UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE SECADOR SOLAR, UTILIZANDO FLUIDOS DE TRANSPORTE DE CALOR Y AISLANTES TÉRMICOS PARA EL SECADO DE MADERA DE BAJA DENSIDAD, REGIÓN UCAYALI, 2019

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE

INGENIERO AMBIENTAL

LUIS MIGUEL LLAMOS TULUMBA

RAÚL YAMIL HIDALGO SANDOVAL

PUCALLPA – PERÚ

2020

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

COMISIÓN DE GRADOS Y TÍTULOS
ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 118

En la ciudad de Pucallpa a las 4:10 pm del día jueves 06 de agosto del 2020, de acuerdo al Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional de Ucayali, se reunieron los miembros del Jurado Evaluador en forma virtual, mediante la plataforma unificada de comunicación y colaboración Microsoft Teams, los mismos que estuvo designados con Memo Múltiple 045-2020-UNU-FCFyA-CGT, conformado por los siguientes docentes:

Dr. Manuel Iván Salvador Cárdenas	Presidente
Dra. María Angélica Flores Romayna	Miembro
Dr. Pedro Aparicio Campos Cabrera	Miembro

Se procedió a evaluar la sustentación de tesis denominado: "**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE SECADOR SOLAR, UTILIZANDO FLUIDOS DE TRANSPORTE DE CALOR Y AISLANTES TÉRMICOS PARA EL SECADO DE MADERA DE BAJA DENSIDAD, REGIÓN UCAYALI, 2019"** presentado por los Bachilleres **LUIS MIGUEL LLAMOS TULUMBA** y **RAÚL YAMIL HIDALGO SANDOVAL,** asesorado por el **Dr. DAVID LEÓN MORENO,** habiendo finalizado la sustentación, se procedió a la formulación de preguntas por parte del jurado evaluador, las que fueron absueltos por los sustentantes en consecuencia la tesis fue **APROBADO POR UNANIMIDAD** y **RECOMENDACIÓN DE PUBLICACIÓN**, quedando expedito para el otorgamiento del **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL**, después de las correcciones respectivas de la tesis. Siendo las 5:53 pm horas del mismo día se da por finalizado el acto académico, firmando los miembros en señal de conformidad.

Dr. Manuel Iván Salvador Cárdenas
Presidente

Dra. María Angélica Flores Romayna
Miembro

Dr. Pedro Aparicio Campos Cabrera
Miembro

ACTA DE APROBACIÓN

La presente tesis fue aprobada por los miembros del Jurado Evaluador de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la Universidad Nacional de Ucayali como requisito para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental.

Dr. Manuel Iván Salvador Cárdenas
Presidente

Dra. María Angélica Flores Romayna
Miembro

Dr. Pedro Aparicio Campos Cabrera
Miembro

Dr. David León Moreno
Asesor

Bach. Luis Miguel Llamos Tulumba
Tesista

Bach. Raúl Yamil Hidalgo Sandoval
Tesista

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI
VICERRECTORADO DE INVESTIGACION
DIRECCION GENERAL DE PRODUCCION INTELECTUAL

CONSTANCIA

ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACION

SISTEMA ANTIPLAGIO URKUND

N° V/029-2020

La **Dirección General de Producción Intelectual**, hace constar por la presente, que el Informe Final (Tesis), Titulado:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE SECADOR SOLAR, UTILIZANDO FLUIDOS DE TRANSPORTE DE CALOR Y AISLANTES TÉRMICOS PARA EL SECADO DE MADERA DE BAJA DENSIDAD, REGIÓN UCAYALI, 2019

Cuyo autor (es)	:	**LLAMOS TULUMBA, LUIS MIGUEL** **HIDALGO SANDOVAL, RAÚL YAMIL**
Facultad	:	CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES
Escuela Profesional	:	INGENIERÍA AMBIENTAL
Asesor(a)	:	Dr. León Moreno, David

Después de realizado el análisis correspondiente en el Sistema Antiplagio URKUND, dicho documento presenta un **porcentaje de similitud de 05%.**
En tal sentido, de acuerdo a los criterios de porcentaje establecidos en el artículo 9 de la DIRECTIVA DE USO DEL SISTEMA ANTIPLAGIO URKUND, el cual indica que no se debe superar el 10%. Se declara, que el trabajo de investigación: SI Contiene un porcentaje aceptable de similitud, por lo que SI se aprueba su originalidad.

