “diseño y construcción de un secador solar para madera” por Kurú: Revista Forestal (Costa Rica) 5 (14), 2008. Instituto Tecnológico de Costa Rica.

“Una de las experiencias más cercanas en Pando se dio en la maderera CIBACSA en 2013. Los resultados no fueron favorables debido al sobredimensionamiento de su capacidad (70 m³ de madera), lo que resultó ineficiente. Según Óscar Farfán, Gerente de Operaciones (comunicación personal, 2013), se alcanzó un contenido de humedad final del 22,1 % en 166 días utilizando madera blanda de la especie *Aliso cambara* de 2.54mm de espesor.”

Es conveniente tener en cuenta, para el diseño y la construcción de una cámara de secado solar, factores como la capacidad de producción, la latitud geográfica, la inclinación del techo, el colector solar, y asegurar la mayor incidencia de los rayos solares. Además, es fundamental

conocer la cantidad de radiación solar, utilizar materiales de recubrimiento resistentes, e implementar sistemas de ventilación y control.

2.5.3. Parámetros Involucrados en el Secado de Madera

Los procesos de secado o transferencia de masa son procesos unitarios en los cuales intervienen fenómenos físicos. Los principales parámetros de control en el secado de madera son la velocidad de secado, que dependerá de la humedad relativa, el contenido de humedad inicial, la temperatura, el tiempo y el caudal de aire tanto dentro del sistema como en el exterior

2.5.4. Velocidad de Secado

En el diseño de secadores, además de las relaciones de equilibrio, es necesario establecer relaciones que permitan determinar la velocidad del secado o el tiempo de secado.

Cuando se seca un sólido ocurren dos procesos fundamentales y en forma simultánea:

- ✓ Se transfiere calor para evaporar un líquido.
- ✓ Se transfiere masa: como líquido o vapor al interior del sólido, y como vapor del sólido al aire. (Solano, R., 1979).

La velocidad de secado cambia de una línea recta a una curva exponencial decreciente, presentando una zona de transición. En este rango higroscópico, el agua retenida en la madera por fuerzas de naturaleza molecular y/o eléctrica se mueve por difusión a través de las paredes celulares, debido al gradiente de humedad que se crea entre las paredes de las células vecinas. Finalmente, la curva tiende hacia un valor límite que no es otro que la humedad de equilibrio de la madera correspondiente a las condiciones climáticas establecidas (Viehbeck, P., 1999).

$$V = \frac{S}{A} \left(\frac{dx}{dt} \right)$$

- V: Velocidad de secado
 A: Area de superficie expuesta
 s: Peso del solido seco

De lo mencionado, se debe considerar la velocidad de secado como la relación entre el tiempo y la disminución de la humedad, debido a la aceleración provocada por la aplicación de temperatura y los flujos de aire, que desplazan el vapor de agua hacia la atmósfera.

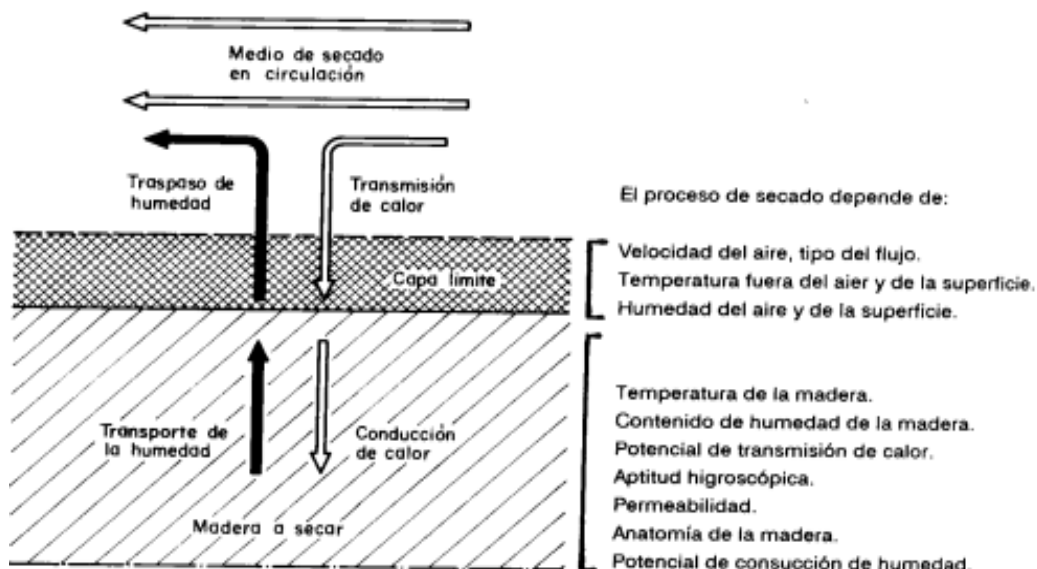
2.5.5. Velocidad o Flujo de Aire

La velocidad del aire es elemento de control de la rapidez de evaporación del agua durante el proceso de secado de la madera. La ventilación o circulación de aire fresco a través de una pila de madera y la expulsión de humedad, son condiciones necesarias para asegurar la remoción del exceso de vapor dentro de un secador solar.

Experimentalmente se ha demostrado que se obtienen mejores condiciones de secado, cuando el aire circula en una pila de madera a una velocidad de 2 m/s. Si se utiliza velocidades mayores sin un debido control puede comprometerse la calidad de la madera por cuanto se acelera considerablemente la tasa de evaporación de agua, generando un gradiente de humedad muy alto entre la superficie de la madera y su parte interna. Una vez reducido el contenido de humedad por debajo del punto de saturación de las fibras (PSF) se puede reducir la velocidad del aire de 0,5 a 1 m/s, sobre todo para maderas duras y de difícil comportamiento en el secado (Bond, B., Espinoza, O., & Araman, P., 2011).

Figura 14

Funciones Principales de la Velocidad del Aire



Nota. Reproducido de Manual de diseño para madera del Grupo Andino, por R. Baronasá, J. I. del Valle y F. Velandia, 2001.

La velocidad del aire dentro del secador tiene dos funciones principales, la primera es transmitir la energía requerida para calentar el agua contenida en el material para facilitar su evaporación y la segunda es que ayuda a transportar la humedad saliente del material, (Ellwanger, 2009; Sierra, 2010; Gasca, 2014).

La velocidad del aire dentro de una pila transmite la energía requerida para calentar el agua contenida en la madera, facilitando así su evaporación y el transporte de la humedad saliente de la madera. Se debe considerar la mecánica de fluidos y sus variables, las cuales son necesarias para determinar una velocidad de entre 1 y 2 m/s, así como la distribución del flujo de aire.

2.5.6. Temperatura

Ellwanger (2009), indica que la temperatura desempeña un papel importante en los procesos de secado. En forma general, conforme se incrementa su valor se acelera la eliminación de humedad dentro de los límites posibles.

El calor constituye la fuente fundamental que permite a las moléculas de agua contenidas en la madera adquirir la energía cinética necesaria para su evaporación. Este proceso depende, a su vez, de la cantidad de energía suministrada por unidad de tiempo y de la capacidad del sistema (Geankoplis, 1998).

Es importante también tener en cuenta que la temperatura, conjuntamente con la humedad relativa, son los elementos que determinan el clima dentro de una secadora y el equilibrio del contenido de humedad de la madera. Por lo tanto, podemos decir que: Un aumento de temperatura incrementa el movimiento del agua dentro de la madera (Fuentes S., M., 1994).

Sobre lo mencionado se puede entender que la temperatura es un factor de aceleración de la evaporación ya que cuanto más elevada sea la temperatura del ambiente que rodea la madera, más intensa será la evaporación en este sentido que el aire podrá absorber más humedad. Hacia el interior de la pieza de madera.

2.5.7. Efecto Invernadero

Este fenómeno físico, causado por la radiación solar provee ventajas en procesos con la acumulación de energía (temperatura) para diferentes usos, las aplicaciones más comunes son

mantener una temperatura regular que proteja las plantas agrícolas en otros casos deshidratado de alimentos.

La energía solar pasa a través del vidrio utilizando la onda corta y una vez que lo atraviesa la energía no puede escapar ya que se refleja en forma de onda larga, la cual queda atrapada en la cámara y produce un efecto invernadero a lo interno de la cámara (Salas, C., Moya, R., & Córdoba, R., 2008, p. 6)

Los secadores solares más definidos, consisten en una estructura de invernadero, donde el aire se renueva en forma constante por la puerta, y se aprovecha a la salida cuando ha adquirido mayor temperatura, para secar hierbas y otros productos vegetales. Se han desarrollado múltiples modelos de secadores, aprovechando distintos materiales plásticos para producir el efecto invernadero. Sin embargo, la mayor limitante que tienen estos diseños, es que se necesita una gran superficie para calentar el aire, lo que se traduce en espacio e infraestructura cara inutilizada. (Pozos, I., 2010, p. 22)

Se puede comprender mejor que el efecto invernadero se genera a través de la radiación solar, la cual atraviesa los materiales que son transparentes a la luz visible y ultravioleta (UV). Como resultado, esto genera la acumulación de calor y la elevación gradual de la temperatura.

2.5.8. Humedad del Aire

El aire presente en el ambiente conocido como aire atmosférico es una mezcla de aire seco y vapor de agua, el aire seco está compuesto de nitrógeno, oxígeno y otros gases. El contenido de vapor de agua varía por diferentes factores como la evaporación de lagos, etc. la

cantidad de vapor de agua presente en el aire, se puede expresar de forma absoluta mediante la humedad absoluta, o de forma relativa mediante la humedad relativa o grado de humedad.

2.5.9. Humedad Específica del Aire

La humedad específica es conocida como humedad absoluta o relación de humedad, está se representa con el símbolo (ω); esta propiedad se define la masa de vapor de agua presente en una unidad de masa de aire seco; esta propiedad está dada en unidades de masa de vapor de agua (kg de agua) entre unidades de masa de aire seco (kg de aire).

El aire atmosférico es una mezcla de aire seco y vapor de agua, si se tiene una determinada masa de aire atmosférico entonces, la humedad específica del aire es la relación que existe entre la masa de vapor de agua y la masa de aire seco que contiene la masa de aire atmosférico, también se la conoce como relación de humedad.

$$w = \frac{mv}{ma}$$

w : Humedad específica (kg vapor de agua)/(kg aire seco)

mv : Masa de vapor de agua (kg)

ma : Masa de aire seco (kg)

Cuando el aire no contiene vapor de agua se le conoce como aire seco y su humedad específica es cero, sí la cantidad de vapor aumenta la humedad específica aumentará hasta que el aire no pueda contener más humedad en este punto se dice que el aire está saturado de humedad. (Coyago, R., & Criollo, D., 2013).

Esta definición de la humedad solo depende desde la presión parcial del vapor de agua en el aire y de la presión total (1.01.25kPa ,1.0atm o 760mm de Hg) si el peso molecular del agua es de 18.02 y el aire es de 28.97 la humedad en kg H₂O/kg de aire seco (Geankoplis, C., 1998)

$$H = \frac{PA}{P-PA} = \frac{Kg\ H_2O}{Kg\ Aire\ seco}$$

H: humedad Absoluta

PA: Presión parcial del vapor de agua

P: Presión total

Las condiciones ambientales dentro y fuera del proceso de secado de madera, son importantes a la hora de encontrar resultados óptimos en tiempos, el control y monitoreo de estos factores resultan ser relevantes ya que se depende de la humedad específica del ambiente para absorber la humedad emitida al aire seco.

2.5.10. Humedad Relativa

Se define como la relación entre la cantidad de vapor de agua contenida en un volumen determinado de aire y la mayor cantidad posible de vapor de agua que pueda hallarse en ese volumen de aire a la misma temperatura.

De acuerdo a esta definición, la humedad relativa del aire será del 100% si la presión parcial del vapor de agua en la atmósfera es igual a la presión del vapor saturado, situación que se presenta cuando el aire está saturado con vapor de agua y será del 0% si el aire está completamente seco (Solano, R., 1979).

Se conoce que a una determinada temperatura el aire ambiente contiene una cantidad de vapor de agua, pero a estas condiciones también se puede seguir agregando vapor de agua hasta que el aire se sature. La humedad relativa del aire es la cantidad de vapor de agua que contiene respecto a la cantidad máxima de vapor de agua que puede contener a la misma temperatura. (Noboa, L., 2006).

$$\varphi = \frac{mv}{mg}$$

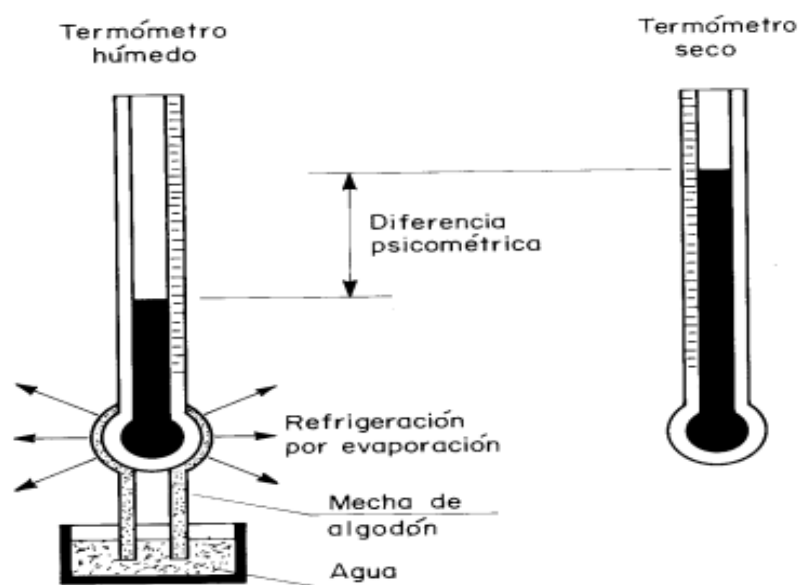
φ : humedad relativa (%)}

mv : masa de vapor de agua que contiene una cantidad de aire seco(kg)

mg : masa de vapor de agua máxima que puede contener una cantidad de aire seco

Figura 15

Psicrómetro para Medición de Humedad Relativa



Nota. Reproducido de Manual de diseño para secado de madera del Grupo Andino, por R. Baronasá, J. I. del Valle y F. Velandia, 2001.

Humedad relativa es la relación porcentual entre la cantidad de vapor de agua real que contiene el aire y la que necesitaría contener para saturarse a idéntica temperatura este fenómeno físico afecta directamente a la humedad de la madera. Por lo tanto, se puede entender que el potencial de secado del aire es mayor, Cuando el aire contiene su máxima capacidad, el aire es completamente saturado y, por lo tanto, incapaz de absorber más humedad, por el contrario, un aire no saturado tiene la posibilidad de absorber una cantidad determinada de humedad hasta lograr su saturación.

2.6. Eficiencia del secador solar

Las eficiencias de estos secaderos están en función de la capacidad de transformar la radiación solar en calor, la capacidad de aprovechar ese calor para calentar el aire y evaporar el agua de la madera.

Desde otro punto de vista la eficiencia de los secadores solares depende en gran medida de las variables circulación de aire, clima del sitio, calidad y tiempos. En climas tropicales con alta intensidad de brillo solar, la temperatura media dentro del secadero puede fácilmente exceder la temperatura media del ambiente hasta en 30°C para ello es indispensable un debido control del clima dentro del secadero solar (López P., V., 1985)

El secador solar debe ser diseñado con el fin de que las pérdidas de calor sean mínimas, así como la eficiencia del mismo demuestran que secar madera en un secador solar es más eficiente que al aire libre. Las dimensiones del secador, sus partes y la madera en sí, están relacionadas y calculadas en función de los parámetros de eficiencia, flujos de calor, cantidades

de aire que deben pasar por el secadero, valores requeridos para evaporar el agua, y otros parámetros calculados. (Estrella, C., & Cruz, C., 2003)

La eficiencia del secador solar dependerá de diversos factores, tales como el diseño, la localización en relación con las latitudes del lugar, el cálculo térmico y los cálculos del caudal de aire. Estos elementos son fundamentales, junto con la optimización de los programas de secado, la capacidad de proceso y la calidad. La combinación de estos aspectos genera el conocimiento necesario para implementar de manera adecuada dicha tecnología.

Capítulo 3.

Metodología

Balestrini (2000) indica que el marco metodológico “es el conjunto de procedimientos a seguir con la finalidad de lograr los objetivos de la información de forma válida y con una alta precisión” (p.44). En otras palabras, es la estructura sistemática para recolección, ordenamiento y análisis de la información, que permite la interpretación de resultados en función del problema que se investiga.

3.1. Tipo y Enfoque de Investigación

La presente investigación adopta un *enfoque cuantitativo*, dado que se sustenta en la recolección y análisis de datos numéricos que permiten establecer relaciones causales y validar la hipótesis previamente planteada (Hernández, Fernández & Baptista, 2014). El enfoque cuantitativo resulta adecuado para medir variables como el contenido de humedad y la calidad final del producto mediante indicadores técnicos y estadísticos.

El tipo de la investigación es de carácter *exploratorio*, ya que la variable de interés el sistema de secado solar tipo invernadero ha sido poco estudiada en el contexto local, a pesar de que existe una base de estudios y experiencias en el ámbito internacional. Dada su particularidad regional, resulta necesario investigar este sistema en profundidad.

3.2. Diseño y Alcance de la Investigación

El diseño adoptado es *cuasi-experimental de corte transversal*, ya que se implementa un prototipo de secador solar tipo invernadero y se lo compara con el método tradicional de secado

al aire libre, dado que manipula una variable independiente (el tipo de secado) para observar su efecto sobre variables dependientes (contenido de humedad, calidad final, tiempos de secado, estabilidad dimensional y costos operativos), bajo condiciones similares.

El *alcance* de la presente investigación exploratoria radica en la necesidad de evaluar el desempeño del sistema de secado en un contexto real y representativo de las condiciones locales. Este proceso de observación y análisis permitirá determinar sus beneficios operativos, restricciones técnicas y el grado de aplicabilidad para el sector ACAMPE vinculado al secado de madera.

3.3. Población y Muestra

Se seleccionaron las muestras fue considerando las piezas de madera con mayor contenido de humedad. Cada muestra fue dimensionada con una longitud de 76 cm y claramente identificada como muestra testigo, numerados para facilitar su seguimiento. según norma NB 107001:2010, “secado artificial de la madera” indica que el número mínimo de muestras de secado a tomar es de cuatro por cada 20 m³ (8.500 pies/tab), para el presente estudio se optó por utilizar 5 muestras testigo, ubicadas a 50cm de cada extremo equidistante uno con el otro, de modo que el contenido de humedad pudiera registrarse con facilidad.

Asimismo, se verificó que las muestras no presentaran defectos visibles antes del inicio del secado, tales como grietas, presencia de hongos o nudos sueltos.

Para el secado al aire libre o secado natural se utilizaron los mismos criterios, tamaño 5 muestras testigo con una longitud de 76cm claramente identificado como referencia la Norma NB 107001:2010 y de manera complementaria, en la Norma NB 107002:2010 “Procedimiento

para el secado natural de madera verde”. Las tablas fueron apiladas en caballete, dispuestas de manera cruzada e inclinada sobre la estructura de soporte. Antes de iniciar el proceso, se verificó que las muestras no presentaran defectos visibles, tales como grietas, presencia de hongos o nudos sueltos. Asimismo, la madera se colocó sobre una base de vigas a 5 cm del suelo, con el propósito de evitar el contacto directo con la tierra, de esta manera, prevenir la infestación por hongos e insectos.

3.4. Materiales y Métodos

Los materiales y equipos utilizados para la ejecución de la presente investigación fueron materiales existentes en el lugar, la ejecución de ensayos se lo realizó en predios de ACAMPE y algunos ensayos de laboratorio con equipos de “Laboratorio de materiales” de la carrera de ingeniería civil, laboratorios de Area ciencias Bilogicas y naturales (UAP).

3.4.1. Material Biológico

El material de ensayo consistió en madera aserrada de la especie marfil (*Aspidosperma macrocarpon*), obtenida de carpinterías asociadas a la Asociación de Carpinteros de Pando (ACAMPE), ubicadas en el municipio de Cobija, departamento de Pando. Las dimensiones de las piezas correspondieron a la demanda del mercado local, con medidas de 1,5” × 6” × 13 ft.

3.4.1. Material de Campo

El recubrimiento plástico Transparente fue seleccionado de acuerdo a las bibliografías aplicadas con un espesor de 200 micras. La estructura de la pared del secador solar fue de madera (3 x 4 x 2.79m) resultados de un análisis de las características, especificaciones,

materiales y resultados obtenidos de 15 proyectos de secadores experimentales desarrollados tanto en México, Ecuador, Australia, Costa Rica, Uruguay, EEUU (Maldonado y Peck, 1962; Troxel y Mueller, 1968; Bois, 1977; Solano, 1979; Yang, 1980; Martínez, 1984; Simpson y Tschernitz, 1988; Rodríguez et al., 1989; Álvarez y Fernández, 1990 y Viehbeck, 1999).

3.4.1. Equipos

Tabla 5

Equipos Utilizados Para la Recolección de Datos de Secado

N	Características técnicas	Equipo
1	<p>Anemómetro: Pm625b instrumento meteorológico, fue utilizado para medir los caudales y velocidades del aire tanto en el interior del secador solar tipo invernadero como en el sistema de secado al aire libre. Estas mediciones fueron fundamentales para comprender los fenómenos ambientales que influyen en el proceso de secado de la madera</p>	
2	<p>Estufa AKITA: utilizado para la determinación del contenido de humedad final de la madera operó bajo el método gravimétrico, Para la obtención de datos confiables, las muestras fueron sometidas a una temperatura constante de 103 °C, hasta alcanzar peso constante. rango operativo que va desde los 5 °C (41 °F) hasta los 300 °C (572 °F), y su fuente de calor está basada en una resistencia eléctrica.</p>	

Tabla 6 (Continuación)*Equipos Utilizados Para la Recolección de Datos de Secado*

3 Psicrómetro analógico de bulbo seco y bulbo húmedo: Este instrumento, por sus características de precisión y confiabilidad, fue empleado como patrón de referencia para la contratación de los datos registrados por otros dispositivos digitales, garantizando así la validez de las mediciones de humedad relativa y temperatura durante el proceso de secado.

**4 Calibrador digital:**

Este equipo fue fundamental para realizar el seguimiento a la estabilidad dimensional de las piezas durante y después del proceso de secado, permitiendo lecturas exactas y libres de errores de interpretación gracias a su visualización digital.

**6 Moisture Meter EMT01:**

Se utilizó para medir electrónicamente la humedad inicial y final de las muestras, para la construcción de curvas de secado este equipo es común en controles de calidad por su precisión en distintos tipos de madera



7 Data Logger: Se utilizó para el monitoreo y registro continuo de la temperatura dentro de la cámara del secador solar. Su capacidad de almacenamiento (16.000 lecturas) y su interfaz compatible con sistemas Windows permitieron un seguimiento detallado del proceso cada 20 minutos, facilitando la construcción precisa de la curva de secado.



Flexómetro: Se utilizó para medir el ancho, largo y espesor de la madera en superficies rectas. Fue una herramienta esencial durante la construcción del prototipo del secador solar tipo invernadero.