En señal de conformidad y verificación se entrega la presente constancia.

Fecha: 06/07/2020

Dra. DINA PARI QUISPE
Dirección General de Producción Intelectual

REPOSITORIO DE TESIS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN DE TESIS

Yo, Luis Miguel Llamos Tulumba

Autor de la TESIS titulada:

"Diseño y Construcción de un Prototipo de Secador Solar, utilizando fluidos de Transporte de calor y Aislantes Térmicos Para el Secado de madera de baja densidad, región Ucayali, 2019"

Sustentada el año: 2020

Con la asesoría de: Dr. David León Moreno

En la Facultad de: Ciencias Forestales y Ambientales

Carrera Profesional de: Ingenieria Ambiental

Autorizo la publicación de mi trabajo de investigación en el Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Ucayali, bajo los siguiente términos: Primero: otorgo a la Universidad Nacional de Ucayali licencia no exclusiva para reproducir, distribuir, comunicar, transformar (únicamente mediante su traducción a otros idiomas) y poner a disposición del público en general mi tesis (incluido el resumen) a través del Repositorio Institucional de la UNU, en forma digital sin modificar su contenido, en el Perú y en el extranjero; por el tiempo y las veces que considere necesario y libre de remuneraciones. Segundo: declaro que la tesis es una creación de mi autoría y exclusiva titularidad, por tanto me encuentro facultado a conceder la presente autorización, garantizando que la tesis no infringe derechos de autor de terceras personas. Tercero: autorizo la publicación,

- [x] Total (significa que todo el contenido de la tesis en PDF será compartido en el repositorio).
- [ ] Parcial (significa que solo la carátula, la dedicatoria y el resumen en PDF serán compartidos en el repositorio).

De mi TESIS de investigación en la página web del Repositorio Institucional de la UNU.

En señal de conformidad firma la presente autorización.

Fecha: 27 / 11 / 2020



Email: luismi_u_29@hotmail.com Firma:

Teléfono: 934 513 899 DNI: 76085503

REPOSITORIO DE TESIS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN DE TESIS

Yo, RAÚL YAMIL HIDALGO SANDOVAL

Autor de la TESIS titulada:

«DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE SECADOR SOLAR, UTILIZANDO FLUIDOS DE TRANSPORTE DE CALOR Y AISLANTES TÉRMICOS PARA EL SECADO DE MADERA DE BAJA DENSIDAD, REGIÓN UCAYALI, 2019 »

Sustentada el año: 2020

Con la asesoría de: DR. DAVID LEÓN MORENO

En la Facultad de: CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES

Carrera Profesional de: INGENIERIA AMBIENTAL

Autorizo la publicación de mi trabajo de investigación en el Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Ucayali, bajo los siguiente términos: Primero: otorgo a la Universidad Nacional de Ucayali licencia no exclusiva para reproducir, distribuir, comunicar, transformar (únicamente mediante su traducción a otros idiomas) y poner a disposición del público en general mi tesis (incluido el resumen) a través del Repositorio Institucional de la UNU, en forma digital sin modificar su contenido, en el Perú y en el extranjero; por el tiempo y las veces que considere necesario y libre de remuneraciones. Segundo: declaro que la tesis es una creación de mi autoría y exclusiva titularidad, por tanto me encuentro facultado a conceder la presente autorización, garantizando que la tesis no infringe derechos de autor de terceras personas. Tercero: autorizo la publicación,

- [x] Total (significa que todo el contenido de la tesis en PDF será compartido en el repositorio).
- [ ] Parcial (significa que solo la carátula, la dedicatoria y el resumen en PDF serán compartidos en el repositorio).

De mi TESIS de investigación en la página web del Repositorio Institucional de la UNU.

En señal de conformidad firma la presente autorización.

Fecha: 27 / 11 / 2020

Email: raulyamil123@gmail.com

Firma: 

Teléfono: 959 094 731

DNI: 74843169

DEDICATORIA

A mi madre, Marina Tulumba Vásquez, por ser el pilar más importante y al mismo tiempo brindarme su apoyo incondicional, impulsándome día a día a salir adelante.

A mi padre Román Llamos Oblitas, quien se esforzó día a día, contribuir con mi formación profesional y personal, guiándome y aconsejándome para seguir por el buen camino.

A mi hermano Yan Piero, Llamos Tulumba, a pesar de nuestra distancia física, siento que estás conmigo siempre y aunque nos faltaron muchas cosas por vivir juntos, sé que este logro hubiera sido tan especial para el como lo es para mí. A mis hermanos Arian Enrique y Thiago Aarón por darme motivos para seguir progresando.