Nota. Elaboración propia

3.5. Procedimiento Experimental

3.5.1. Construcción del Prototipo de Secador Solar Tipo Invernadero

Como primera fase del estudio, se llevó a cabo la construcción de un prototipo de secador solar. Para ello, se recopiló y analizó información bibliográfica existente tanto a nivel nacional como internacional, incluyendo fuentes de países como Estados Unidos, Ecuador, México, Costa Rica y Bolivia (Santa Cruz). Entre las referencias consultadas se encuentran los trabajos de Martínez-Pinillos (1997), Bond, Espinoza y Araman (2011), Estrella y Cruz (2003), Fuentes, Luna, Osorio y Corona (2003), Muñoz (2008) y Viehbeck (1999) que coadyuvaron a establecer la mejor alternativa.

A nivel de ingeniería se desarrolló el diseño, cálculo y dimensionamiento de un secador solar con capacidad para 3 m³ de madera. Además de la aplicación del método de la ruta crítica (CPM), como técnica de planificación y optimización del proyecto.

3.5.2. Ubicación Geográfica

El trabajo de campo y la experimentación de la presente investigación se realizó en los predios de la Asociación ACAMPE en el municipio de Cobija, provincia Nicolás Suárez del departamento Pando. 11°03'02.6"S 68°46'33.1"

Figura 16

Ubicación del Área de Estudio en el Km 4 Carretera Cobija–Porvenir



Nota. Elaboración propia con base en datos de ubicación geográfica obtenidos de Google Maps.

3.5.3. Características Ecológicas

La localidad de Cobija se encuentra a una altitud de 235 m.s.n.m., geográficamente situada a 11° 02' 23" de latitud sur y 68° 46' 49" de longitud oeste. Presenta una precipitación pluvial anual de 1.800 mm, con una temperatura promedio que varía entre 21 °C en los meses más fríos y alcanza hasta 38 °C en los meses más calurosos. La humedad relativa en el ambiente es de 60% durante la época fría y llega hasta 95% en la temporada de lluvias (SENAMHI, 2020).

3.5.4. Cálculo y Dimensionamiento del Secador Solar

El secado solar utiliza la energía proveniente de la radiación solar para elevar la temperatura del aire, lo que permite una transferencia eficiente de calor hacia la madera. Para el dimensionamiento del secador solar tipo invernadero, se consideraron tanto las necesidades

energéticas del proceso como la superficie de captación solar, tomando como base un volumen de 3 m³ de madera.

El procedimiento se inició con la estimación del contenido de humedad de la madera, el índice de insolación del lugar y la tasa de secado, parámetros fundamentales para determinar la energía útil requerida, expresada en W/h, para extraer la humedad de un metro cúbico de madera. Asimismo, fue dimensionado del sistema de ventilación, considerando principios de mecánica de fluidos para asegurar un flujo convectivo eficiente que facilite el transporte de calor dentro del sistema.

3.5.4.1. Cálculo de Cantidad de Agua en 3 m³ de Madera. La metodología aplicada para la determinación de la cantidad de agua en la especie marfil se basó en la recopilación de información sobre sus características físicas. Según la FAO (1986), la densidad de la madera de marfil es de 700 kg/m³, De manera similar, Lazo, M. (2013) señala en su estudio sobre las propiedades físicas de la especie maderable marfil que esta presenta una densidad básica de 740 kg/m³ con una humedad media del 15,43% el cual se utilizó como referencia para efectos de cálculo, tomando en cuenta una humedad media inicial del 45% y una humedad final inferior al 18%.

Los resultados obtenidos se detallan en el siguiente cuadro: Calculo de la masa de agua a eliminar.

Expresión (1)

$$m = V \times \rho$$

m : masa en kg

v : Volumen de madera 3m^3

ρ : densidad de la madera marfil $640\text{kg}/\text{m}^3$

Masa de madera seca = $3\text{m}^3 \times 640 \text{ kg}/\text{m}^3 = 1.920 \text{ kg}$

Masa de agua inicial = $1.920\text{kg} \times 0,45\% = 864\text{kg}$

Masa de agua final = $1.920\text{kg} \times 0,18\% = 345,6\text{kg}$

Masa de agua a eliminar = $864 - 345,6 = 518,4\text{kg}$

Con base en un volumen de 3 m^3 de madera de marfil, se estima que la masa de agua contenida asciende a aproximadamente $518,4 \text{ kg}$, la cual deberá ser extraída durante el proceso de secado.

3.5.4.2. Determinación de las Necesidades Energéticas Para el Secado de Madera.

El modelo termodinámico de balance de energía considera que la energía térmica disponible, proveniente de la radiación solar y el flujo de aire, se utiliza para el proceso de evaporación del agua contenida en la madera. Este modelo establece una relación cuantitativa entre la energía térmica aportada por estos factores y la cantidad de agua que debe eliminarse, permitiendo predecir la eficiencia y el rendimiento del sistema de secado solar en función de las condiciones ambientales y las características del material.

Expresión (2)

$$Q = M_{\text{agua}} \times L$$

Q : Energía total

M : Masa de agua de (kg)

L : Calor latente de Vaporización del agua 2,260kJ/kg

sustituyendo valores en la expresión (2)

$$Q = 518,4\text{kg H}_2\text{O} \times 2,260\text{kJ/kg}$$

$$Q = 1,17 \times 10^9 \text{ J.}$$

Se determinó que la energía necesaria para extraer la humedad contenida en 3 m³ de madera es de aproximadamente 1,17 × 10⁹ julios (J). Este valor fue estimado en función del contenido inicial de humedad de la madera, la cantidad total de agua a eliminar (518,4 kg), el calor específico del agua.

3.5.4.3. Área de Captación Solar. Uno de los aspectos más relevantes en el estudio de la eficiencia energética es la disponibilidad del recurso solar. Según Kalogirou (2014), la radiación solar es un factor determinante en el secado de materiales, indicando un promedio de 800 W/m² como valor de referencia para este tipo de procesos. Con base en esta información, se revisaron los registros de radiación efectiva en el norte de Bolivia, Según datos del Global Solar Atlas (Solargis, 2020) afirma que la irradiación solar promedio diaria en la región de Pando se encuentra en el rango de 700 W/m². Durante el período comprendido entre agosto y diciembre de 2021, se observó que las temperaturas máximas superaron su valor histórico de 38.8 °C, Este incremento en las temperaturas se traduce en un índice de insolación de 7 horas/día y una humedad relativa promedio del 56%, lo que influye directamente en la eficiencia del secado solar.

Expresión (3)

$$A=L \times W \times \cos(\theta)$$

A = área (m²)

L = largo del techo del secador(m)

W = ancho del techo del secador(m)

θ = Angulo de inclinación del techo respecto al suelo

$$A= 4\text{m} \times 3\text{m} \times \cos (20)$$

$$A= 11,27\text{m}^2$$

El área requerida para la captación solar en la cubierta del secador fue estimada en 12 m², Esta superficie fue incorporada en el diseño estructural del prototipo, asegurando una inclinación y orientación óptimas para maximizar la captación de energía solar.

3.5.4.4. Cálculo de Energía Solar Disponible. El modelo de balance de energía en un sistema de secado solar considera que una parte de la energía solar que incide sobre el secador se utiliza para evaporar el agua contenida en la madera, mientras que otra parte se pierde debido a la ineficiencia del sistema, conforme a la segunda ley de la termodinámica y al principio enunciado por Kelvin-Planck.

Dado que no es posible convertir toda la energía absorbida en trabajo útil al 100%, se establece un rendimiento (η) que tiene en cuenta las pérdidas del sistema. Como se menciona en el estudio de Hassan y Langrish (2015), el rendimiento estimado para el secador solar es del 27% ($\eta=0.27$).

Expresión (4)

$$Q= A. G. \eta. t$$

A : área de captación solar (m^2)

Q : energía útil requerida (J)

G : irradiación solar promedio diaria (W/m^2)

t = tiempo de exposición al sol (s)

η = eficiencia del sistema de captación

Sustituyendo valores en la expresión (4)

Para este estudio, se consideraron los siguientes valores para el departamento de Pando.

$$A = 12 \text{ m}^2$$

$$G = 700 \text{ W/m}^2$$

$$t = 7 \text{ horas/día} \times 3600 \text{ s/hora} = 37,400 \text{ s/día}$$

$$\eta = 0,27\%$$

$$Q = 12 \times 700 \times 0,27 \times 37,400$$

$$Q = 57,15 \times 10^6 \text{ J/día}$$

Considerando que la energía disponible por día a través de captación solar es de $57,15 \times 10^6 \text{ J/día}$, y que la energía requerida para cubrir la demanda total del proceso de secado es de $1,17 \times 10^9 \text{ J}$, a partir de ello se pudo estimar el número de días necesarios para satisfacer dicha necesidad energética mediante la siguiente relación:

$$\frac{\text{Energía necesaria}}{\text{Energía disponible por día}} = \frac{1,17 \times 10^9 \text{ J}}{57,15 \times 10^6 \text{ J}} = 21 \text{ días}$$

3.5.4.5. Cálculo y Dimensionamiento del Sistema de Ventilación. La segunda ley de la termodinámica, que establece la conservación de la energía, se aplica en los procesos de

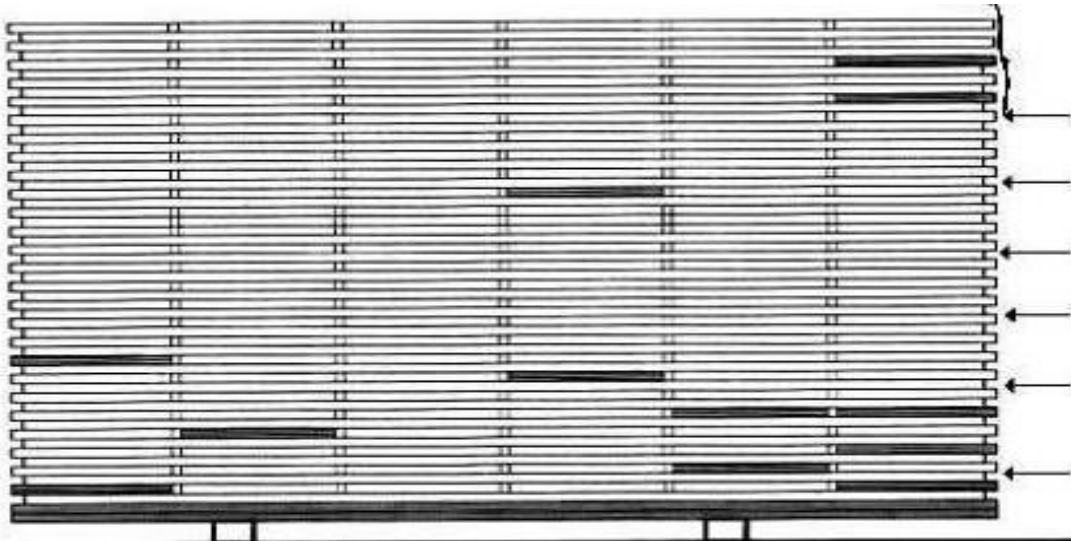
transferencia de masa durante el secado de la madera. En este contexto, la transferencia de calor se produce cuando el aire, al estar a una temperatura superior a la de la madera, transfiere energía térmica hacia el material, favoreciendo la evaporación de la humedad. Esta transferencia se desarrolla en un sistema abierto mediante la circulación de aire, donde una parte de la energía se disipa inevitablemente, limitando así la eficiencia del proceso.

Para el transporte de calor, se optó por la implementación de ventiladores axiales. Inicialmente, se realizó el dimensionamiento desde la mecánica de fluidos, considerando las siguientes variables: (a) área de contacto, (b) volumen de aire a remover, (c) caudal y (d) velocidad final de la corriente de aire. El objetivo de este análisis fue determinar la potencia del motor, el diámetro de las aspas y la cantidad necesaria de ventiladores.

3.5.5. Mecánica de fluidos

La aplicación en el secador solar está sujeta a fuerzas externas distintas de cero. Uno de los parámetros más relevantes en el diseño fue la determinación del caudal necesario, definido como la cantidad de fluido que circula a través de una sección (pila de madera) por unidad de tiempo. Para una mejor comprensión, se determinaron la demanda de flujo requerida para el secador, considerando su relación directa con los ventiladores y su potencia mecánica.

3.5.5.1. Área de Contacto. La sección o superficie útil de la madera, a través de la cual pasa el fluido o la corriente convectiva, se determinó colocar varillas de separación entre cada fila. Estas varillas permiten el paso del aire sin generar resistencia significativa. Es decir, para efectos de cálculo, se tomó en cuenta la diferencia entre la superficie total de la madera y los espacios libres:

Figura 17*Área útil e Contacto Para Flujo de Aire**Nota.* Elaboración propia

En superficies rectangulares considerando la sección útil:

Expresión (5)

$$A = L \times h$$

A = superficie en (m²).

L = Longitud en (m).

h = Altura espacio libre en (m).

$$A = 4\text{m} \times 0,8\text{m}$$

$$A = 3,2\text{m}^2$$

3.5.5.2. Volumen de Aire a Remover. La renovación del aire dentro del secador fue una medida esencial considerada en el diseño. Esta implica renovar el volumen de aire varias

veces por hora, basándose en un principio termodinámico que establece que, en un recinto cerrado, el aire no se crea ni se destruye; es decir, para extraer aire a través de una abertura, debe entrar el mismo caudal por otra.

Inicialmente, se realizó el cálculo del volumen de aire a remover dentro del secador solar. A partir de este dato, se determinó la tasa de renovación

Expresion (6)

$$V_{air} = V_t - V_{ma}$$

V_{air} = Volume aire a remover (m³).

V_t = Volumen total del secador (m³)

V_{ma} = Volumen de madera (m³)

sustituyendo valores en la expresión (6)

$$V_t = 4\text{m} \times 3\text{m} \times 2,6\text{m} = 31,2\text{m}^3$$

$$V_{ma} = 4\text{m} \times 1,5\text{m} \times 1,4 = 8,4\text{m}^3$$

$$V_{air} = 31,2 \text{ m}^3 - 8,4 \text{ m}^3 = 22,8\text{m}^3$$

Una vez determinado el volumen de aire a remover, se estableció la necesidad de renovar el aire al menos cinco veces. Para ello, se tomaron en cuenta las escotillas de ingreso y salida, cuyas dimensiones (0,3 m × 2 m × 3 m) generan un caudal de 1,8 m³/h.

Expresion (7)

$$Q_{rev} = V_{air} \times N$$

Q_{rev} = Caudal para renovación de aire (m^3/h).

V_{air} = Volumen de aire a renovar (m^3)

N = Número de renovaciones (ren/h)

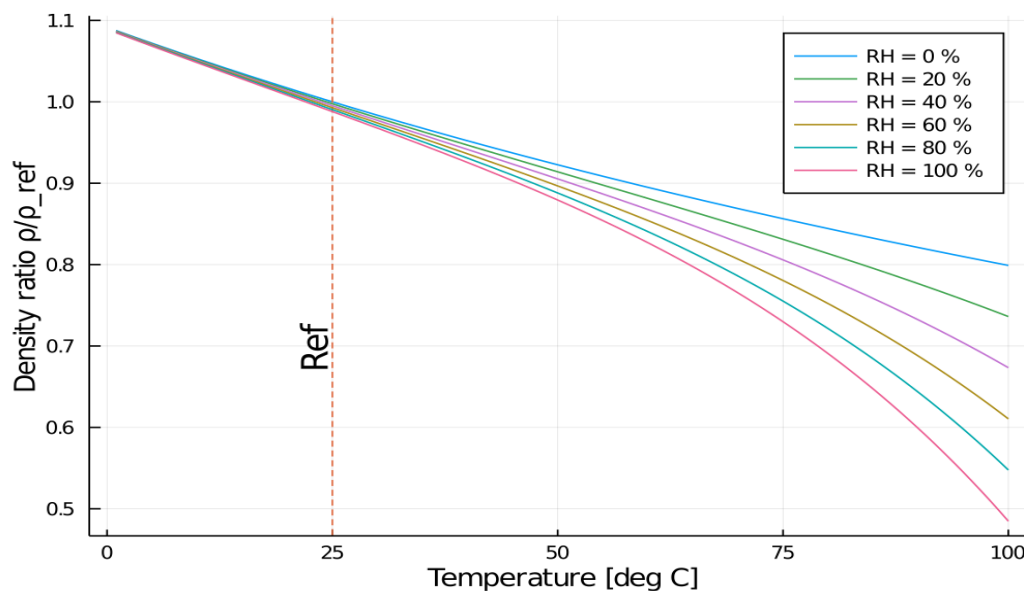
$Q_{rev} = 1,8 m^3 \times 5 \text{ren/hora} = 9 m^3/\text{hora}$

La relación entre las expresiones (6) y (7) evidencia que, para lograr la renovación total de un volumen de aire de $22,8 m^3$, se requiere una tasa de intercambio de $9 m^3/h$. En este sentido, se estima que se necesitan aproximadamente 2,53 horas para efectuar cinco renovaciones completas de dicho volumen.

3.5.5.3. Densidad del Aire. La importancia de conocer la densidad del aire ha sido un factor fundamental para el dimensionamiento de los ventiladores, ya que está directamente relacionada con la cantidad de masa de aire que se mueve. Según la atmósfera estándar internacional (ISA), a una presión de 101,325 kPa y $20^\circ C$, el aire tiene una densidad de aproximadamente $1,204 kg/m^3$. Por lo tanto, se proyectó la densidad del aire dentro del secador a una temperatura operacional de $48^\circ C$, bajo el siguiente análisis:

Figura 18

Densidad del Aire en Función de la Temperatura y Humedad Relativa



Nota. Adaptado de es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Air_density_dependence_on_temperature_and_relative_humidity.svg

Expresión (8)

$$\rho_{sec} = \rho_{aire} \frac{(273+^{\circ}C_1)}{(273+^{\circ}C_2)}$$

ρ_{sec} = Densidad del aire dentro del secador (kg/ m³.)

ρ_{aire} = Densidad del aire estándar (kg/ m³.)

$^{\circ}C_1$ = Temperatura estándar (20°C)

$^{\circ}C_2$ = Temperatura de operación dentro secador (48°C)

$$\rho_{sec} = 1,204 \text{kg/m}^3 \frac{(273+20)}{(273+48)} = 1,09 \text{kg/m}^3$$

El análisis indica que el aire dentro del secador es un 10% menos denso al incrementarse la temperatura operacional de 20°C a 48 °C. Para una mejor comprensión, un ventilador moverá menos masa de aire caliente para la misma velocidad de rotación, dado que el aire caliente es menos denso que el aire frío.

3.5.5.4. Calculo del Caudal de Aire Para el Secador. El transporte de calor desde el colector hacia la madera y la remoción de la humedad dentro del secador hacia el exterior ha requerido el cálculo del caudal y la velocidad del aire, según lo propuesto por Bond, B., Espinoza, O. y Araman, P. (2011), quienes sugieren una velocidad de 1-2 m/s para el secado de madera. Esta información fue fundamental para comprender la dinámica de fluidos y para el dimensionamiento mecánico de los ventiladores axiales.

Expresión (9)

$$Q = A \times V$$

Q = Caudal de aire (m³/h)

A = Superficie (m²)

V = Velocidad del aire (m/s)

$$Q = (3,2\text{m}^2 \times 1,5 \text{ m/s}) \times 3,600\text{s/h}$$

$$Q = 17,280 \text{ m}^3/\text{h}$$

Para el cálculo del caudal de aire requerido, se empleó la superficie determinada en la ecuación (5), aplicada en la ecuación (9), considerando una velocidad del flujo de aire de 1,5 m/s.

3.5.5.5. Cálculo de la Potencia de los Ventiladores. Para el diseño y cálculo mecánico de los ventiladores, fue necesario conocer variables como la velocidad de rotación, el diámetro de las aspas o rodete, la presión total, el caudal, la densidad del aire y la potencia absorbida.

Para una mejor comprensión del concepto, se utilizó información referencial de dos normas internacionales: ISO 5801-96 (E) y la norma UNE 100-230-95. Mediante el uso de un conjunto de ecuaciones denominado "leyes de los ventiladores", fue posible determinar, con buena precisión, las nuevas prestaciones a partir de los ensayos realizados en condiciones normalizadas.

Figura 19

Símbolos y Unidades ISO, 5801-96 (E), UNE 100-230-95

<u>Símbolo</u>	<u>Concepto</u>	<u>Unidad</u>
D_r	Diámetro hélice/rodete	m
L_{wt}	Nivel Potencia total sonora	dB
n	Velocidad rotacional	s^{-1}
P_r	Potencia mecánica suministrada al ventilador	W
P_f	Presión del ventilador	Pa
qv	Caudal de entrada	m^3/s^{-1}
ρ	Densidad	kg/m^{-3}

Nota. Reproducido de, Salvador Scoda. (2013). *Catálogo técnico Manual de ventilación.* Salvador ScodaS.A.

En su aplicación para el secador solar, se tomaron como referencia los parámetros del catálogo técnico de ventilación, bajo la norma UNE 100-230-95. Los valores iniciales

corresponden a un ventilador de 450 mm de diámetro, del cual se conoce un caudal de 5,000 m³/h a una presión de 22 mm c.d.a., que absorbe 480 W de la red y opera a 1,400 rpm.

A) Potencia mecánica

Para el cálculo de la potencia mecánica necesaria, se consideró el aire menos denso de la expresión (8), con un valor de 1,09 kg/m³, dentro de la cámara de secado, debido al incremento de la temperatura operacional.

Expresión (10)

$$P_r = P_{ro} \frac{\rho}{\rho_o}$$

P_r = potencia necesaria (w)

P_{ro} = Potencia referencial (w)

ρ = Densidad del aire dentro secador (kg/ m³)

ρ_o = Densidad del aire referencial (kg/ m³)

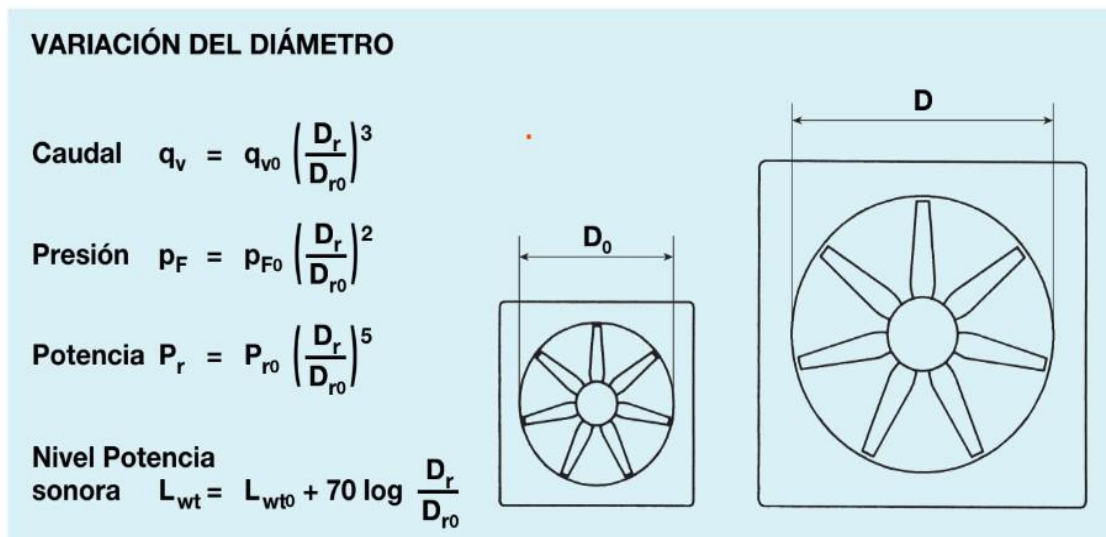
$$P_r = 480 \text{ w} \frac{1,09\text{kg/m}^3}{1,20\text{kg/m}^3} = 436\text{w}$$

B) Caudal del ventilador

Siguiendo los valores iniciales de la norma UNE 100-230-95 sobre ventiladores axiales, se realizaron los cálculos para cubrir la demanda de caudal de aire de 17.280 m³/h, según la expresión (9). Para su aplicación, se utilizó un diámetro de las aspas de 550 mm con el fin de optimizar el espacio disponible para los ventiladores dentro del colector solar.

Figura 20

Símbolos y Unidades ISO, 5801-96 (E), UNE 100-230-95 Uso Para el Cambio de Diámetro



Nota. Reproducido de, Salvador Scoda. (2013). *Catálogo técnico Manual de ventilación.* Salvador ScodaS.A.

Expresión 11

$$Q_v = Q_{v0} \left(\frac{Dr}{D_{r0}} \right)^3$$

Q_v = Caudal de entrada (m³/h)

Q_{v0} = Caudal referencial (m³/h)

Dr = Nuevo valor Diámetro hélice/aspas (mm)

D_{r0} = Diámetro referencial norma UNE (mm)

$$Q_v = 5,000 \text{ m}^3/\text{h} \left(\frac{550\text{mm}}{450\text{mm}} \right)^3 = 9,128 \text{ m}^3/\text{h}$$

El cambio de diámetro del rodete o aspas a 550 mm genera un incremento del 40% en el caudal, alcanzando un valor de 9,128 m³/h. Esto significa que será necesario el doble del caudal para cubrir la demanda de 17,280 m³/h, según la expresión (9).

C) Presión del aire

Para el desarrollo de los nuevos parámetros, inicialmente se calculó la presión total en función de los cambios en la densidad del aire dentro del secador solar, calculado en la siguiente.

Expresión (12)

$$P_F = P_{F0} \left(\frac{D_r}{D_{r0}} \right)^2$$

P_F = Presión del ventilador

P_{F0} = Valor referencial norma UNE (22mm c.d.a.)

D_r = Nuevo valor Diámetro hélice/aspas (mm)

D_{r0} = Diámetro referencial norma UNE (mm)

$$P_F = 22 \text{ mm c.d.a.} \left(\frac{550\text{mm}}{450\text{mm}} \right)^2 = 29,87 \text{ mm c.d.a.}$$

El cambio en el diámetro incrementa la presión total del ventilador, lo que resulta en un aumento de más del 26%, Esto significa que, al incrementarse el caudal, también se incrementa la presión total.

Potencia mecánica para diámetro de aspas 550mm

Expresión 13

$$P_r = P_{ro} \left(\frac{D_r}{D_{ro}} \right)^5$$

P_r = Potencia mecánica suministrada al ventilador (Hp)

P_{ro} = Nuevo valor de potencia (w)

D_r = Nuevo valor Diámetro hélice/aspas (mm)

D_{ro} = Diámetro referencial norma UNE (mm)

$$P_F = 436w \left(\frac{550mm}{450mm} \right)^5 = 1,189w = 1,59Hp$$

La potencia mecánica necesaria para cubrir la demanda de la expresión (11) indica que se deberá considerar el doble del caudal de aire. En consecuencia, se optó por la instalación de dos ventiladores, cada uno equipado con un motor de 1,5 hp, 1400rpm, frecuencia de 60 Hz.

3.5.6. Diseño y Construcción del Secador Solar

3.5.6.1. Diseño CAD. En el proceso de diseño se utilizó el software de modelado tridimensional Solid Works, AutoCAD el cual permitió la generación precisa de planos constructivos, definición de cotas, y el desarrollo de los planos de cimentación, estructura, anclajes y sistema eléctrico del secador solar. El modelado se realizó considerando las dimensiones globales del prototipo, correspondientes a 3 metros de ancho, 4 metros de largo y 2.79 metros de alto (véase Anexo 1).

3.5.6.2. Construcción y Montaje. Durante el proceso de construcción se tomaron en cuenta diversos factores de importancia estratégica. Se realizó una planificación detallada del presupuesto para la construcción y se aplicó la metodología CPM (Critical Path Method) para optimizar los tiempos de ejecución de las actividades programadas. Asimismo, se procedió a la selección y adquisición de materiales adecuados para garantizar la calidad de la estructura.

Tabla 7

Presupuesto de Construcción Secador Solar

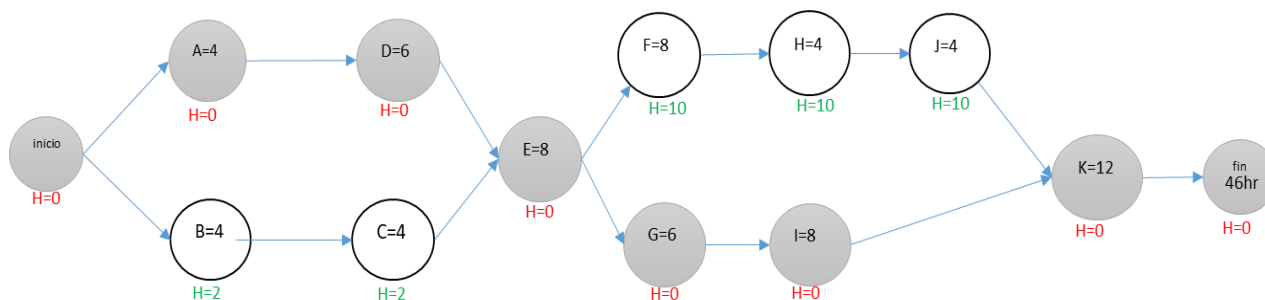
N ^a	DESCRIPCION	Unid	Total (Bs)
1	<u>Materiales</u>		
	Cimiento y piso	Glob	1.245
	Estructura de madera	Glob	524
	Colector solar	Glob	3.387
	Bastidor	Glob	1.542
2	<u>M.O</u>		
	Obra civil	Glob	1.200
	Instalacion electrica	Glob	400
		Total(Bs)	8.298
		Total(\$us)	1.192

Nota. Elaboración propia con base en precios Import Export Rombol- Cobija-Pando

3.5.6.3. Metodología CPM. Se utilizó la técnica de la ruta crítica como técnica de optimización de tiempos, con la finalidad de esquematizar todas las actividades del proyecto, controlar los tiempos de realización y con ello, los costos que representan.

Tabla 8*Diagrama CPM para la Construcción del Secador Solar*

Actividad	Actividad precedente	Duración (hr)
A.-Limpieza y terraplén del terreno	-----.	4
B.-Excavación	.-----.	4
C.-Cimentación de columnas HA	B	6
D.- Piso adoquinado y carpeta	A	4
E.-Construcción y colocación de la estructura de madera	C,D	12
F.- Montaje del colector solar	E	8
G.- Colocado de bastidor de madera	E	6
H.- Montaje de los ventiladores	F	4
I.- Construcción y colocación de puertas y escotillas	G	8
J.- Instalación eléctrica y equipos de medición	H	4
K.- Recubrimiento de plástico Agro film	I,J	12
TOTAL(hr)		72

Nota. Elaboración propia**Figura 21***Ruta crítica de 46hr en las Actividades A, D, E, G, I, K**Nota.* Elaboración propia con base en actividades programadas.

Como se observa en la Tabla 3, el proceso constructivo del secador solar demandó un total de 72 horas, equivalentes a nueve días de trabajo. Para la ejecución de cada una de las actividades definidas, fue necesaria la participación de personal técnico calificado de la zona, conformado por un albañil, un cerrajero y un electricista.

En cuanto a las actividades representadas en la Figura 2, se identificó que las tareas más críticas (A, D, E, G, I y K) requirieron un total de 46 horas, durante las cuales se realizó un seguimiento detallado de los tiempos de ejecución con el fin de asegurar el cumplimiento de los plazos establecidos.

3.5.6.4. Proceso Constructivo. La construcción del secador solar, tanto en su versión de sistema cerrado como en caballete (sistema abierto), se llevó a cabo utilizando el 100 % de los materiales disponibles en el lugar. Se construyó una base de concreto H°A° para la instalación de seis columnas de madera de 4" × 4" × 4 m, las cuales fueron anclados y fijados a la base. Sobre estas columnas se montaron largueros para la unión de las columnas laterales, con el propósito de soportar tres cerchas de 3,10 m × 1 m, destinadas a la cubierta a doble agua, con una inclinación del 10 % a cada lado. Posteriormente, el piso fue adoquinado con ladrillos de adobe y cimentado, en una superficie de 3 m × 4 m y un espesor de 0,15 m (véase Anexo 2)

Se instaló la estructura metálica para el colector solar, utilizando chapa metálica de 1,80 m x 4 m x 1,5 mm, las cuales fueron fijadas y ancladas a los postes y a la base de la cercha. Se aplicó pintura anticorrosiva de color negro mate. Seguidamente, se fijaron los bastidores de madera de 3" x 2" en el armazón de la cubierta y en las paredes laterales. Posteriormente, fueron instalados bastidores de madera de 2" x 2" en las puertas y escotillas para facilitar el intercambio de aire seco y húmedo. (véase Anexo 2)

Para garantizar la adecuada circulación del aire, se instalaron dos ventiladores axiales con un diámetro de aspas 55 cm, cada uno acoplado a un motor de 1,5 HP, 1440 rpm. Estos ventiladores fueron fijados a la estructura del colector y a la cubierta.

Finalmente, toda la estructura fue recubierta con plástico invernadero en las cubiertas, paredes laterales, puertas y escotillas. Para su instalación, se empleó la técnica de tensado con cemento de contacto sobre toda la superficie de madera, complementada con clavos de sujeción con tapa plástica de 1". (véase Anexo 2)

Paralelamente, se construyó un sistema de secado abierto al aire libre, llevado a cabo por los socios de ACAMPE, siguiendo el modelo tradicional de caballete. Este sistema se estructura sobre dos columnas de madera de 4" × 4", las cuales fueron enterradas en el suelo y unidas por una viga de 2" × 4" × 4 m, situada a una altura de 2 m. La estructura resultante conforma un arco rectangular de 4 m × 2 m, sobre el cual se dispusieron las tablas para el secado tradicional de la madera. (véase Anexo 3)

3.5.7. Socialización del Proyecto

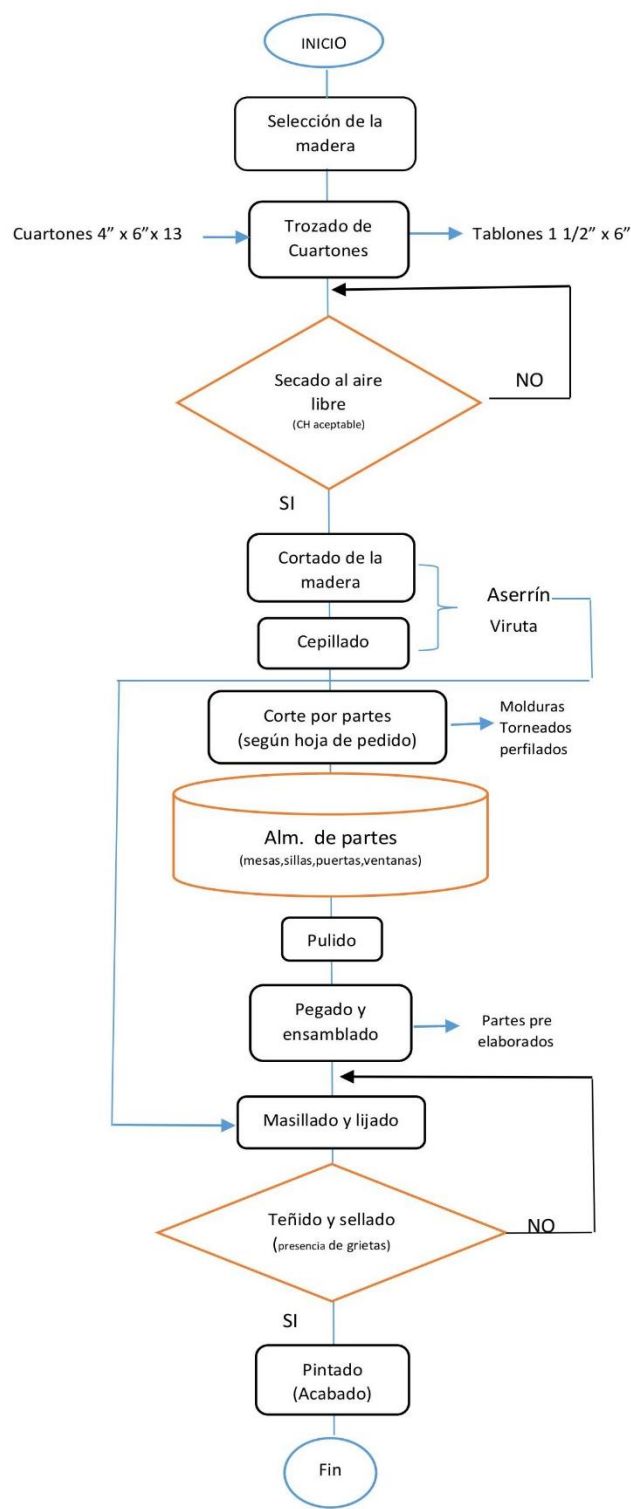
La reunión se llevó a cabo en la sede de ACAMPE con la presencia de su directiva y socios activos. El objetivo fue presentar una alternativa al problema de secado, así como analizar la cadena productiva en conjunto con la búsqueda de acuerdos y mecanismos para su desarrollo, registrando las observaciones y percepciones sobre el tema de investigación (ver Anexo 3)

3.5.8. Flujograma del Proceso de Producción de Muebles

El proceso de producción de muebles, que abarca la fabricación de sillas, mesas, estantes, roperos, catres, así como la creación de estructuras, cubiertas, marcos, puertas y ventanas, se define a través de una serie de etapas específicas que comprenden la selección de materiales, secado, fabricación y el ensamblaje de los componentes. Estos definieron sus etapas de la siguiente manera:

Figura 22

Flujograma del Proceso de Fabricación de Muebles ACAMPE



Nota. Elaboración propia con base en información primaria socios Acampe.

Tabla 9*Descripción del Proceso de Fabricación de Productos Acabados*

<u>N^a</u>	<u>DESCRIPCION</u>	<u>IMAGEN</u>
1	<p>Selección de la madera: El carpintero, selecciona la madera de acuerdo al tipo o especie, el cual es adquirido en vigas o cuarterones a proveedores autorizados. en esta parte solo realizan el control de dimensiones, cubicación y control visual de las condiciones de la madera pero sin la determinación de los parámetros de humedad.</p>	
2	<p>Trozado de cuarterones: Se trata de trozos de madera de forma variada y de dimensiones que van desde varias Pulgadas 1", 1 1/2", 2". Se generan fundamentalmente según la hoja de pedido relacionados con el mueble a fabricar.</p>	
3	<p>Secado al aire libre(caballete). El operario extiende la madera trozada ,en forma de tijera apoyados en un arco de soporte el cual se realiza directamente en el patio más amplio .por el tiempo aproximado de una semana (8 a 12 días) antes de pasar al siguiente proceso</p>	
4	<p>Cepillado: A través de una máquina cepilladora , el carpintero comienza a quitar la irregularidad y emparejar la superficie de la madera considerando el espesor necesario.</p>	

Nota. Elaboración propia con base en información primaria ACAMPE

Tabla 4 (Continuación)*Descripción del Proceso de Fabricación de Productos Acabados*

<u>N^a</u>	<u>DESCRIPCION</u>	<u>IMAGEN</u>
5	Corte por partes: En esta etapa el maestro carpintero habilita la madera y comienza a realizar los cortes respectivos respecto al diseño pre-establecido	
6	Pulido. Luego de la operación anterior, el operario comienza a pulir la madera a través de lijas con la finalidad de ir eliminando asperezas o imperfecciones.	
7	Pegado y ensamblado. En esta operación el operario comienza a unir algunas piezas con pegamento y clavos, y así ir armando poco a poco la estructura del producto	
8	Masillado y lijado. En esta operación el Carpintero pintor, comienza a masillar o curar algunas imperfecciones en la madera utilizando una mezcla de aserrín y cola, con la finalidad de mantenerlo liso finalmente lijar todas las superficies de la madera.	

Nota. Elaboración propia con base en información primaria ACAMPE

Tabla 4 (Continuación)

Descripción del Proceso de Fabricación de Productos Acabados

<u>N^a</u>	<u>DESCRIPCION</u>	<u>IMAGEN</u>
9	Teñido y sellado. Este primer teñido consiste principalmente en aplicar un preservante para inhibir específicamente la propagación de organismos tales como: Moho, Hongos, Termitas, Polillas y Larvas	
10	Pintado y acabado. En esta actividad el maestro pintor comienza a pintar la madera aplicando varias capas muy finas de laca sobre la superficie de madera. El resultado es una superficie de apariencia muy lisa, con un gran brillo y muy suave al tacto .Posteriormente el pintor da el acabado final, con una pistola de pintar.	

Nota. Elaboración propia con base en información primaria ACAMPE

3.5.9. Selección y Preparación de la Muestra

Para el secador solar, se seleccionaron las muestras considerando las piezas de madera con mayor contenido de humedad. Cada tabla fue dimensionada con una longitud de 76 cm y claramente identificada como muestra testigo, fueron seleccionados 5 piezas numerados por los acrónimos M1 a M12 para facilitar su seguimiento por lote producido. Bajo referencia de la a norma NB 107001:2010” secado artificial de la madera” estas muestras fueron ubicadas a 50cm de cada extremo equidistante uno con el otro, de modo que el contenido de humedad pudiera registrarse con facilidad.

Para el secado aire libre las tablas fueron apiladas en caballete, dispuestas de manera cruzada e inclinada sobre la estructura de soporte. Antes de iniciar el proceso, se verificó que las muestras no presentaran defectos visibles, tales como grietas, presencia de hongos o nudos sueltos. Asimismo, la madera se colocó sobre una base de vigas a 5 cm del suelo, con el propósito de evitar el contacto directo con la tierra, de esta manera, prevenir la infestación por hongos e insectos.

Figura 23

Acomodo e Identificación de las Muestras Testigo



Nota. Elaboración propia

3.5.10. Estimación de Tiempos de Secado

Se estimó el tiempo de secado utilizando un modelo termodinámico basado en la ecuación de transferencia de energía, considerando que la energía térmica proporcionada por la

radiación solar y el flujo de aire dentro del secador solar se emplea principalmente en la evaporación del agua contenida en la madera. En este proceso, tanto la radiación solar como el aire caliente actúan como fuentes principales de energía para la eliminación de la humedad.

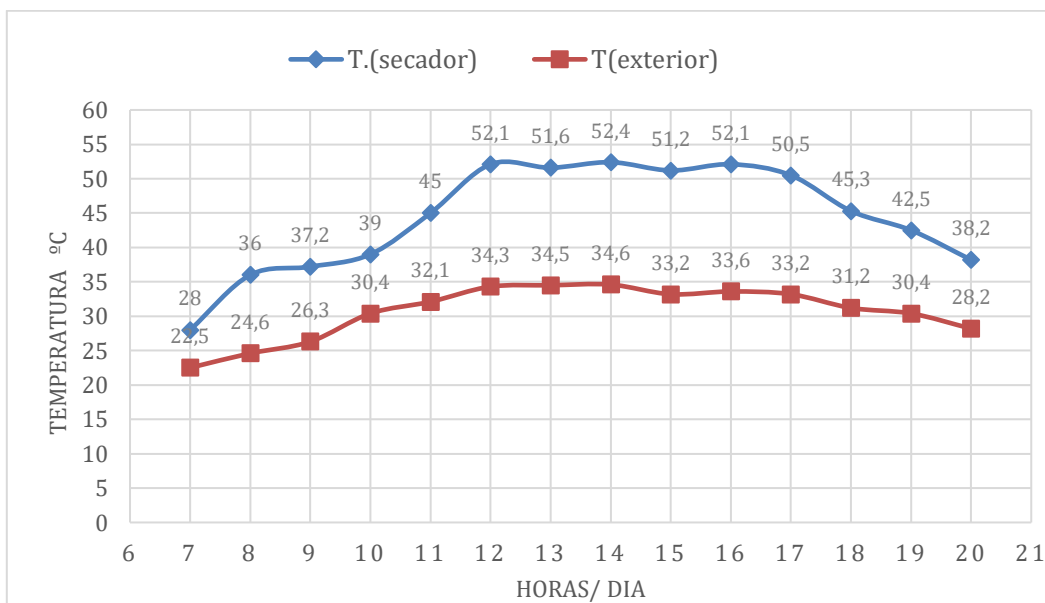
La relación entre la energía total requerida para evaporar el contenido de agua de la madera y la energía solar disponible por día, permite estimar el tiempo teórico de secado, según las expresiones (2) y (4):

$$\text{Tiempo de secado} = \frac{\text{Energía necesaria}}{\text{Energía disponible por día}} = \frac{1,17 \times 10^9 \text{J}}{57,15 \times 10^6 \text{J}} = 21 \text{ días}$$

El tiempo estimado fue de 21 días, considerando una radiación solar efectiva media de 7 horas por día, la necesidad energética descrita en la expresión (2), un flujo de aire de 2 m/s y una renovación de aire cada 2,53 horas. No obstante, las variaciones en la radiación solar y la humedad pueden prolongar este proceso, alcanzando hasta los 50 días, como indica Castro et al., 2008; Bond et al. (2011).

3.5.11. Pruebas de Funcionamiento

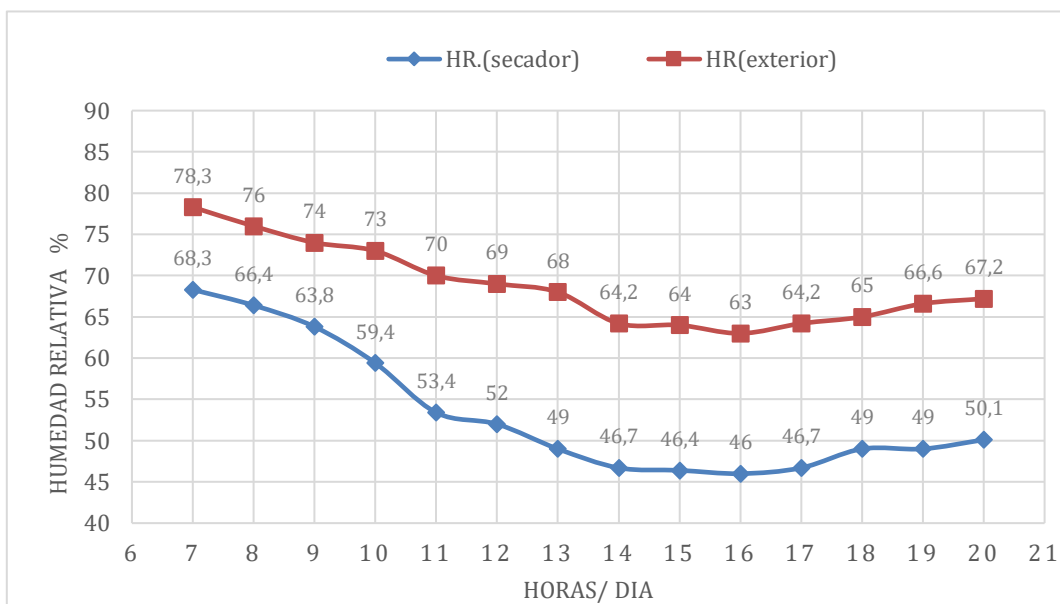
Se realizaron prueba de funcionamiento sin producto (en vacío) durante 7 días, como sugieren las investigaciones de Fuentes-Salinas, Luna-Sánchez, Osorio-Suárez y Corona-Islas (2003). El objetivo de estas pruebas fue fundamental para determinar la influencia de las condiciones climáticas sobre el desempeño de ambos métodos de secado.