Luis Miguel.

A mi madre, Elisa Sandoval Pacheco, por todo el apoyo brindado antes y durante de este largo proceso de aprendizaje, además de alentarme a seguir adelante.

A mis abuelos, el Sr. Luis Javier Sandoval Timana y la Sra. Eva azucena pacheco torres, por ser un pilar fundamental en mi formación personal y profesional, con su aliento para cumplir mis metas.

A Dios, porque todas las metas que he alcanzado son por su voluntad.

Raúl Yamil.

AGRADECIMIENTO

A nuestro asesor, Dr. David León Moreno, por sus enseñanzas y técnicas de aprendizaje, dándonos a conocer diferentes métodos y herramientas para solucionar un problema.

A nuestro Co-asesor, Ing. Diego García Soria por la oportunidad de participar en su proyecto y poder realizar nuestra tesis, por su apoyo y consideración hacia nuestra persona.

Al Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana-IIAP, área de PRO BOSQUES a cargo del Ing. Diego García Soria, por el financiamiento de nuestra tesis y por habernos elegido para participar en el desarrollo de su proyecto de innovación en energías renovables.

A la Universidad Nacional de Ucayali, por ser nuestra alma mater, la casa de estudios donde aprendí a crecer profesionalmente, y que a pesar de las adversidades uno debe mostrar siempre compromiso y respeto hacia los demás. De la misma manera nos inculco buenos valores.

A los docentes de la escuela profesional de Ingeniería Ambiental, por compartir sus conocimientos y experiencias, por sus enseñanzas y motivaciones a seguir superándose profesional y personalmente, así como también desarrollar habilidades de liderazgo.

A los trabajadores del Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana-IIAP, por estar ahí compartiendo sus conocimientos y apoyo incondicional.

ÍNDICE DEL CONTENIDO

DEDICATORIA ..... **vi**
AGRADECIMIENTO ..... **viii**
RESUMEN ..... **xv**
INTRODUCCIÓN **1**
CAPITULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA **3**
1.1. Formulación del problema 3
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO **5**
2.1. Antecedentes del problema 5
2.1.1. Secado de madera en secadores solares. 5
2.2. Climatología en la Región Ucayali 7
2.3. Radiación solar 7
2.3.1. Tipos de radiación solar 8
2.4. El calor 9
2.5. Transferencia de calor 9
2.6. Tipos de sistemas solares térmicos 10
2.7. Geometría solar 11
2.7.1. Angulo de salida del sol: 12
2.7.2. Factor de excentricidad: 13
2.7.3. Radiación extraterrestre superficie horizontal 13
2.7.4. Índice de claridad 13
2.7.5. Fracción difusa 13
2.7.6. Irradiación difusa horizontal sobre la superficie de la tierra 14
2.7.7. Radiación solar directa sobre una superficie inclinada. 14
2.7.8. Factor de corrección de la radiación directa. 14
2.8. Secadores solares para el secado de madera 14
2.8.1. Cámara de secado 16
2.8.2. Diseño del secador solar 18
2.8.3. Clasificación de las cámaras de secado por su aporte de calor 21
2.9. Secado de la madera 23
2.9.1. Ventajas de secado de la Madera 24
2.9.2. Programas de Secado 24
2.9.3. Métodos de secado de la madera 25
2.10. Concentradores térmicos 29
2.10.1. Concentradores térmicos cilíndricas parabólico (CCP). 29

2.10.2. Concentrador térmico plano 38
2.11. Transferencia de calor en los concentradores térmicos 41
2.11.1. Conducción 42
2.11.2. Radiación térmica 43
2.11.3. Convección 44
2.12. Fluidos de trasporte de calor. 45
2.12.1. Aceite residual de motor 45
2.12.2. Salmuera 46
2.13. Aislantes térmicos 47
2.13.1. Cascarilla de arroz como aislante térmico 47
2.13.2. Aserrín de madera como aislante térmico 48
2.14. Humedad de la madera 48
2.14.1. Método gravimétrico o por diferencia de peso 49
2.14.2. Métodos eléctricos 49
DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS 51
CAPITULO III. METODOLOGÍA 53
3.1. Método de investigación 53
3.2. Población y muestra 53
3.3. Procedimiento de recolección de datos 53
3.3.1. Construcción del prototipo de secador solar con concentradores térmicos para el secado de madera de baja densidad. 53
3.3.2. Evaluación y selección del fluido de transporte de calor y aislante térmico que conserve y resiste el flujo de calor para obtener mayor temperatura dentro de la cámara de secado 71
3.3.3. Validación de la eficiencia del secador solar en el secado de madera de baja densidad aprovechando la radiación solar. 75
3.4. Técnicas e instrumentos para recolección de datos 77
3.4.1. Técnica 77
3.4.2. Instrumentos 77
3.5. Procesamiento para recolección de datos 78
3.6. Tratamiento de datos 78
CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 79
4.1. Construcción del prototipo de secador solar con concentradores térmicos para el secado de madera de baja densidad. 79
4.1.1. Dimensiones y características de la cámara del prototipo. 79