Figura 24*Pruebas de funcionamiento 7 dias*

Nota. Elaboración propia, Variación promedio de la Temperatura en secador solar del 12 al 18 de agosto 2022

Los resultados obtenidos indicaron que la temperatura máxima alcanzó los 52,4 °C en el interior del secador, mientras que al aire libre se registró una temperatura de 34,5 °C, lo que representa una diferencia de 17,9 °C. Además, el índice de insolación efectivo fue de 11,1 hr/día.

Otras variables de control, como la humedad relativa y la velocidad del aire, fueron relevantes para comprender la diferencia psicométrica y la capacidad del aire para absorber humedad hasta su saturación, permitiendo que esta sea expulsada o removida mediante el flujo de aire disponible.

Figura 25*Pruebas de Funcionamiento 7 días*

Nota. Elaboración propia Humedad relativa promedio diario al interior y exterior del secador solar del 12 al 18 de agosto 2022.

Los valores de humedad relativa registrados tanto dentro del secador como en el ambiente exterior se presentan en el Gráfico 1. Se observó una humedad relativa promedio de 43,4 % dentro del secador, acompañada de un flujo de aire de 3,6 m/s. En contraste, en el exterior del secador, bajo las mismas condiciones, se registró una humedad relativa del 69 % y un flujo de aire de 0,38 m/s.

Los datos colectados fueron favorables, mostrando un (ΔH), 25,6% entre los dos sistemas, abierto y cerrado. Esto significa que el aire dentro del secador tiene una capacidad de contener agua de hasta un 40% de su volumen antes de alcanzar la saturación, durante el período comprendido entre las 11:00 a.m. y las 5:00 p.m.

3.5.12. Carga de las Pilas de Madera

El acopio de la madera aserrada se realizó desde los talleres de ACAMPE hasta el lugar de estudio, con dimensiones de 6” de ancho y 1,5” de espesor. Posteriormente, con el objetivo de garantizar un flujo homogéneo del caudal de aire, se establecieron directrices para la selección de la madera y apilamiento utilizado en los secadores convencionales según norma NB 107001:2010, dichas indicaciones se detallan de la siguiente manera:

1. El apilado del paquete se debe realizar de forma horizontal con maderas de un solo espesor y ancho.
2. Todas las filas de tablas deberán estar uniformes formando un cubo rectangular.
3. Colocar espaciadores de madera de 3cm x 3cm x 5 ft de longitud, libre de hongos y deformaciones con una distancia entre separadores de 50 cm, distribuidos uniformemente en todas las filas.
4. No se deben mezclar las especies de madera ya que cada especie responde distinto a los diversos programas de secado.
5. En la medida de lo posible, la humedad inicial de la madera debe ser homogénea para garantizar un secado uniforme. Para ello, es fundamental mantener una trazabilidad desde el proceso de corte o dimensionamiento, evitando la mezcla de piezas aserradas en momentos significativamente diferentes durante el acopio.

Tabla 10*Características de los Listones Separadores*

Espesor de las tablas (cm)	Espesor de los separadores(cm)	Distancia entre separadores(cm)
< 2,0	2,0	30,0 - 40,0
2,0 - 2,5	2,5	40,0 - 50,0
4,0 - 5,0	3,0	50,0 - 60,0
5,0 - 6,5	3,5	70,0 – 80,0
6,5 - 8,0	4,0	90,0
> 8,0	4,5	100,0

Nota. Reproducido de Norma Boliviana NB 107001:2010, Universidad Amazónica de Pando (U.A.P) 2018

Como parte de la metodología de prueba, se aplicó el método de apilamiento horizontal de las tablas de madera aserrada, siguiendo lo establecido en la norma NB 107001:2010. Esta norma determina acciones específicas para el acomodo de las piezas, disponiéndolas en capas con una separación de 3 cm entre cada una hasta completar la pila de secado. Según Solís et al. (2003), esta disposición contribuye a optimizar el proceso de secado.

En este contexto, se cargaron en el secador solar un total de 110 piezas de madera con dimensiones de 1.5" × 6" × 13' (3.8 × 15 × 396 cm), distribuidas en 11 capas de 10 piezas cada una, alcanzando un volumen total de 1.320 pies/tab (3,1 m³), lo que representó el 50 % de la capacidad disponible del secador.

Figura 26*Apilado de Madera Método Horizontal*

Nota: Elaboración propia

Para el secado al aire libre o secado natural se utilizaron madera acerrada con dimensiones de $1.5'' \times 6'' \times 13'$ ($3.8 \times 15 \times 396$ cm), se siguió el procedimiento de la Norma NB 107002:2010 “Procedimiento para el secado natural de madera verde” apilado tipo caballete (cruzada e inclinada sobre un caballete), el cual recomienda evitar la acción directa del sol y la lluvia con cubiertas o techos que sobre salgan las pilas de madera y colocó la madera sobre una base de pilotes de 5cm del piso a fin de evitar el contacto directo con el suelo esto evitara la infestación de hongos e insectos.

Figura 27*Apilado de Madera Método Tradicional*

Nota: Elaboración propia

3.5.13. Curvas de Secado

La segunda fase del estudio consistió en la elaboración de las curvas de secado para ambos sistemas: secado al aire libre (sistema abierto) y secador solar tipo invernadero (sistema cerrado). Esta etapa tuvo como objetivo documentar la evolución del contenido de humedad en la madera a lo largo del tiempo, bajo condiciones controladas y naturales.

Para este propósito, se trabajó con tres lotes de producción secuenciales, cada uno compuesto por 3 m³ de madera aserrada de la especie marfil, con un espesor uniforme de 1,5 pulgadas. La madera fue seleccionada del mismo origen forestal para asegurar condiciones iniciales homogéneas en cuanto a contenido de humedad, dimensiones y estado físico.

La determinación del contenido de humedad se registró utilizando dos métodos eléctrico y gravimétrico

El **método eléctrico** se aplicó mediante un medidor digital KKcare-4, utilizado para el monitoreo diario durante todo el proceso de secado. Este equipo permite determinar el contenido de humedad de la madera a partir de la resistencia eléctrica interna, ofreciendo un control preciso y continuo de la evolución del secado.

El **método gravimétrico** de referencia, mediante secado en estufa AKITA a $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, conforme a lo indicado en la norma NB 107001:2010” secado artificial de la madera” utilizado para verificar la humedad final y validar los resultados obtenidos.

En cada lote se seleccionaron probetas representativas ubicadas estratégicamente en el centro, los bordes y, ubicadas a 50cm de cada extremo equidistante uno con el otro, de modo que el contenido de humedad pudiera registrarse con facilidad.

Simultáneamente, se midieron variables ambientales como temperatura y humedad relativa, tanto dentro como fuera del sistema cerrado, mediante el uso de psicrómetro analógico y data logger, este último configurado para registrar datos cada 20 minutos, garantizando un seguimiento continuo y preciso.

Durante la producción del lote 1, se monitorearon las condiciones ambientales a lo largo de todo el proceso. Se optará por abrir las escotillas de ventilación cada dos horas, entre las 8:00 a.m. y el atardecer, para facilitar el intercambio de aire húmedo por aire seco. Sin embargo, este manejo inicial reveló limitaciones en cuanto a eficiencia operativa.

En los lotes 2 y 3, se realizaron mejoras en la operación del sistema con el objetivo de optimizar el proceso. Las escotillas se abrirán únicamente durante (2 horas) y solo cuando se alcanzó la temperatura operativa entre 40 y 41 °C, acompañada de una humedad relativa superior al 80%, justo antes del punto de saturación

De manera simultánea para el sistema de secado al aire libre. se midieron variables ambientales como temperatura y humedad relativa mediante el uso de data logger.

Los datos recolectados fueron organizados en tablas de registro y procesados mediante hojas de cálculo digitales para la construcción de curvas de secado, que representan gráficamente la disminución del contenido de humedad en función del tiempo. Estas curvas constituyen un insumo técnico esencial para el análisis comparativo de los dos sistemas lo que permitió evaluar variables post secado: estabilidad dimensional y el porcentaje de defectos en la madera.

3.5.14. Evaluación de la Calidad Final de la Madera

Se generaron criterios de evaluación de la calidad final de la madera secada en ambos sistemas (secador solar tipo invernadero y secado al aire libre) orientado a identificar y cuantificar los defectos estructurales y dimensionales generados durante el proceso de secado, así como establecer la estabilidad del material resultante.

a) Criterios de evaluación

Los parámetros evaluados se agruparon en dos grandes categorías: según criterios establecidos por la norma NB 107001:2010 “Anexo H, defectos originados por secado”

Defectos físicos visibles: tales como rajaduras, grietas internas, torceduras, arqueamientos, alabeos, colapsos y deformaciones superficiales. Estos defectos se identificaron mediante inspección visual.

Estabilidad dimensional: se midió mediante el análisis comparativo de las dimensiones de las probetas (ancho, espesor) antes y después del proceso de secado. Se utilizó un calibrador digital de alta precisión y un flexómetro metálico para la medición de dimensiones mayores, con una precisión mínima de ± 0.02 mm.

b) Proceso de evaluación

Para cada lote secado, se seleccionaron las 5 muestras representativas extraídas de diferentes posiciones dentro de las pilas (centro, extremos), con el fin de detectar variaciones internas atribuibles a la dinámica del secado.

Cada probeta fue etiquetada y registrada con los siguientes datos:

Dimensiones iniciales y finales (cm y mm)

Ubicación dentro de la pila de secado

Método de secado (abierto o cerrado)

Observación cualitativa de defectos (tipo, gravedad y localización)

Contenido final de humedad (medido con medidor digital KKcare, 4).

3.6. Técnicas de Medición y Recolección de Datos

El presente estudio empleó un conjunto de técnicas de recolección y análisis de datos orientadas a evaluar de manera rigurosa el comportamiento del secado de madera aserrada bajo dos condiciones experimentales: físicos, climáticos y de calidad estructural, con el fin de establecer diferencias significativas entre ambos sistemas:

3.6.1. Medición del Contenido de Humedad

Para el seguimiento del contenido de humedad, variable crítica en el proceso de secado, se utilizaron dos metodologías:

Método gravimétrico NB 107001:2010, Este procedimiento consistió en la extracción de 2 muestras pequeñas (probetas) representativas de las muestras testigo realizado a cada lote de madera aserrada, con la finalidad de determinar el peso calculado del testigo y la humedad inicial utilizando estufa de laboratorio a una temperatura controlada de 103 ± 2 °C, hasta alcanzar peso constante.

Medidor electrónico de humedad **KKcare, 4**: Se empleó este equipo portátil para obtener mediciones rápidas, no destructivas y en tiempo real del contenido de humedad de las 5 muestras testigo de cada lote durante las distintas etapas del proceso de secado. Su aplicación fue fundamental para la construcción de curvas de secado y para el monitoreo diario sin alterar las piezas de madera.

3.6.2. Monitoreo de Variables Ambientales

Para comprender el entorno climático de secado y su influencia en la dinámica de pérdida de humedad, se realizó un monitoreo continuo de variables ambientales mediante los siguientes instrumentos:

Psicrómetro de bulbo seco y húmedo: Se utilizó para medir la humedad relativa en el interior y exterior del secador solar, así como en el ambiente donde se desarrolló el secado al aire libre.

Data Logger (registrador de datos): Este dispositivo permitió registrar la temperatura interna del secador solar cada 20 minutos, generando una base de datos precisa para la caracterización térmica del sistema cerrado.

Anemómetro digital: En el caso del secador solar y al aire libre, se utilizó para medir la velocidad del viento y su efecto sobre la tasa de evaporación de humedad superficial.

3.6.3. Observación Directa Estructurada de la Calidad de Madera

Se implementó un formulario para registrar de manera estructurada los principales defectos ocasionados por el secado.

Rajaduras en los extremos, asociadas a secado superficial acelerado.

Grietas internas, relacionadas con características anatómicas de la madera, tales como anillos de crecimiento irregulares o presencia de médula.

Deformaciones por tensiones internas, tales como alabeos, encorvamientos o torsiones, que resultan de una liberación no uniforme de la humedad interna.

Cada defecto fue cuantificado porcentualmente respecto al total de piezas procesadas, permitiendo comparar la incidencia de imperfecciones entre los dos métodos de secado.

3.6.4. Estabilidad Dimensional

Se evaluaron las variaciones dimensionales en las piezas de las muestras testigos, a fin de verificar cambios en estabilidad dimensional (espesor o ancho por pérdida de humedad para ello se utilizaron:

Calibrador digital, para mediciones precisas del espesor, ancho y largo de las probetas. Las mediciones se realizaron en dos momentos clave: antes y después del secado, lo que permitió determinar si el secado afectó la forma y estabilidad del material.

3.6.5. Calculo de Aprovechamiento

Finalizado el proceso, se procedió a la clasificación de las piezas secadas. Se consideraron como piezas aprovechables aquellas que no presentaron defectos críticos o deformaciones severas que impidan su uso comercial. El aprovechamiento neto se expresó como el porcentaje de piezas útiles respecto al total procesado, proporcionando datos relacionados a la eficiencia productiva para los dos sistemas de secado (tipo invernadero y aire libre).

3.6.6. Registro Fotográfico

Se mantuvo un registro fotográfico continuo de todas las etapas del experimento: construcción del secador, Este registro fue complementado con formularios de campo final. (Ver anexo 4)

3.7. Operacionalización de Variables

Se estructuró una matriz de variables para garantizar la coherencia metodológica y la validez de los resultados, bajo parámetros objetivos que orientan la reproducibilidad del presente experimento y la interpretación precisa de los hallazgos.

Tabla 11

Matriz de Variables

<u>Variable</u>	<u>Tipo de variable</u>	<u>Dimensiones</u>	<u>Indicadores</u>	<u>Técnicas de recolección</u>	<u>Instrumentos de medición</u>	<u>Escala de medición</u>
Tipo de sistema de secado	Independiente	Método de secado	Modalidad del sistema (invernadero / aire libre)	Observación estructurada	Ficha técnica, registro fotográfico	Nominal
		Condiciones ambientales	Temperatura (°C), humedad relativa (%)	Medición cada 1hr. durante todo el proceso	Psicrómetro, Data logger	Cuantitativa continua
Contenido de humedad final	Dependiente	Reducción de humedad	Porcentaje de humedad final en las muestras	Medición técnica directa	Estufa de secado (método gravimétrico), Medidor electrónico de humedad	Porcentaje (%)
Defectos estructurales de la madera	Dependiente	Tipo de defecto	Rajaduras- Grietas internas- Deformaciones	Inspección visual, muestreo técnico	Inspección visual, Registro fotográfico, Calibrador digital	Porcentaje (%)
Aprovechamiento volumétrico	Dependiente	Rendimiento útil	Volumen de piezas aprovechables (sin defectos)	Medición comparativa antes y después del secado	Flexómetro, Registro de volumen útil	Metros cúbicos, Porcentaje (%)
Estabilidad dimensional	Dependiente	Cambio dimensional	Variación en espesor, ancho y espesor después del secado	Medición comparativa antes y después del secado	Calibrador digital, Flexómetro	Milímetros (mm)
Tiempo de secado	Dependiente	Duración del proceso	Días calendario hasta alcanzar humedad < 18%	Registro sistemático diario	Cronómetro, bitácora técnica	Tiempo (días)
Costo operativo	Dependiente	Relación costo-volumen	Costo operativo por metro cúbico	Mano de obra, energía	análisis de costos operativos	Bolivianos (Bs/m ³)

Nota: Elaboración propia

3.8. Métodos y Análisis de Datos

El análisis de los datos fue desarrollado bajo un enfoque cuantitativo, con el objetivo de comparar el comportamiento físico y dimensional de la madera en los dos sistemas de secado. Los datos fueron organizados y procesados en hojas de cálculo (Excel) y (SPSS), Para validar si el tipo de sistema influye en los resultados:

Tabla 12

Matriz Estadística de Variables

<u>Variable Dependiente</u>	<u>Prueba Estadística</u>	<u>Diferencia esperada</u>
Tiempo de secado	T de Student y correlacion de <i>Pearson</i>	El tipo de sistema secador solar reduce significativamente el tiempo de secado.
Humedad final (%)	T de Student (muestras independientes).	El sistema de invernadero logra menor humedad final en menos tiempo.
Aprovechamiento volumetrico	Graficos(Descriptivos)	Mayor % de madera utilizable en el secador solar.
Defectos físicos (%)	Prueba de proporciones o Chi-cuadrado	Menor frecuencia de defectos en el secado solar tipo invernadero.
Costo operativo	Tablas (Descriptivo)	Diferencias en costo por m ³ de secado

Nota: elaboración propia

A) Tiempo de secado (cerrado/invernadero vs. abierto/libre)

Método de análisis: Esta variable se trató como un factor categórico binario, utilizado para agrupar los datos experimentales en dos condiciones diferenciadas. Se aplicaron pruebas de comparación de grupos (T de Student) para muestras independientes para identificar diferencias estadísticamente significativas bajo ambas condiciones de secado. Adicionalmente se aplicó el análisis de *Pearson* grado de correlación estadísticamente significativa en ambos métodos de secado.

B) Contenido de humedad (%)

Método de análisis: Se realizaron mediciones contenido de humedad inicial, y final de las probetas, mediante el método gravimétrico en estufa según la norma vigente NB 107001:2010.

$$CH (\%) = \frac{Wh - Ws}{Ws} \times 100$$

CH : Humedad de la madera expresada como un porcentaje de su peso anhidro.

Wh : Peso de la madera en estado húmedo o peso inicial.

Ws : Peso de la madera en estado anhidro; peso final o constante.

De igual manera se realizó el seguimiento del contenido de humedad de secado de las muestras du testigo mediante un determinador electrónico (METER EMT01). durante todo el proceso.

Se aplicaron análisis de tendencias mediante gráficos de curvas de secado (contenido de humedad vs. tiempo) y tasa de secado diario (%/día). La comparación entre sistemas se realizó con pruebas (T de Student) para muestras independientes, para identificar diferencias estadísticamente significativas.

C) Aprovechamiento volumétrico (%)

Método de análisis: Se calculó como la relación entre el volumen de madera sin defectos estructurales severos y el volumen inicial total procesado. Se utilizó la fórmula:

$$\% = \frac{\text{Volumen Util final}}{\text{Volumen total incial}} \times 100$$

Se aplicó estadística descriptiva (media, desviación estándar) para comparar ambos sistemas de secado. Se complementó con representación gráfica de barras y pastel para visualizar diferencias o variaciones en ancho, espesor con relación a la estabilidad dimensional.

D) Defectos físicos de calidad (%)

Método de análisis: Los defectos fueron clasificados en tres categorías: rajaduras (extremos), grietas internas y deformaciones estructurales. Se aplicó inspección visual bajo criterios técnicos de norma NB 107001:2010. “Anexo H defectos originados por secado”

Se calculó la incidencia de cada tipo de defecto como porcentaje del total de piezas analizadas:

$$\% = \frac{\text{Numero de piezas con defecto}}{\text{Numero total de piezas}} \times 100$$

El análisis estadístico incluye distribución de frecuencias, gráficos de sectores (pastel) y prueba estadística de (Chi-cuadrado) para determinar si hubo relación significativa entre el tipo de sistema de secado y la aparición de defectos.

E) Costos operativos (Bs/m³)

Método de análisis: Se realizó un análisis económico del proceso de secado, desglosando los costos directos (energía, mano de obra, materiales). Se calculó el costo unitario por metro cúbico secado bajo ambos sistemas y su relación costo-beneficio.

$$(RCB) = \frac{\text{Beneficio neto (Bs)}}{\text{Costo operativo(Bs)}}$$

Se realizó el análisis comparativo entre ambos métodos (invernadero vs. aire libre), acompañado de tablas para ilustrar la participación de cada componente de costo, y cómo esta diferencia se relaciona con la eficiencia del proceso.

Capítulo 4.

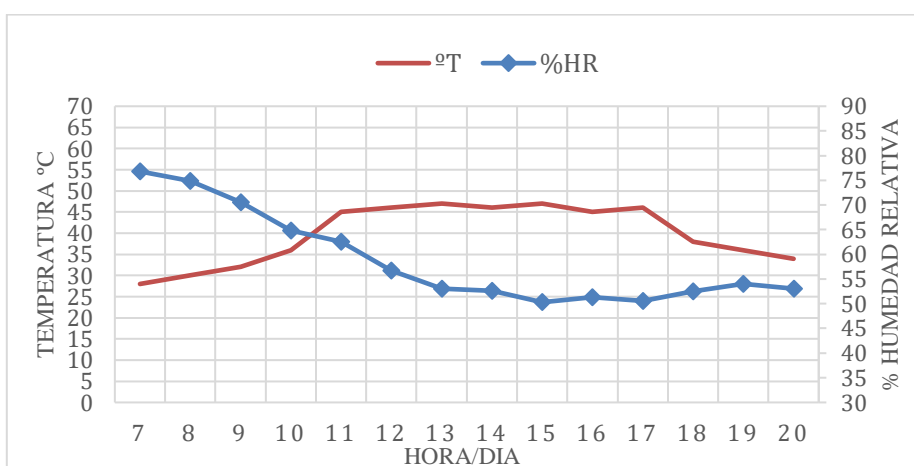
Resultados

4.1. Análisis e Interpretación de Resultados

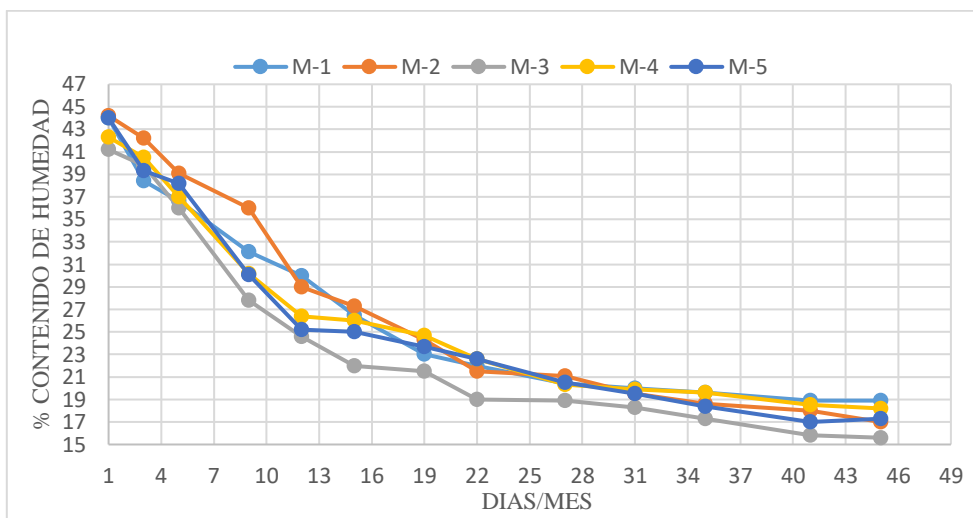
4.1.1. Secado Lote -1

Figura 28

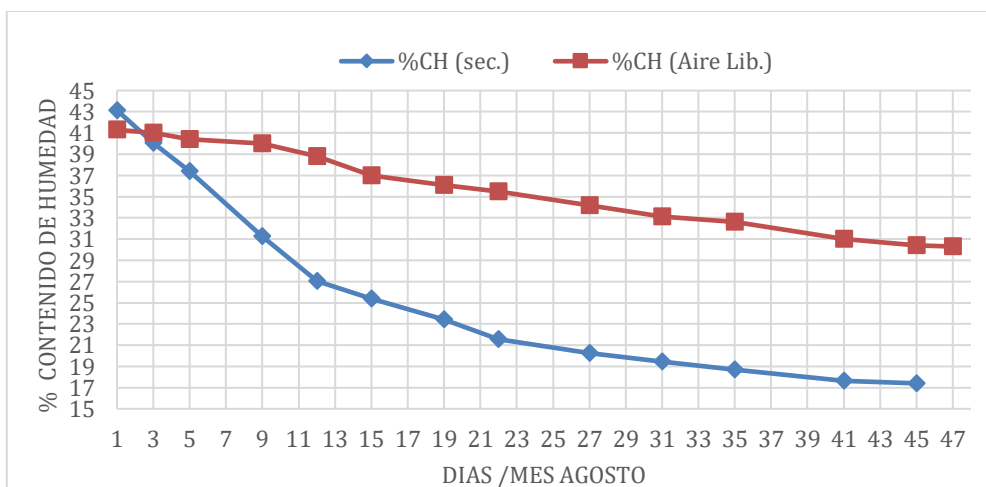
Condiciones Ambientales Dentro el Secador Solar-Lote 1 Horas del Día



Nota. Elaboración propia, Temperatura media de 41,3°C y humedad relativa media del 27,2%, agosto 2022

Figura 29*Curvas de Secado- Lote 1*

Nota. Elaboración propia, pérdida de humedad de 41,5% a 18,3% a partir de las muestras testigo en un periodo de 46 días, secador solar agosto-septiembre 2022.

Figura 30*Curvas de Secado Solar vs Aire Libre –Lote 1*

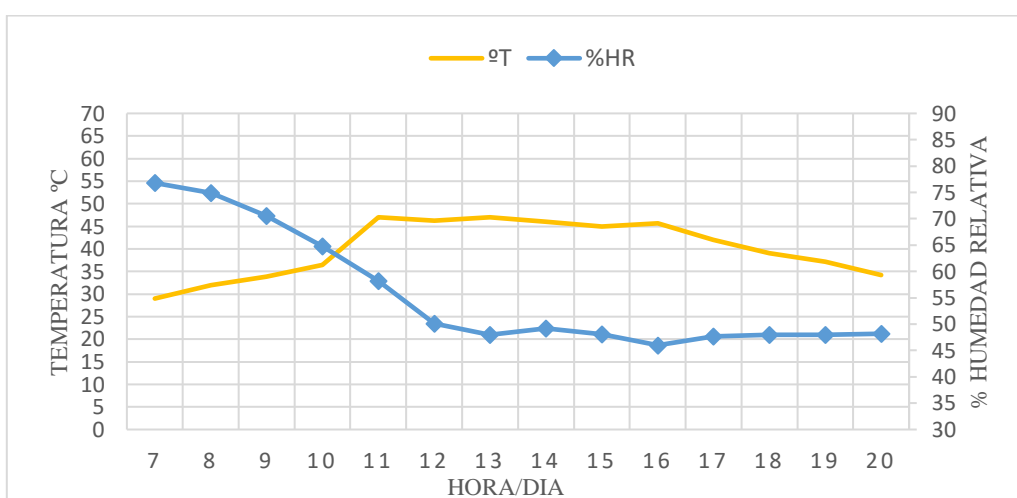
Nota. Elaboración propia, pérdida de humedad de la madera en ambos sistemas en un periodo de 46 días, tasa diaria de 1,14% (secador solar) 0,44%(aire libre).

La Figura 7, indica que a partir del día 7 se empieza a evidenciar una ventaja del secado solar, logrando un contenido de humedad final de 18,3% dentro del secador, en comparación con el secado al aire libre que redujo de 41,3% a 32,6 %.

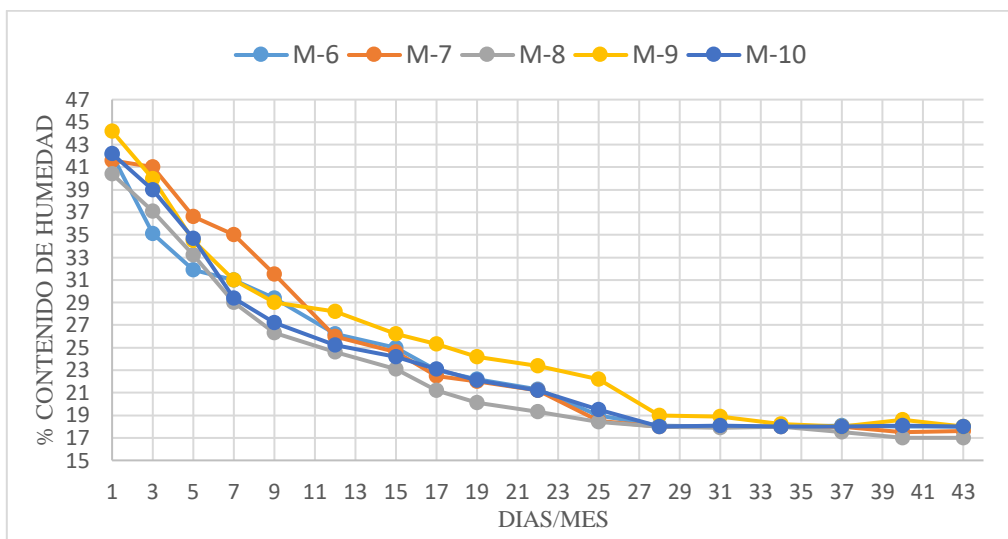
4.1.2. Secado Lote -2

Figura 31

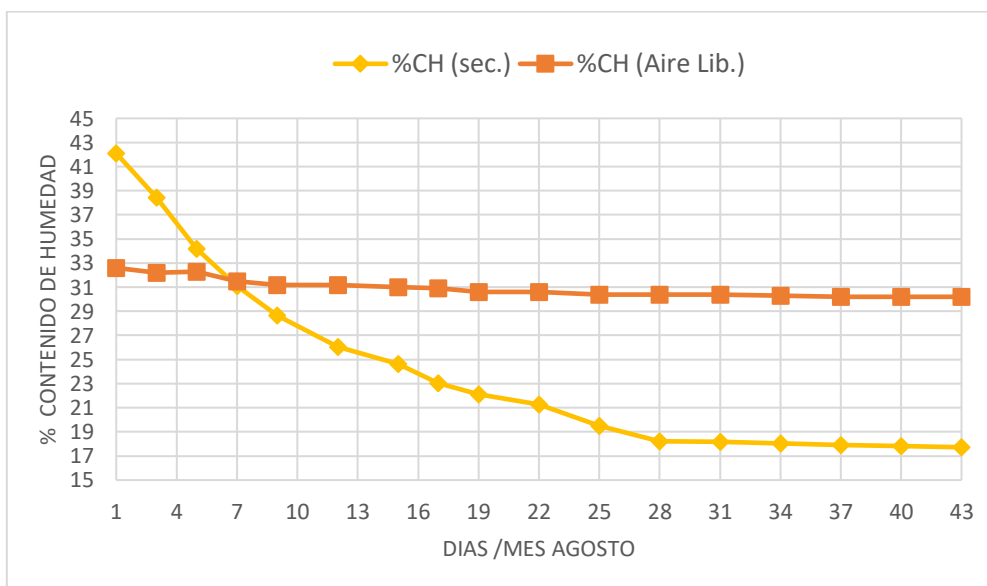
Condiciones Ambientales Dentro el Secador Solar-Lote2, Horas al Dia



Nota. Elaboración propia, Temperatura media de 43,1°C y humedad relativa media del 22,9%, septiembre –octubre 2022.

Figura 32*Curvas de Secado-Lote 2*

Nota. Elaboración propia, pérdida de humedad de 42,1% a 18,2% a partir de las muestras testigo en un periodo de 42 días, secador solar octubre-noviembre 2022

Figura 33*Curvas de Secado Solar vs Aire Libre- Lote 2*

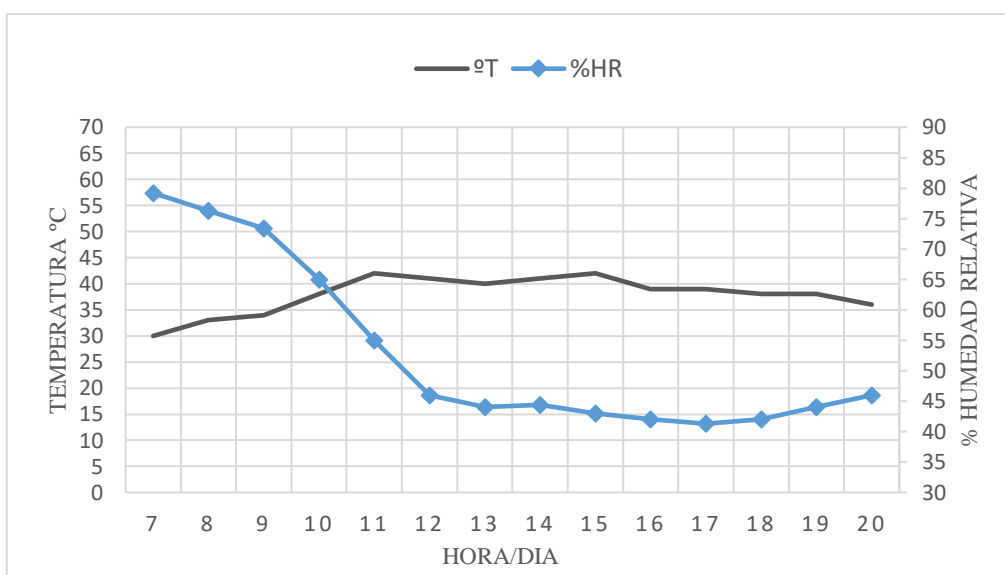
Nota. Elaboración propia, pérdida de humedad de la madera en ambos sistemas en un periodo de 42 días, tasa diaria de 1,36% (secador solar) 0,16% (aire libre).

La Figura 10, indica que a partir del día 5 se empieza a evidenciar una ventaja del secado solar, logrando un contenido de humedad final de 18,2 % dentro del secador, el sistema abierto únicamente alcanzó un contenido de humedad final en la madera del 30,4 %. en un período de 88 días de secado, Considerando que la primera etapa finalizó con una humedad del 32,6%.

4.1.3. Secado Lote -3

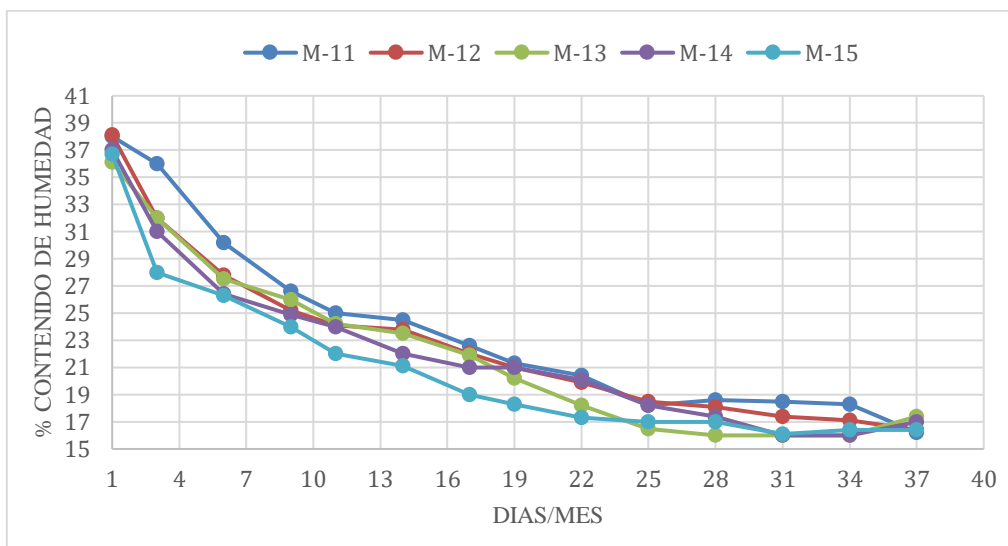
Figura 34

Condiciones Ambientales Dentro el Secador Solar-lote 3, Horas al Dia

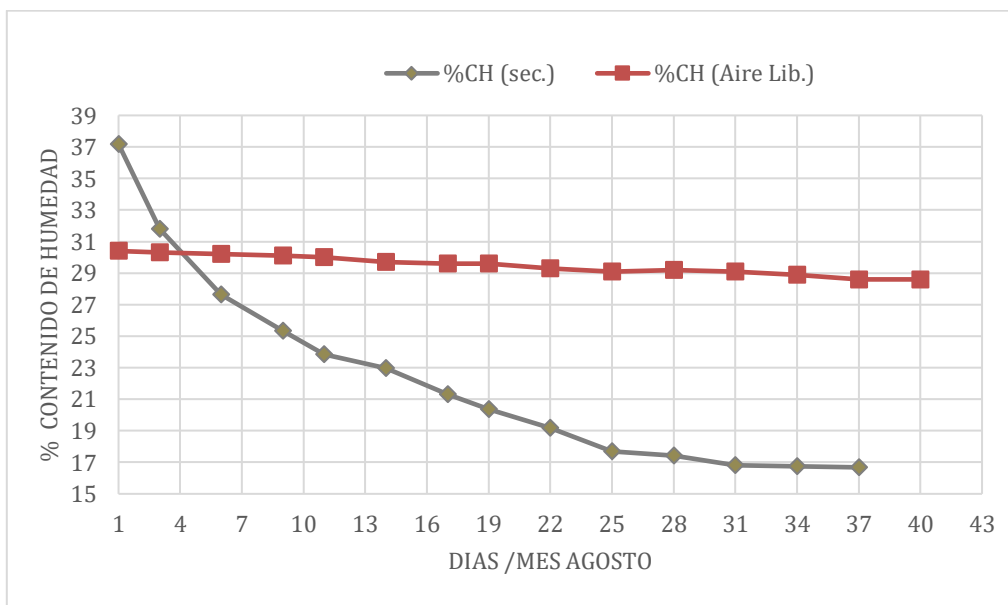


Nota. Elaboración propia, Temperatura media de 42,4°C y humedad relativa media del 29,1%, octubre-noviembre 2022.

Para optimizar el secador solar, fue necesario abrir las escotillas para permitir el intercambio de aire seco por aire húmedo. Esta operación se llevó a cabo durante 2 horas, una vez que la humedad relativa alcanzó el 70 %, entre las 10:00 a.m. 14:00 p.m., 17:00 p.m. y las 19:00 p.m.

Figura 35*Curvas de Secado-Lote 3*

Nota. Elaboración propia, pérdida de humedad de 37,1% a 17,4% a partir de las muestras testigo en un periodo de 37 días, secador solar noviembre-diciembre 2022.

Figura 36*Curvas de Secado Solar vs Aire Libre-Lote 3*

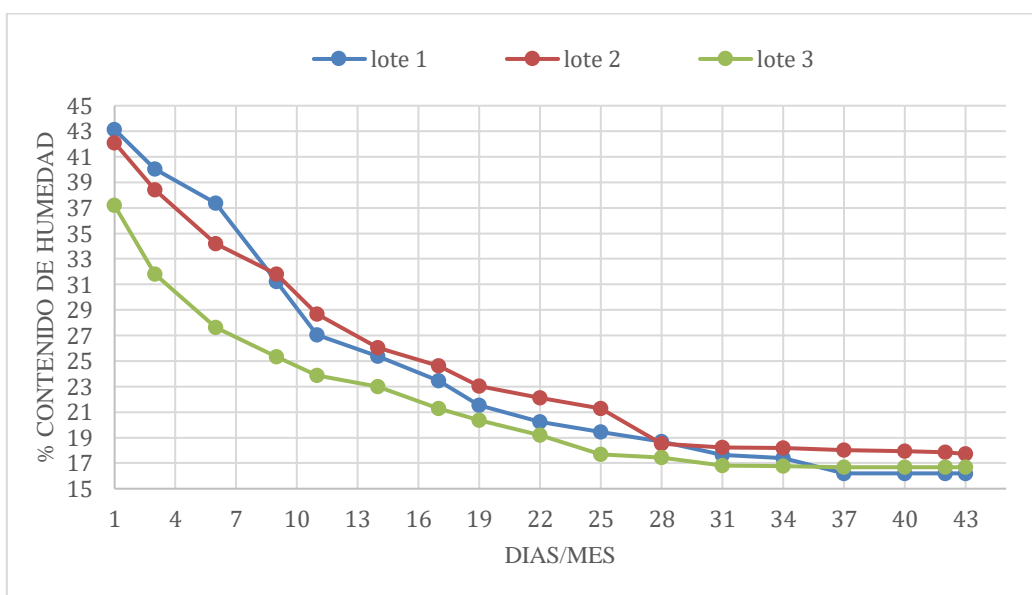
Nota. Elaboración propia, pérdida de humedad de la madera en ambos sistemas en un periodo de 37 días, tasa diaria de 1,38% (secador solar) 0,16% (aire libre).

Como se observa en la Figura 13, correspondiente a la producción del lote 3, el proceso de secado inicia a partir del día 3, alcanzando un contenido de humedad final del 17,4 % en un período de 37 días. En este punto, se evidencia una ventaja con relación a los dos primeros lotes producidos, fueron claves el intercambio de aire con la apertura de escotillas cada 2hr una vez que se alcanza la humedad de 70% dentro del secador solar. favoreció una mayor eficiencia en la eliminación del vapor de agua, reduciendo pérdidas térmicas innecesarias. Por lo contrario, el sistema el sistema abierto solo alcanzó un contenido de humedad final en la madera del 24,6 % en un período total de 115 días.

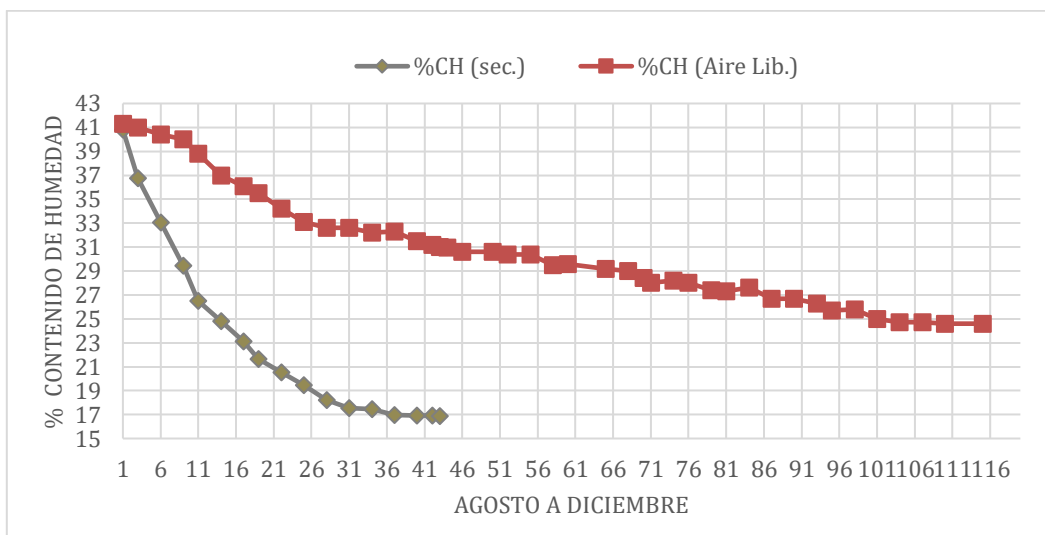
4.1.4. Curvas de Secado Solar vs Aire Libre

Figura 37

Resumen Curvas de Secado por Lote



Nota. Elaboración propia, curvas de secado diferentes, sistema secador solar tipo invernadero en promedio de 42 días ,17,4%.

Figura 38*Cuadro Resumen Secador Solar vs Aire Libre*

Nota. Elaboración propia, curvas de secado para ambos sistemas secador solar tipo invernadero en promedio de 42 días ,17,4% de humedad final y secado al aire libre 115días ,24,6% de humedad final.

Prueba aplicada (t de Student) para muestras independientes (bilateral, varianzas desiguales) con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ para confirmar si existe diferencia estadísticamente significativa ($p < 0.05$), en humedad final y tiempo de secado entre ambos métodos.

Tabla 13*Prueba estadística Humedad Final y Tiempo de Secado entre Sistemas*

Variable	Sistema de Secado	Media	Desviación Estándar	Valor t (t-Student)	Valor p	Diferencia Significativa
Humedad final (%)	Aire libre	24.6%	1.2%	9.21	<0.0001***	Sí
	Secador solar	17.4%	1.0%			
Tiempo de secado (días)	Aire libre	115	4.5	28.76	0.0000	Sí
	Secador solar	42	3.2			

Nota. Elaboración propia

La tabla 7 indica la evolución del contenido de humedad en ambos sistemas. El secador solar tipo invernadero alcanzó la humedad final de 17.4% en un tiempo medio (42 días) en comparación con el sistema de secado al aire libre, que solo logró reducir la humedad a 24.6% tras 115 días. La prueba (t de Student) confirmó que la diferencia también es estadísticamente significativa ($p < 0.0001$) entre ambos métodos de secado en tiempo y humedad final.

Tabla 14

Prueba de Correlación de Pearson Humedad Final y Tiempo de Secado

Sistema	Coefficiente de Correlación (r)	Valor p	Interpretación
Secador solar	-0.956	0.0007	Correlación negativa muy fuerte; estadísticamente significativa
Secado al aire libre	-0.998	2.16×10^{-7}	Correlación negativa extremadamente fuerte y significativa

Nota. Elaboración propia

La prueba de correlación (r) de Pearson como se muestra en la tabla 8 indica El alto grado de correlación en ambos métodos de secado, esto respalda la confiabilidad de las curvas generadas a lo largo del presente estudio.

4.1.5. Calidad Final de la Madera

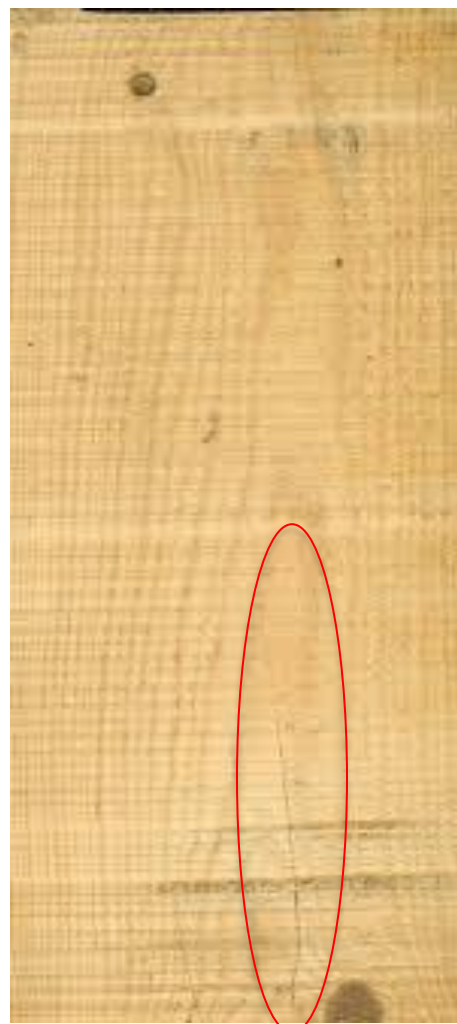
En la práctica, el secado solar presentó ventajas significativas en la calidad final de la madera, evidenciadas en una mayor estabilidad dimensional, una reducción en la incidencia de defectos físicos y una disminución del tiempo requerido para alcanzar el contenido de humedad

óptimo. En contraste, el secado al aire libre, con una mayor propensión a defectos estructurales y una calidad inferior en comparación con el sistema de secado tipo invernadero.

a) secador solar

Figura 39

Defectos de Calidad Post Secador Solar

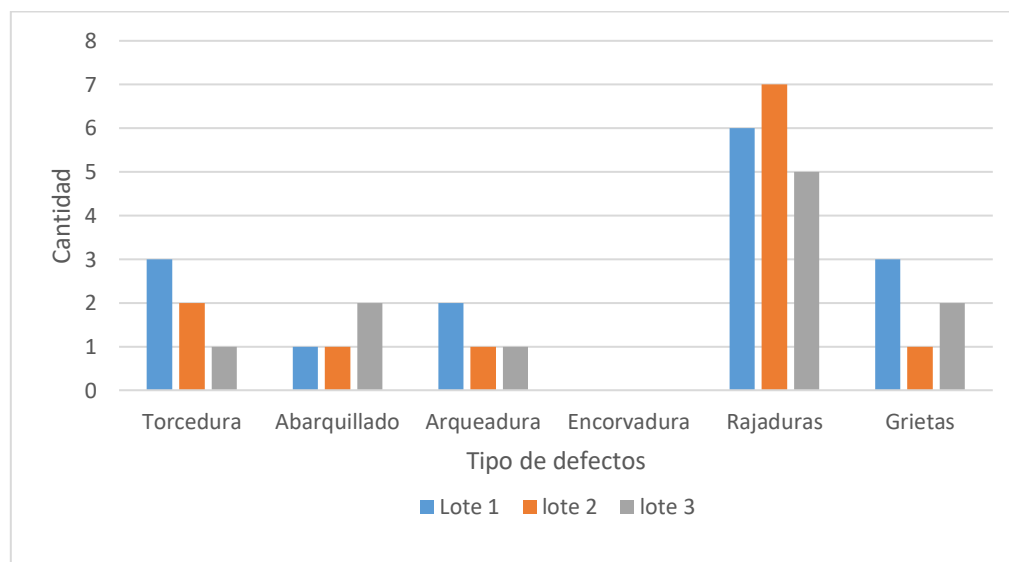


Nota. Elaboración propia con base en datos de lote 1,2,3 durante los meses agosto, septiembre, octubre 2022

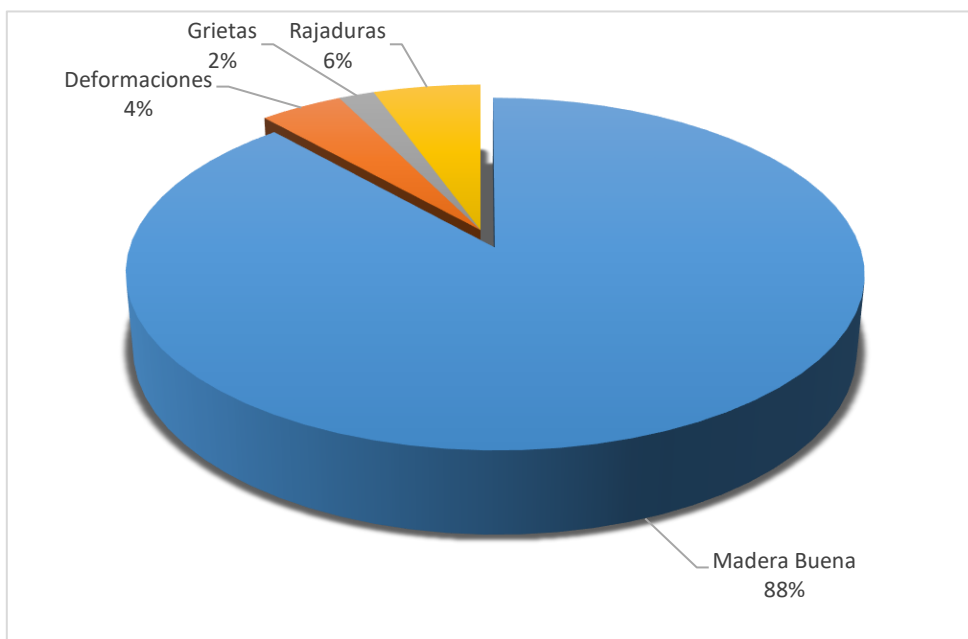
Tabla 15*Defectos de Calidad - Secador Solar*

Defecto	Lote 1	Lote 2	Lote 3
Torcedura	3	2	1
Abarquillado	1	1	2
Arqueadura	2	1	1
Encorvadura	0	0	0
Rajaduras	6	7	5
Grietas	3	1	2
Total	15	12	11
% CHi	41	31	33
%CHf	18,6	16,8	17,2
kg/m3	660	650	680
% H.eq.	13,8	15,2	16,3
t.(Dias)	46	42	37

Nota. Elaboración propia.

Figura 40*Defectos de Calidad - Secador Solar*

Nota. Elaboración propia con base en datos colectados de los lotes 1, 2, 3 los meses de agosto, septiembre, octubre, noviembre 2022.

Figura 41*Aprovechamiento Volumétrico - Secador Solar*

Nota. Elaboración propia

El sistema de secado solar tipo invernadero implementado, evidenció un rendimiento técnico destacado, alcanzando un aprovechamiento del 88 % conservando las propiedades físicas de la madera y estabilidad dimensional.

Se evidencia defectos post secado como: rajaduras en las puntas de un 6% se atribuye a variaciones bruscas de temperatura, especialmente durante las horas de mayor radiación solar. grietas internas de 2% presencia de anillos de crecimiento irregulares y la zona del corazón del tronco, deformación de las piezas 4 %. causado por tensiones internas acumuladas y liberadas de forma desigual durante el proceso por las condiciones climáticas que variaron significativamente durante el día.

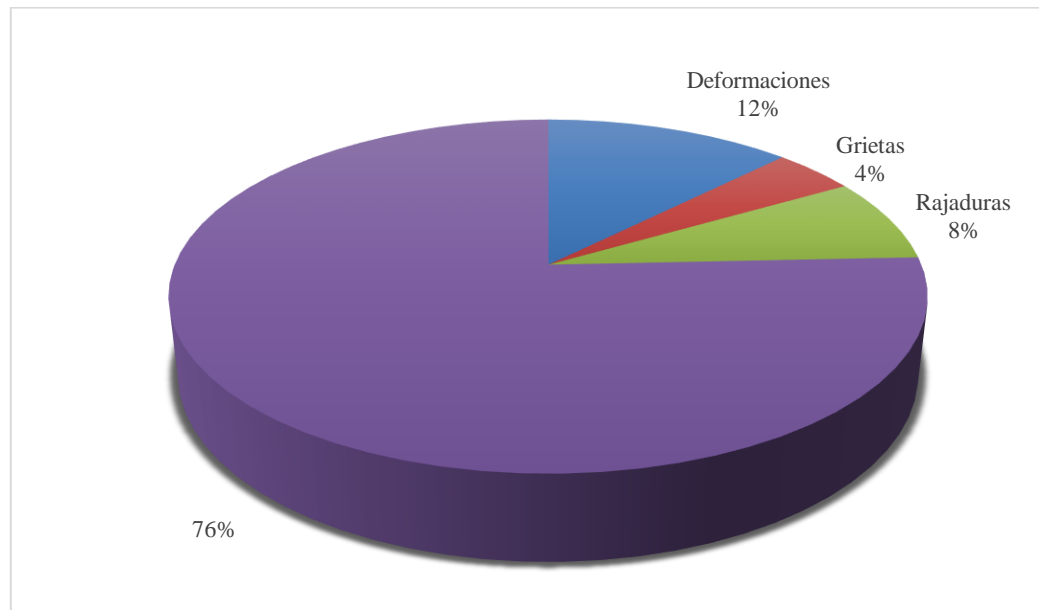
b) Secado tradicional o al aire libre**Figura 42***Defectos de Calidad Post Secado Aire Libre*

Nota. Elaboración propia con base en datos de lote 1 durante los meses agosto, septiembre, octubre, noviembre 2022

Tabla 16*Defectos – Secado Aire Libre*

Defecto	N°	Datos de secado
Torcedura	6	% CHi 41,4
Abarquillado	2	%CHf 24,6
Arqueadura	6	kg/m3 640
Encorvadura	4	% H.eq. 16,3
Rajaduras	11	t.(Dias) 115
Grietas	6	
Total	35	

Nota. Elaboración propia, con referencia norma NB 107002:2010 “procedimiento para el secado natural de madera verde” Se evidencia micro fisuras en la superficie de la madera

Figura 43*Aprovechamiento Volumétrico – Secado Aire Libre*

Nota. Elaboración propia

El secado al aire libre presentó un aprovechamiento del 76%, lo que tuvo un impacto significativo en la calidad del material final debido a la exposición a factores climáticos. Los

defectos más comunes fueron rajaduras, las cuales afectaron el 8% atribuibles a la exposición prolongada a la radiación solar, a causa un secado superficial acelerado, por ende, un desajuste en la distribución de humedad en las piezas de madera. Este proceso desigual de secado favorece la aparición de fisuras en las puntas y bordes de las piezas.

Además, se identificaron grietas internas de 4%, causadas por la presencia de anillos de crecimiento. Por último, se registraron deformaciones un 12% secado no es uniforme, lo que provoca una liberación desigual de la humedad en las distintas partes de la pieza.

Un aspecto adicional importante a destacar es que la madera solo alcanzó una humedad final del 24.6% después de 115 días de exposición, lo que impide obtener una estabilidad dimensional. especialmente cuando se requieren piezas de calidad para productos acabados.

Se aplicó la prueba de Chi-cuadrado, Para evaluar si existe o no una asociación significativa entre el tipo de sistema de secado (aire libre vs. secador solar tipo invernadero) y la ocurrencia de defectos de calidad en la madera (sin defecto, rajadura, deformación, grieta interna)

Tabla 17

Tabla de Contingencia, Defectos de Calidad Según el Sistema de Secado

Tipo de Defecto	Secado al Aire Libre	Secador Solar	Total
Rajaduras	9	7	16
Deformaciones	13	5	18
Grietas internas	5	2	7
Sin defectos	82	95	177

Nota. Elaboración propia

Se realizó prueba estadística Chi-cuadrado como indica la tabla 11, para determinar si no existe una asociación significativa entre el tipo de secado y la aparición de defectos, Es decir, la distribución de defectos es independiente del sistema de secado utilizado.

Tabla 18

Prueba estadística (Chi-Cuadrado) Defectos de Calidad Según el Sistema de Secado

Estadístico	Valor
Chi-cuadrado (χ^2)	10.54
gl (grados de libertad)	3
Valor-p	0.014
Nivel de significancia (α)	0.05
Conclusion	Existe diferencia significativa

Nota. Elaboración propia

Dado que el valor ($p < 0.014$) es menor al nivel de significancia $\alpha = 0.05$, Esto indica que el tipo de sistema de secado influye significativamente en la aparición de defectos en la madera, es decir, no son independientes. Bajo la evidencia estadística de que el tipo de secado influye en la cantidad o tipo de defectos obtenidos.

4.1.6. Costos Operativos Secador Solar vs Aire Libre

Se realizó un análisis comparativo de los costos operativos asociados a ambos sistemas de secado: el secado al aire libre y el secado mediante el prototipo de secador solar tipo invernadero. Los costos considerados incluyeron:

Mano de obra directa (vigilancia, carga, descarga).

Consumo energético (instrumentación, monitoreo).

Materiales auxiliares (sellado de extremos, control de apilamiento).

Transporte (flete)

Depreciación del secador solar

Tabla 19

Costos operativos por tipo de secado

Concepto	Unidad	Secador Solar (Bs)	Secado Aire Libre (Bs)
1. Mano de obra	Por lote	1.500,00	500,00 (indirecta)
2. Energía eléctrica	2,38 kWh × 7h × 42días × 0,85 Bs/kW	592,59	No aplica
3. Gasto de materiales	Estimado por lote	50	50
4. Uso de instrumentos	Estimado por lote	100	100
5. Depreciación del secador	20% anual (por 42 días)	190,81	No aplica
6. Transporte interno	Por lote	150	150
Total por lote		2.583,40	800,00
Costo por m ³ (3 m ³)		861,13 Bs/m ³	266,66 Bs/m ³

Nota. Elaboración propia

4.1.7. Relación Costo /Beneficio (RCB)

A partir de estos datos, se determinó el costo total por metro cúbico de madera secada en cada sistema, y posteriormente se calculó la relación beneficio/costo, considerando los ingresos por volumen de madera útil (sin defectos) comercializado.

Volumen por lote: 3 m³

1.-Precio de venta (referencia socios ACAMPE) por madera secada en condiciones comerciales considerando que cada m³) de madera tiene 424pie/tab a un valor estimado de 6 bs/pie/tab de madera seca:

Secador solar: Bs 2.544/m³ x 88% (por mayor calidad y menor defectos)

Total, beneficio Bs.2.238,72/m³

Aire libre: Bs 2.544/m³ x 76% (por menor calidad y mayores defectos)

Total, beneficio Bs.1.933,44/m³

Ingresos totales:

Secador Solar: 3m³ × 2.238,72 = 6.716,16 Bs

Secado Aire libre: 3m³ × 1.933,44 = 5.800,32 Bs

Costos operativos totales:

Secador Solar: 2.583,40 Bs

Secado Aire libre: 800 Bs

2.- Calculo del costo beneficio

$$(RCB)_{\text{secador solar}} = \frac{6.716,16}{2.583,40} = 2,60$$

$$(RCB)_{\text{secado aire libre}} = \frac{5.800,32}{800} = 7,25$$

A pesar de que el RCB del secado al aire libre (7,25) es numéricamente mayor, este no considera el tiempo de ocupación (115 días vs. 42 días) ni los efectos sobre la calidad del producto (mayores defectos, humedad final alta).

El secador solar permite rotar hasta 3 veces más producción en el mismo período, lo que mejora la productividad y los ingresos anuales:

3.-Productividad anual proyectada

a) Lote proyectado a un año sistema de secador solar tipo invernadero

$$\text{Secador Solar} = \frac{365\text{días}}{42\text{días}} = 8,7 \text{ lotes}$$

$$\text{Volumen anual } 3\text{m}^3 \times 8,7 \text{ lotes} = 26,1\text{m}^3$$

Ingreso proyectado a un año sin % de crecimiento

$$26,1\text{m}^3 \times 2.238,72 = 58.430.59\text{Bs/año}$$

Tabla 20*Flujo de Caja Proyectado Con un Crecimiento de 5% por periodo - Secador Solar***FLUJO DE CAJA PROYECTADO**

(Expresado en Bolivianos)

Flujo de caja proyectado

5%

Periodos: 42días

PERIODO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	TOTAL
INGRESOS										
1.Ingresos		6.717,16	7.053,02	7.405,67	7.775,95	8.164,75	8.572,99	9.001,64	9.451,72	64.142,89
2.Capital Inicial	8.298,00	1.037,25	1.037,25	1.037,25	1.037,25	1.037,25	1.037,25	1.037,25	1.037,25	8.298,00
TOTAL INGRESOS		7.754,41	8.090,27	8.442,92	8.813,20	9.202,00	9.610,24	10.038,89	10.488,97	72.440,89
EGRESOS										
1.Costo de mercaderia		3.358,08	3.525,98	3.702,28	3.887,40	4.081,77	4.285,86	4.500,15	4.725,16	32.066,67
2.Energia electrica		559,59	559,59	559,59	559,59	559,59	559,59	559,59	559,59	4.476,72
3.Mano de Obra		1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00	12.000,00
4.Mantenimiento		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	800,00
5.Uso de transporte		150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	1.200,00
6.Amortizacion de capital	8.298,00	1.037,25	1.037,25	1.037,25	1.037,25	1.037,25	1.037,25	1.037,25	1.037,25	8.298,00
TOTAL EGRESOS		6.704,92	6.872,82	7.049,12	7.234,24	7.428,61	7.632,70	7.846,99	8.072,00	58.841,39
EXCEDENTE O DEFICIT		1.049,49	1.217,44	1.393,80	1.578,96	1.773,39	1.977,54	2.191,90	2.416,97	13.599,50
SALDO ACUMULADO		1.049,49	2.266,93	3.660,73	5.239,69	7.013,09	8.990,63	11.182,53	13.599,50	

ANALISIS: PERIODO DE RECUPERACION DE LA INVERSION

PERIODO	Flujo de efectivo	Flujo de efectivo acumulado
0	-8298	
1	1.049,49	1.049,49
2	1.217,44	2.266,93
3	1.393,80	3.660,73
4	1.578,96	5.239,69
5	1.773,39	7.013,09
6	1.977,54	8.990,63
7	2.191,90	11.182,53
8	2.416,97	13.599,50

$$PRI = a + \frac{(b-c)}{b}$$

a= Periodo anterior hasta recuperar la inversion

b= Inversion Inicial

C= Suma de flujos de caja hasta el periodo anterior de la recuperacion de

d=Valor del flujo de caja del año en que se satisface la inversion

PRI=	5,65
------	------

Nota. Elaboración propia

b) Lote proyectado a un año sistema de secado aire libre

$$\text{secado aire libre} = \frac{365 \text{días}}{115 \text{días}} = 3,17 \text{ lotes}$$

$$\text{Volumen anual } 3m^3 \times 3,17 \text{ lotes} = 9,5m^3$$

Ingreso proyectado a un año

$$9,5m^3 \times 1.933,44 = 18.367.68Bs/\text{año}$$

La Eficiencia económica por ciclo de secado aire libre tiene menor costo por m³, pero produce mucho menos al año, contrario al incremento de los ingresos proyectados por ventas anuales que alcanzan el 63,60%

El secador solar tipo invernadero, aunque implica un mayor costo operativo diario, permite triplicar la capacidad de producción en un mismo periodo los resultados muestran diferencias importantes eficiencia, costos que sugieren ventajas desde una perspectiva técnico económico.

4.2. Matriz Comparativa

Tabla 21

Comparación Técnica Entre el Secado al Aire Libre y el Secador Solar Para Madera Aserrada

Criterio Técnico	Secado al aire libre	Secador solar tipo invernadero
Fuente de energía Térmica	Energía solar y viento natural; sin control de intensidad y temperatura ambiente 31°C	Energía solar concentrada mediante efecto invernadero; control de la ventilación y temperatura continua (31–42 °C)
Inversión inicial	Muy baja; requiere únicamente espacio abierto y soporte para apilar la madera.	Moderada; necesita estructura cubierta (plástico o policarbonato), ventiladores y sensores básicos.

Tabla 20 (continuación)*Comparación Técnica Entre el Secado al Aire Libre y el Secador Solar Para Madera Aserrada*

Costo operativo	Bajo; 266,66 Bs/ m ³ ,sin consumo energético	Moderado; 861,13 Bs/ m ³ , limitado a mantenimiento , uso de energía eléctrica para ventiladores.
Tiempo de secado	Largo: entre 115 días, dependiendo del tipo de madera y condiciones climáticas .	Reducido: promedio de 42 días, gracias a las condiciones ideales dentro del invernadero, renovación y arrastre de agua por ventilación.
Temperatura de operación	Variable, dependiente del ambiente (26–32 °C).	Controlado parcialmente; puede mantenerse entre (34 y 45 °C) según radiación solar.
Control de humedad relativa	No controlado; depende del clima, lo que genera sobre secado o secado irregular.	Controlado; mediante ventilación continua 1,5m/s y renovación del aire interior hasta 5 veces.
Uniformidad del secado	Bajo; diferencias de humedad muy dispersas entre piezas y entre humedad interna.	Alta; distribución más homogénea de temperatura y humedad dentro del invernadero.
Calidad del producto final	Variable; alto índice de defecto 24% de rajaduras, deformaciones, manchas por hongos e infestación biológica, humedad impredecible	Superior; menor índice de defectos, mejor estabilidad dimensional y menor ataque biológico, humedad dentro de la normativa para uso previsto 88% aprovechamiento
Productividad	Limitada; los largos tiempos reducen la rotación de inventario.	Mayor; permite incrementar la cantidad de producción de madera seca en menor tiempo.
Dependencia climática	Muy alta; el proceso se interrumpe en días lluviosos o húmedos.	Media; la cubierta protege de la lluvia y conserva calor incluso en condiciones nubladas.
Sostenibilidad ambiental	Muy alta; no genera emisiones ni residuos.	Alta; utiliza energía solar renovable y minimiza el consumo eléctrico, no genera emisiones ni residuos.
Aplicabilidad económica	Inadecuado; para la micro y mediana empresa por la baja calidad .	Viable ; para micro y medianas empresas que buscan eficiencia ,rentabilidad y mejor calidad del secado de la madera.

Nota. Elaboración propia

Capítulo 5.

Discusión

Los resultados obtenidos en la presente investigación confirman que el secador solar tipo invernadero constituye una alternativa técnicamente robusta y eficiente para el secado de madera en regiones tropicales como el departamento de Pando.

La reducción del contenido de humedad hasta un 17,4 % en un periodo medio de 42 días demuestra la eficacia del sistema, lo cual concuerda con lo reportado por Bond et al. (2011), quienes observaron desempeños similares en secadores solares ubicados en zonas de clima tropical.

Asimismo, la relación entre los requerimientos de uso de la madera y su contenido de humedad, descrita por Quintanar et al. (2008), indica que para la mayoría de los fines prácticos es necesario alcanzar valores de humedad comprendidos entre el 5 % y el 18 %. Este rango coincide con lo establecido en la Norma NB 107001:2010, anexo “E” y NB 107002:2010, anexo “A” que especifica valores entre el 11 % y el 19 % para aplicaciones en carpintería y otros usos. En este sentido, el secador solar tipo invernadero logra contenidos de humedad por debajo de la humedad de equilibrio demuestra cumplir con los parámetros técnicos exigidos, mostrando un mejor desempeño en comparación con el método tradicional de secado al aire libre.

La aceleración del proceso de secado en el sistema solar tipo invernadero puede atribuirse principalmente al efecto combinado de la ventilación forzada y la acumulación térmica interna, características que optimizan la transferencia de calor y la eliminación de humedad. Esta observación concuerda con los hallazgos de Bond, Espinoza y Araman (2012),

quienes identificaron comportamientos similares en secadores solares instalados en zonas de clima tropical.

En contraste, el método de secado al aire libre evidenció una alta variabilidad en su desempeño, alcanzando valores por encima de la humedad de equilibrio únicamente un 24,6 % de contenido de humedad tras 115 días de exposición, lo cual demuestra su baja eficiencia bajo las condiciones climáticas de la región de estudio.

Este comportamiento también se alinea con los resultados reportados por Quintanar Olguín, J., Fuentes López, M. E., & Tamarit Urías, J. C. (2011), quienes observaron que el uso de secadores solares tipo invernadero puede reducir el tiempo de secado hasta en 3 veces en comparación con el método tradicional de secado natural, mejorando significativamente los tiempos de rotación y la calidad final del producto.

Asimismo, la menor pendiente observada en la curva del sistema de secado al aire libre sugiere una menor capacidad de control sobre las variables internas, como temperatura, humedad relativa y ventilación casi nula. Esta limitación está en concordancia con lo reportado por Ejar Maldonado (2021), quien identificó una mayor dispersión y variabilidad en los procesos de secado realizados sin mecanismos de regulación climática, lo cual afecta tanto la uniformidad como la calidad final del producto.

En términos de calidad de la madera posterior al secado solar, se evidencia una reducción significativa en los defectos estructurales, como agrietamientos, deformaciones y colapsos. Este hallazgo coincide con lo reportado por Salas-Garita et al. (2011) y Martínez-Pinillos (1997), quienes demostraron que este método no solo mejora la estabilidad dimensional

de la madera, sino que también permite una reducción sustancial en los tiempos de secado en comparación con el secado al aire libre.

Desde una perspectiva económico-operativa, si bien el secador solar tipo invernadero presenta un mayor costo operativo por metro cúbico (861,13 Bs/m³ frente a 266,66 Bs/m³ del secado al aire libre), permite una rotación hasta tres veces más rápida y la obtención de un producto de calidad superior. Este resultado es consistente con lo señalado por Quintanar Olgún, Fuentes López y Tamarit Urías (2011), así como por Issa y Da Silva (2021), quienes destacan la eficiencia técnica y económica del secado solar en comparación con métodos tradicionales.

Adicionalmente el sistema de secador solar tipo invernadero permitirá triplicar la rotación de lotes en el mismo periodo lo que significara un incremento del 68,56% de ingresos por ventas anuales, Esta eficiencia se relaciona directamente con plazos de comercialización y reducción de defectos, En esta misma línea, Jessica y Carmen (2009) concluyen que el mayor costo que el empresario debe enfrentar por la pérdida de calidad del producto debido al uso de una madera inadecuadamente seca, es la pérdida de la buena imagen de la empresa. Al entregar productos de mala calidad que, en poco tiempo, va a mostrar defectos, por ejemplo, como el despegue de las piezas.

5.1. Conclusiones

Al finalizar la investigación sobre la construcción e implementación de un prototipo de secador solar tipo invernadero, y tras el análisis integral de los resultados obtenidos, se presentan a continuación las conclusiones principales del estudio

La implementación del prototipo de secador solar tipo invernadero para el secado de madera aserrada de marfil (espesor de 1,5 pulgadas) demostró ser técnica y funcionalmente viable en el contexto de la Asociación de Carpinteros (ACAMPE). Su uso durante el periodo de mayor demanda (julio a noviembre) permitió mejorar la producción optimizando el proceso de secado y ejerce un mayor control sobre la calidad final del producto.

El prototipo construido, con una capacidad útil de 3 m³ por lote, integró sistemas de ventilación forzada, renovación de aire y control climático interno. Estos elementos favorecieron un proceso de secado más homogéneo y replicable en otras regiones con condiciones climáticas similares. La estructura, fabricada con materiales locales de bajo costo, evidenció la facilidad de mantenimiento.

Las curvas de secado obtenidas evidenciaron una reducción óptima y controlada del contenido de humedad en el sistema solar tipo invernadero de (41 % a 17,4 % en 42 días), en comparación con el secado al aire libre (de 40,1 % a 24,6 % en 115 días). Las diferencias de humedad final y tiempo fueron estadísticamente significativas según la prueba t ($p < 0,0001$), lo que respalda la superioridad técnica del secador solar. Además, se evidencia una fuerte correlación negativa en ambos sistemas: $r = -0,956$ para el secador solar y $r = -0,998$ para el

secado al aire libre. Estas correlaciones reflejan un comportamiento consistente en la evolución del contenido de humedad, respaldando la validez de las curvas generadas.

El secador solar presenta mejores resultados de calidad, con menor índice de defectos: 6 % rajaduras, 4 % deformaciones, 2 % grietas internas y 88 % de piezas sin defectos. Por otro lado, el sistema al aire libre presentó 8 % rajaduras, 12 % deformaciones, 4 % grietas internas y 76 % de piezas sin defectos. La prueba chi cuadrado ($\chi^2 = 10,54$; $p = 0.0014$) evidenció diferencias estadísticamente significativas en la distribución de defectos, concluyendo que el método de secado influye en la calidad final y la estabilidad dimensional de la madera.

El costo operativo del secador solar fue de 861,13 Bs/m³, superior al secado aire libre 266,66 Bs/m³. A pesar de que la relación costo-beneficio fue numéricamente mayor en el sistema al aire libre (7,25 frente a 2,60), sin embargo, al considerar el factor tiempo (115 días vs. 42 días) y calidad del final. El secador solar permite triplicar la rotación de lotes en el mismo periodo lo que significa el incremento del 63,60% de ingresos proyectados por ventas anuales y un periodo de recuperación de la inversión P.R.I. de (5,65 meses) por lo que su implementación es técnica y económicamente viable para el sector Pyme.

5.2. Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos en la implementación y evaluación del secador solar tipo invernadero para el secado de madera aserrada en el departamento de Pando, se proponen las siguientes recomendaciones técnicas, académicas e institucionales.

1. Recomendaciones técnicas para la operación del secador solar tipo invernadero

Se recomienda optimizar la operación del sistema mediante el desarrollo de procedimientos técnicos estandarizados que contemplen directrices para la carga de madera, monitoreo de variables climáticas internas y manejo de ventilación. Estas pautas contribuirán a reducir la variabilidad operativa, mejorar la eficiencia del proceso y facilitar la réplica del sistema en otras regiones con condiciones climáticas similares.

Se sugiere implementar un procedimiento de trazabilidad para los Carpinteros, que permita registrar el historial de cada carga, incluyendo la fecha de corte y aserrado. Esto posibilitará el procesamiento de madera con condiciones iniciales homogéneas, reduciendo la dispersión de humedad y, por ende, los defectos en la calidad final del producto.

Es fundamental apagar el sistema de ventilación durante la noche, ya que el incremento de humedad en la noche es beneficioso pues permite el (reposo) lo cual reduce o libera las tensiones de secado que se desarrollan durante el día.

La regulación de las escotillas de ventilación debe realizarse en función de umbrales críticos previamente establecidos, tales como temperaturas superiores a 40 °C y humedad relativa mayor al 70 %. Este control permitirá una adecuada evacuación del vapor de agua sin

comprometer la acumulación térmica necesaria para mantener el proceso de secado y defectos de calidad en la madera.

2. Recomendaciones para futuras investigaciones

Se recomienda replicar este estudio con otras especies forestales de interés comercial, para evaluar la adaptabilidad del secador solar tipo invernadero a diferentes características anatómicas, densidades y espesores. Esta diversificación fortalecerá la validez externa del prototipo y su aplicabilidad en contextos forestales variados.

Ampliar el horizonte temporal del secado de madera con el secador solar a un periodo completo del año (12 meses), con el fin de evaluar el rendimiento del sistema en diferentes condiciones estacionales y la implantación de algún sistema de generación de calor para el sistema de calefacción en época lluviosa.

Se recomienda realizar comparaciones con secadores convencionales a base de combustibles fósiles, con la finalidad de analizar su viabilidad técnica, económica y ambiental.

3. Recomendaciones institucionales

Es fundamental promover programas de capacitación técnica dirigidos a operarios y técnicos de ACAMPE, especialmente en diseño, construcción, operación y mantenimiento de secadores solares. La capacitación debe orientarse a fortalecer las capacidades locales y garantizar la sostenibilidad del sistema en contextos rurales y de pequeña escala.

6. BIBLIOGRAFIA

ÁLVAREZ N., H.; FERNÁNDEZ, J. L. 1990. Solar drying of saw lumber in Spain. Forest Industries Department, National Agricultural Research Institute, Madrid. 173-174 p.

BARRERA J.; CUERVO S.; HERNÁNDEZ J.; RODRÍGUEZ J. 2010 “Manual de buenas prácticas en aserraderos de comunidades forestales”, fundamentos y aplicaciones, primera edición, vol.1(1) pp45-61, México 2010.

BOND, B.; ESPINOZA, O.; ARAMAN, P. 2012. Diseño y Operación de un Secador Solar de Madera para Países Tropicales. Informe Técnico Gral. SRS134. Asheville, NC: Departamento de Agricultura, Servicio Forestal, Estación de Investigación Sur. 13 p.

Martínez-Pinillos, E. (1997). Diseño y ensayo de un secador solar para madera [En línea]. *Madera & Bosques*, 3(2), 13-28.

Muñoz-Acosta, F. (2012). USO DE TABLA PSICROMETRICA EN LA INDUSTRIA DE LA MADERA. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 3(7), pág. 75–81.

Salas-Garita, C., Moya-Roque, R., & Córdoba-Foglia, R. (2012). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR SOLAR PARA MADERA. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 5(14), pág. 30–55.

ESTRELLA C.; CRUZ C. 2003 “Diseño y construcción de un secador para maderas con energía solar”, Quito-Ecuador, tesis de grado, facultad de Ingenierías, Universidad Tecnológica Equinoccial, pp54-65.

FUENTES M.; LUNA D.; OSORIO J.; CORONA J. 2003. “Construcción y validación de un secador solar para madera aserrada.” *Revista Chapingo*, vol. 9, pp171-176

FUENTES S., M. 1994. Secado de la madera aserrada de *Pinus radiata* D. Don. impregnada con sales hidrosolubles CCA. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 162 p.

- GEANKOPLIS, C. 1998 “Procesos de transporte y operaciones unitarias”, Universidad de Minesota, tercera edicion, Editorial Continental SA, , Mexio, 1998.474-674pp
- INFOR. 1994. “Diseño y montaje de un secador de madera de bajo costo”, Instituto forestal, División industrias, CORFO, Santiago, Octubre, 1994.
- LÓPEZ P., V. 1985. Secado al aire libre de madera aserrada de *Pinus hartwegii* Lindl. en Chapingo, Estado de México. Tesis de licenciatura. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México. 50 p.
- Ejar Maldonado, G. (2021). Secado al aire libre de la madera de *Pinus*. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(64), 110–137. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i64.987>
- Salas-Garita, C., (2011). “*Eficiencia y validación de secadoras solares de madera aserrada para pequeña y mediana industria*”. Instituto forestal de tecnología. Dirección de proyectos
- MUÑOZ, F. 2008. “Diseño y construcción de un secador solar para madera”, Costa rica, (en línea). Kurú: Revista Forestal 5(14): p1-7
- Jessica, M., & Carmen, G. (2009). *Técnicas de secado de la madera* (1.ª ed.). Ministerio de la Producción.
- MARTÍNEZ P., E. 1984. Secador solar para madera. Nota técnica N° 10. INIREB – LACITEMA. Xalapa, Version(3)., México. 14 p.
- Da silva, M ., & Isaa ,J. (2021) “viabilidad económica y comercial del secado de la madera para micro y pequeños aserraderos y carpinterías del noreste” Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU)*

SOLANO, R. 1979. Construcción de una secadora solar para maderas. Primer simposium sobre energía solar. Fundamentos y aplicaciones. Ed. Tecnológica, San José, Costa Rica. s/p.

SOLÍS L.; CERÓN M.; GONZÁLEZ I. 2003. “Diseño y operación de una estufa solar para secar madera”. Artículo de investigación, vol-1, pp35-48.

VIEHBECK, P. 1999. Lo básico del secado de madera con energía solar. Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien- GATE.Trad. Edora Ormaza y Ana M. Galindo. Santa Cruz, Bolivia.49 p

Board of the Cartagena Agreement (1989). Manual del Grupo Andino para el secado de maderas. Lima, Perú: Junta del Acuerdo de Cartagena.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (FAO). (1986). *Propiedades físicas y mecánicas de maderas tropicales*. FAO.

Rowell, R. M. (2005). *Handbook of wood chemistry and wood composites*. CRC Press.

De Castro, R., Cárdenas, P., Venturino, A., & Ono, A. (2008, noviembre). *Estudio comparativo del proceso de secado de Eucalyptus grandis en dos secaderos solares ubicados en diferentes zonas y un secado natural a la intemperie durante el invierno*. Departamento de Proyectos Forestales, Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU).

Simpson, W.T. (1998). *Equilibrium Moisture Content of Wood in Outdoor Locations in the United States and Worldwide*.

ACEAA. (2017). *Informe sobre recursos forestales en el departamento de Pando*. Asociación Boliviana para la Conservación.

AETN. (2023). *Estudio sobre eficiencia energética en procesos industriales*. Agencia de Energía y Tecnologías No Convencionales.

IBNORCA. (2010). *NB 107002:2010. Madera aserrada: procedimiento para el secado natural de madera verde*. Instituto Boliviano de Normalización y Calidad.

IBNORCA. (2010). *NB 107001:2010. Madera aserrada: secado artificial de la madera*. Instituto Boliviano de Normalización y Calidad.

Álvarez, J., & Fernández, J. (1990). *Tecnología del secado de la madera*. Editorial Universitaria.

Bond, B., Espinoza, O., & Araman, P. (2011). *Solar kiln design and operation*. USDA Forest Service.

CICPANDO. (2011). *Diagnóstico del sector industrial maderero en Pando*. Cámara de Industria, Comercio y Producción de Pando.

Estrella, M., & Cruz, L. (2003). *Evaluación de secadores solares para pequeñas industrias*. Instituto Forestal Latinoamericano.

Muñoz, J. (2008). *Manual de secado solar de maderas*. Universidad de Costa Rica.

Muñoz, J., Fuentes, J., Luna, M., Osorio, F., & Corona, R. (2003). *Secado solar de maderas tropicales: experiencias en América Latina*. Red Latinoamericana de Secado Solar.

Segovia, J. (2012). *Viabilidad técnica y económica del secado solar en pequeñas industrias forestales*.

Perré, P., & Keey, R. B. (2006). *Drying of wood: Principles and practices*. Springer.

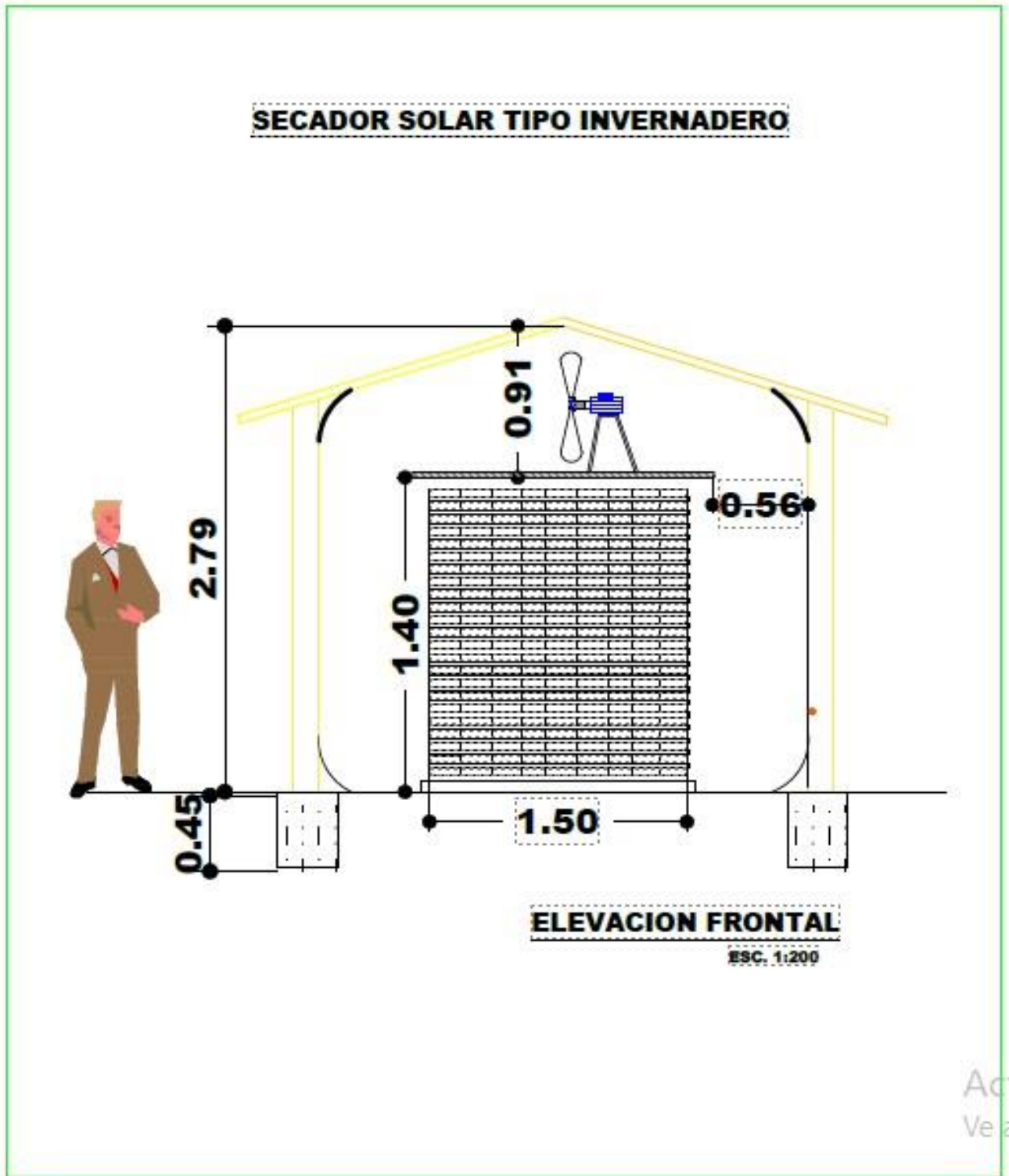
Salazar, R., & Chávez, C. (2016). *Tecnologías apropiadas para el secado de madera en zonas tropicales*. *Revista Forestal del Perú*, 41(1), 45–55. <https://doi.org/10.21704/rfp.v41i1.729>

Simpson, W. T. (1991). *Drying wood: Dry kiln operator's manual* (Agriculture Handbook 188). U.S. Department of Agriculture, Forest Service.

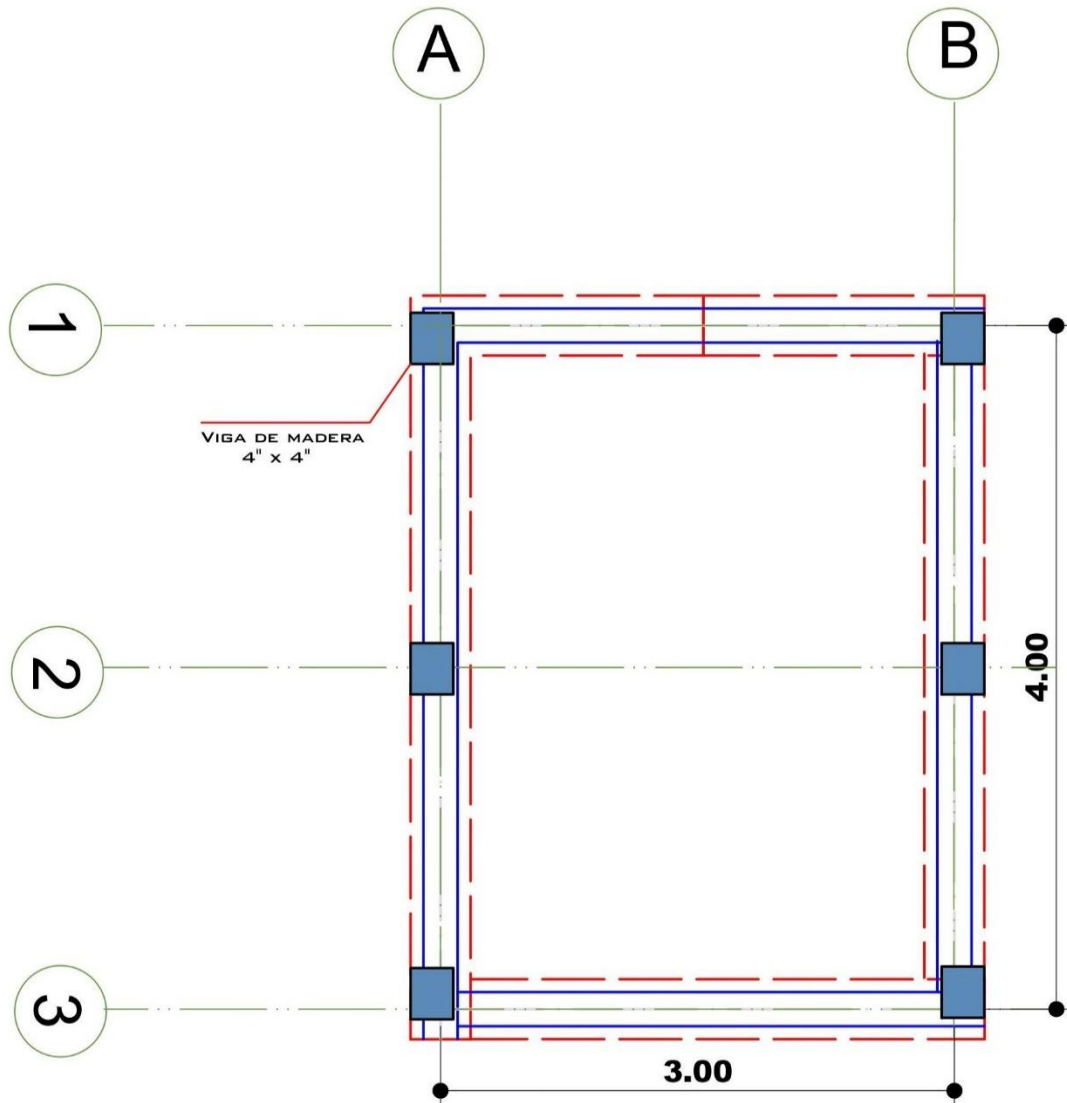
Quintanar Olguín, J., Fuentes López, M. E., & Tamarit Urías, J. C. (2011). Evaluación económica de un secador solar para madera. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(7), 85–97.

ANEXO 1

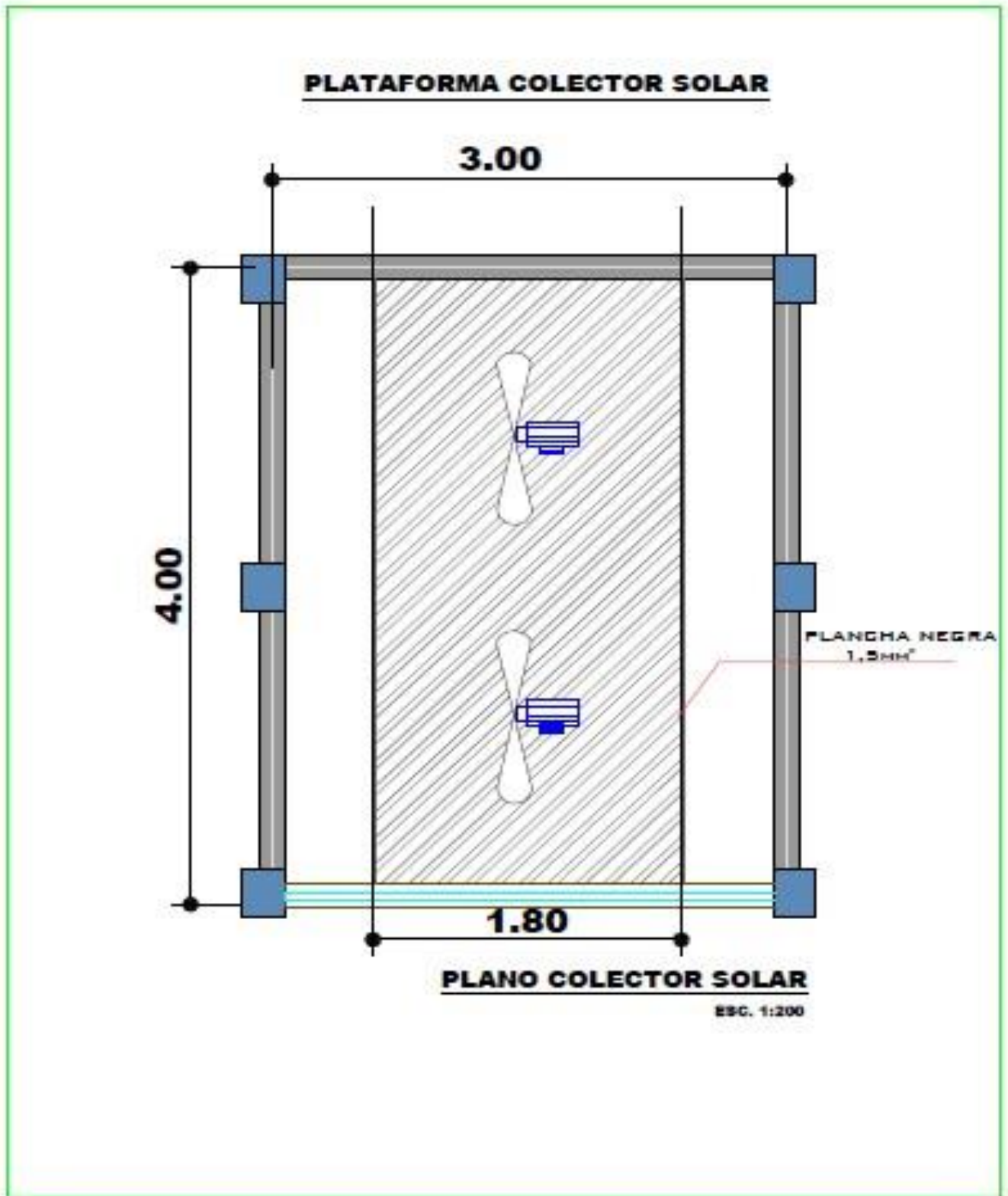
PLANOS DE CONTRUCCION - SECADOR SOLAR



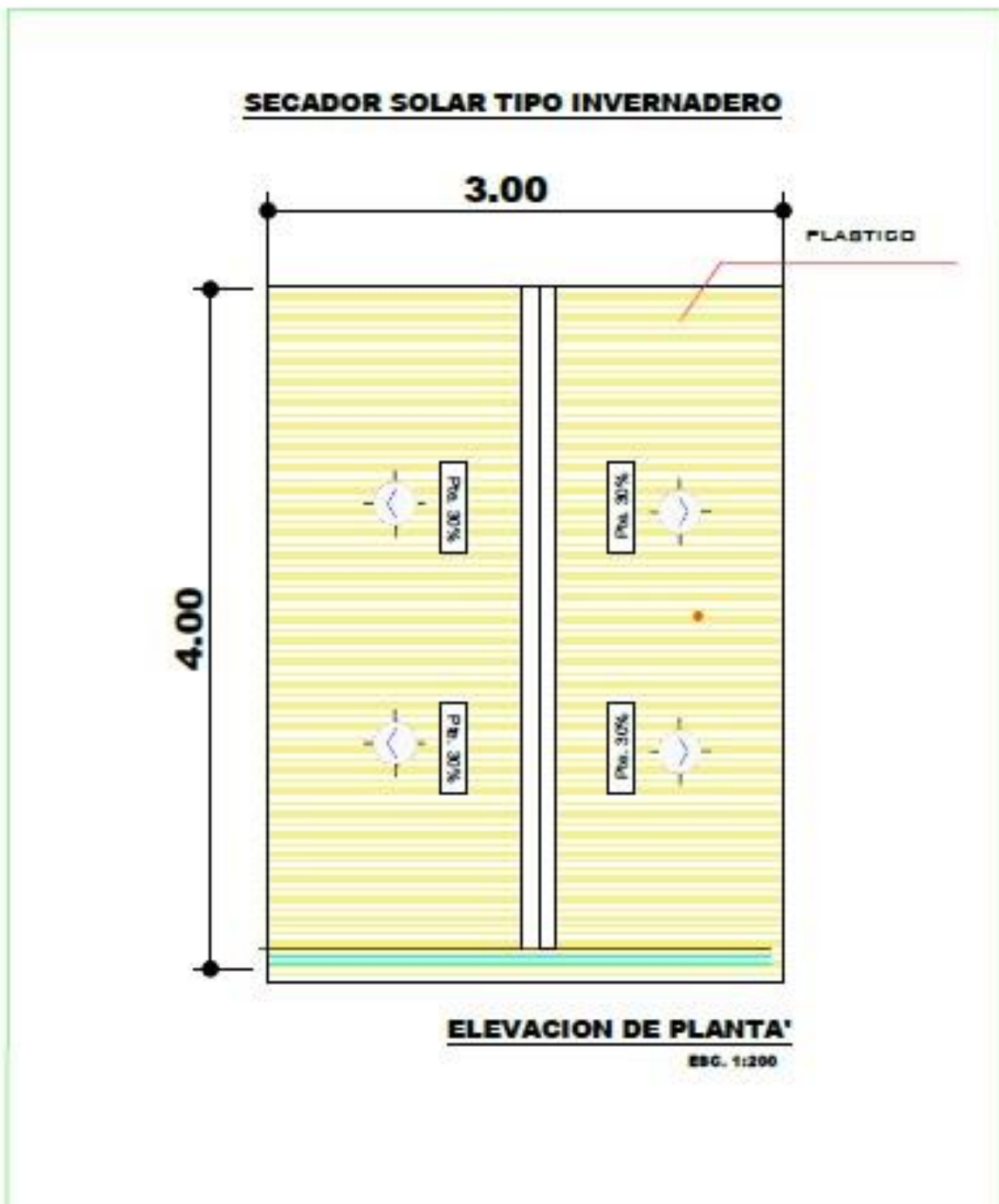
nota: Elaboración Propia

SECADOR SOLAR TIPO INVERNADERO**PLANO FUNDACIONES**

ESC. 1:200



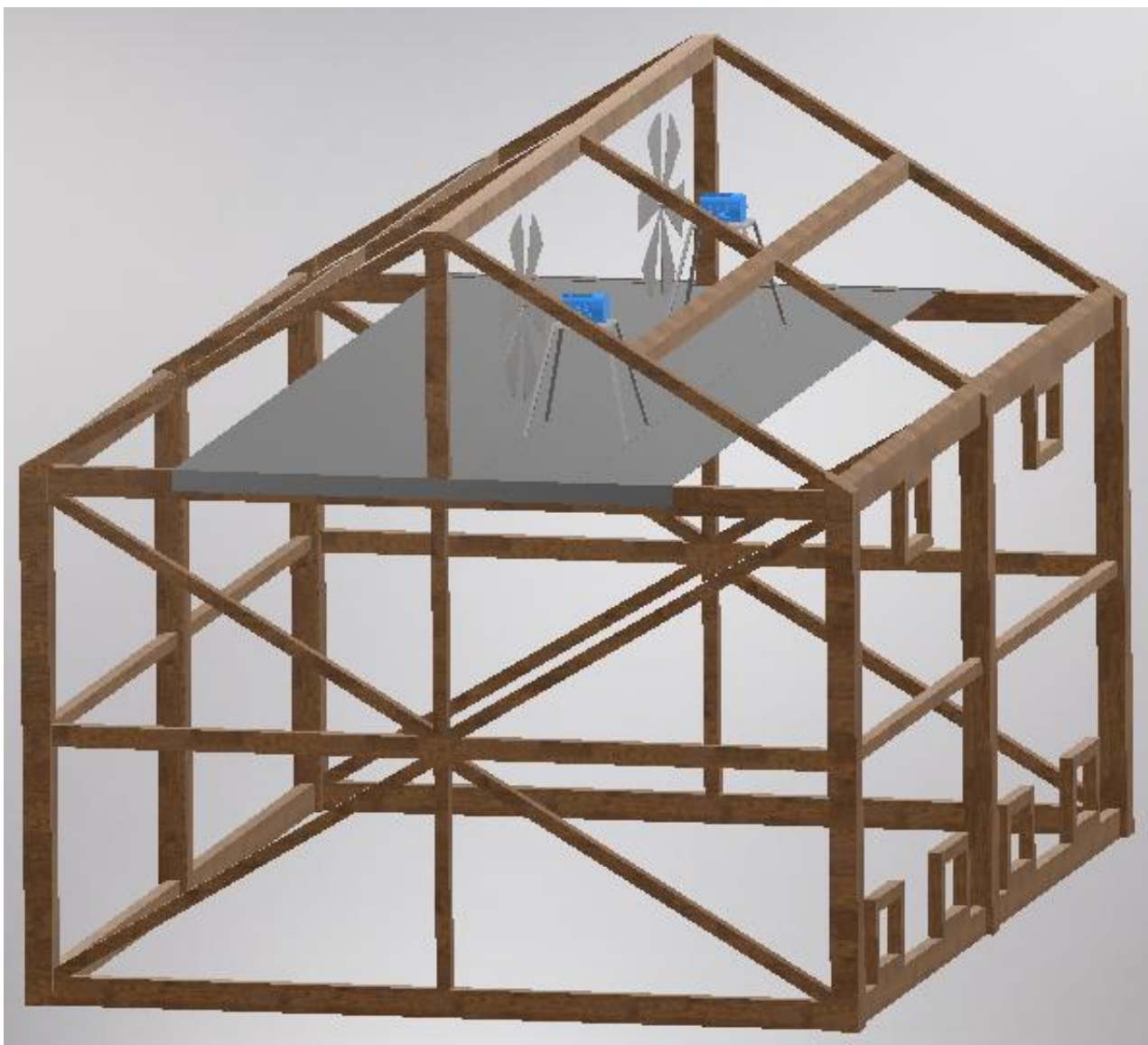
Nota: Elaboración Propia



Nota: Elaboración Propia

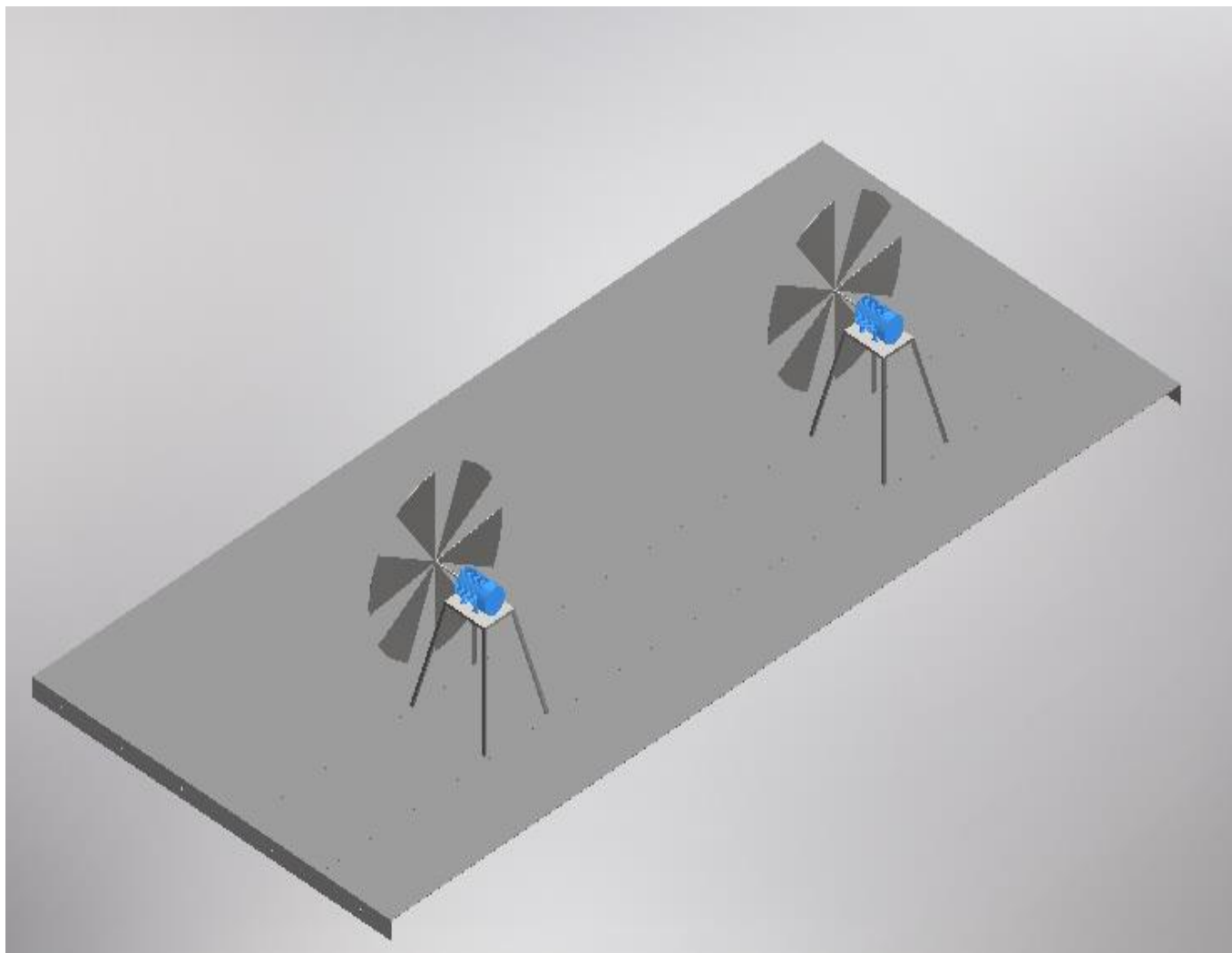
DISEÑO: SECADOR SOLAR PARA MADERA ASERRADA

(3m x 4m x 2,79m)



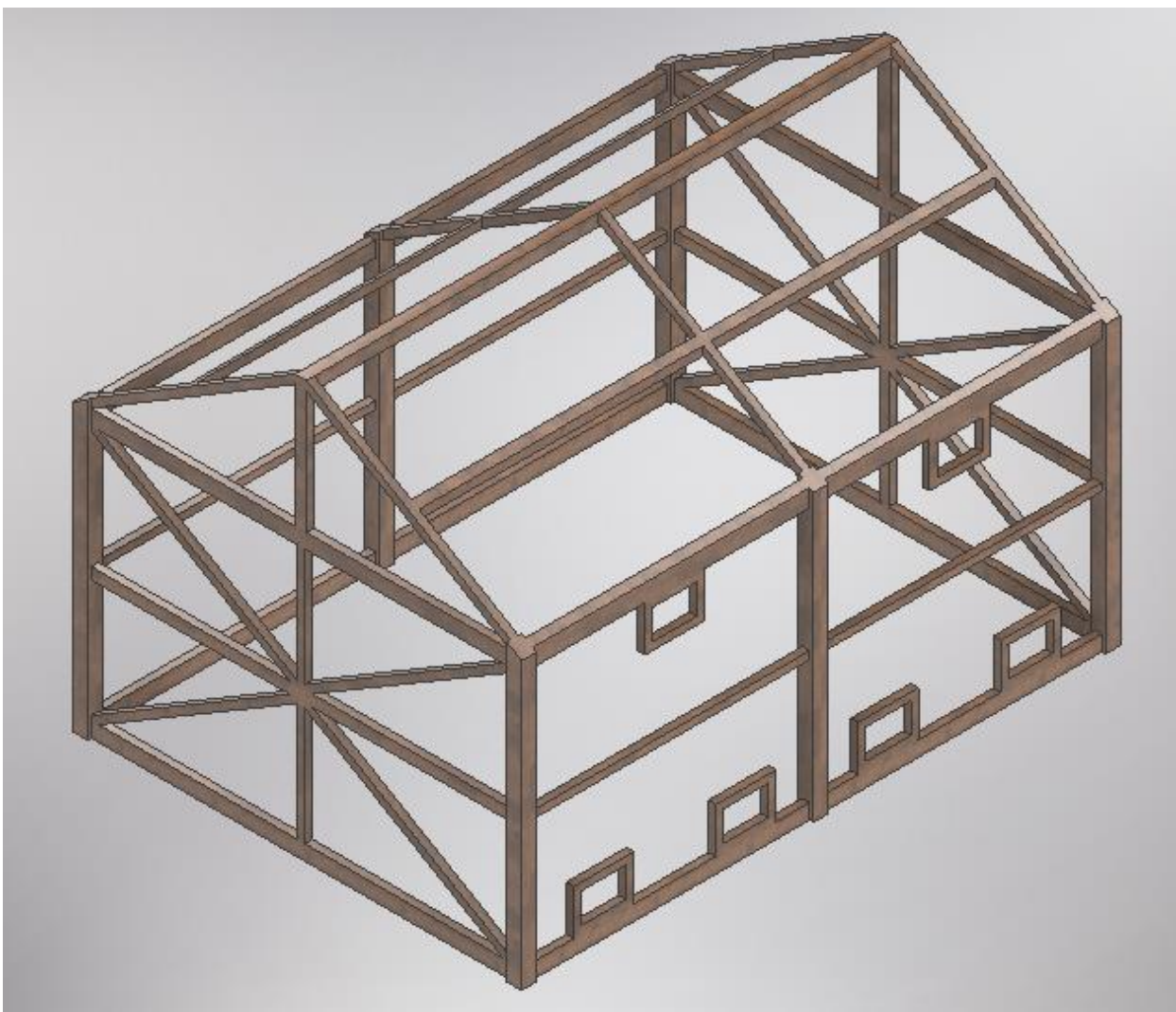
Nota: Elaboración Propia

DISEÑO COLECTOR SOLAR:
MATERIAL CHAPA NEGRA CON SISTEMA DE
VENTILACION (1,80m x 4m)



Nota: Elaboración Propia

DISEÑO: ESTRUCTURA DE MADERA PARA
SECADOR SOLAR



Nota: Elaboración Propia

ANEXO 2

CONSTRUCCION – SISTEMA DE SECADO SOLAR

VISTA: RECUBRIMIENTO CON PLASTICO



ANEXO 3

ACTA DE CONVENIO - ACAMPE

ACTA DE REUNIÓN

Lugar: Cobija Pando
 Fecha: 24/08/2019
 Hora de inicio: 19:25 Hora de finalización: 21:42
 Lugar: 0/ Brisas del Acre

1.- Motivo de la reunion

Socialización de la tesis de investigación sobre proceso de secado de madera aserrada Utilizando secador solar tipo invernadero a cargo del universitario Diego Quisbert Cabrera.

2. Asuntos Abordados

- 1.- Presentación de la investigación sobre secado de madera
- 1.- Construcción de un prototipo del secador solar y su financiamiento.
- 2.- Participación de la asociación con el proyecto.
- 3.- Cronograma tentativo

3.-Conclusiones

La reunión se llevó a cabo en la sede de ACAMPE, con la participación de su directiva y socios activos. El objetivo principal fue presentar una alternativa al problema del secado de la madera y analizar los procesos relacionados con su tratamiento y procesamiento.

Durante la sesión, los acuerdos y mecanismos de desarrollo se orientaron a garantizar la disponibilidad de materia prima destinada al estudio. Asimismo, se abordaron los aspectos técnicos y logísticos necesarios para la ejecución del proyecto, registrándose las observaciones y percepciones de los participantes en relación con el tema de investigación.

Firmas:


 Ing. Jose Manuel Mague.
 Pres. ACAMPE
 COBUA - YDU - BOJIA

ANEXO 4

FOTOGRAFIAS DE SEGUIMIENTO

CONTROL DE HUMEDAD



nota: Elaboración Propia

CONTROL DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA



nota: Elaboración Propia

CONTROL HUMEDAD FINAL



nota: Elaboración Propia

SEGUIMIENTO DE LA HUMEDAD



nota: Elaboración Propia

DEFECTOS DE CALIDAD – POST SECADO (DEFORMACIONES)

nota: Elaboración Propia

DEFECTOS DE CALIDAD-POST SECADO (RAJADURAS)



nota: Elaboración Propia

DEFECTOS DE CALIDAD – POST SECADO (GRIETAS)



nota: Elaboración Propia

CONTROL DE CALIDAD POST SECADO

SECADOR SOLAR

Defectos de calidad en 109 tablones /3m3/1200Pt.

Dato	Torcedura	Abarquillado	Arqueadura	Encorvadura	Rajaduras	Grietas	TOTAL
Lote 1	///	/	///	-	////////	///	15
lote 2	///	/	/	-	///	/	12
lote 3	/	///	/	-	///	///	11

AIRE LIBRE

Defectos de calidad en 109 tablones /3m3/1200Pt.

Dato	Torcedura	Abarquillado	Arqueadura	Encorvadura	Rajaduras	Grietas	TOTAL
Lote 1	////////	///	////////	///	///	////////	35
lote 2							
lote 3							

ESTABILIDAD DIMENCIONAL PERDIDA DE VOLUMEN POST SECADO

SECADOR SOLAR

Lot # 1

M-1	M-2	M-3	M-4	M-5
AXE	AXE	AXE	AXE	AXE
152,10 x 40,30	151,72 x 40,00	151,81 x 40,02	152,00 x 39,62	151,12 x 40,02
151,09 x 38,11	150,00 x 38,20	148,26 x 39,15	150,61 x 38,26	150,14 x 38,20

inicial(mm)
post secado(mm)

Lot # 2

M-6	M-7	M-8	M-9	M-10
AXE	AXE	AXE	AXE	AXE
157,20 x 40,00	156,77 x 40,10	156,72 x 39,20	156,10 x 39,24	157,00 x 39,17
153,14 x 38,12	155,01 x 37,20	152,28 x 38,12	153,40 x 38,14	154,90 x 38,21

inicial(mm)
post secado(mm)

Lot # 3

M-11	M-12	M-13	M-14	M-15
AXE	AXE	AXE	AXE	AXE
157,60 x 39,48	158,01 x 40,07	156,20 x 39,01	158,12 x 39,20	157,00 x 40,01

inicial(mm)
post secado(mm)

AIRE LIBRE

M-1A	M-2A	M-3A	M-4A	M-5A
AXE	AXE	AXE	AXE	AXE
158,20 x 39,02	156,92 x 40,07	157,01 x 39,67	157,80 x 39,01	158,21 x 39,09
158,11 x 38,71	154,92 x 39,96	155,20 x 39,26	156,60 x 38,24	157,14 x 38,20

inicial(mm)
post secado(mm)