4.1.2. Diseño y dimensiones del concentrador térmico cilíndrico parabólico (CCP) y concentrador térmico plano. 80

4.1.3. Rendimiento del concentrador térmico cilíndrico parabólico y plano. 81

4.2. Evaluación y selección del fluido de transporte de calor y aislante térmico que conserve y resiste el flujo de calor para obtener mayor temperatura dentro de la cámara de secado. 83

4.2.1. Prueba N° 01 (Testigo). 83

4.2.2. Prueba N° 02 (AM-ARM) 84

4.2.3. Prueba N°03 (AM-S) 85

4.2.4. Prueba N°04 (CA-ARM) 87

4.2.5. Prueba N°05 (CA-S) 88

4.2.6. Determinación estadística de la prueba eficiente 89

4.3. Validación de la eficiencia del secador solar en el secado de madera de baja densidad aprovechando la radiación solar. 91

4.3.1. Comportamiento de la humedad relativa del aire dentro de la cámara durante el secado de madera. 91

4.3.2. Reducción del porcentaje de Humedad de la madera 93

CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 96

5.1. Conclusiones 96

5.2. Recomendaciones 97

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 98

ANEXOS 103

1. Presupuesto 103

2. Radiación solar. 105

2.1. Propiedades de la radiación solar directa. 105

2.2. Radiación solar directa horizontal y radiación directa en un plano inclinado. 105

3. Energía solar incidente sobre el concentrador térmico cilíndrico parabólico (CCP) 106

4. Energía térmica útil suministrada por el concentrador térmico cilíndrico (CCP) 106

5. Iconografía ..... **¡Error! Marcador no definido.**

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2 Caracterización de aceite usado de motores reciclados F-2 y F-1 45
Tabla 3 Composición química de la cascarilla de arroz 47
Tabla 4 Relación del foco con su respectiva coordenada de abertura máxima 55
Tabla 5 Distribución de las pruebas.....73
Tabla 6 Especificaciones y dimensiones de la cámara del prototipo de secador solar 79
Tabla 7 Especificaciones y dimensiones del Concentrador térmico cilíndrico parabólico.....80
Tabla 8 Especificaciones y dimensiones del Concentrador térmico plano 81
Tabla 9 Rendimiento del concentrador térmico cilíndrico parabólico (CCP) durante los meses de septiembre, octubre y noviembre del 2019 82
Tabla 10 Eficiencia del concentrador térmico plano durante los meses de septiembre, octubre y noviembre del 2019 82
Tabla 11 Prueba ANVA para comparar medias de temperatura para las pruebas de Testigo, ARM/AM, S/MA, ARM/CA y S/CA. 89
Tabla 12 Prueba de Tukey HSD para las temperaturas en la prueba Testigo, ARM/AM, S/MA, ARM/CA y S/CA 90
Tabla 13 Regresión lineal y ecuación de la curva de la reducción de humedad 93
Tabla 14 Presupuesto del proyecto 103
Tabla 15 Radiación solar directa durante los meses de septiembre, octubre y noviembre del 2019.....105
Tabla 16 Radiación solar directa sobre un plano horizontal e inclinado durante los meses de septiembre, octubre y noviembre del 2019 105
Tabla 17 Radiación solar incidente sobre el concentrador térmico cilíndrico parabólico (CCP).....106
Tabla 18 Energía térmica útil suministrada por el concentrador térmico cilíndrico (CCP) 106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Radiación solar en la región Ucayali 8
Figura 2 Transferencia de calor.....10
Figura 3 Sistema de circulación natural y forzada.....11
Figura 4 Radiación solar 11
Figura 5 Funcionamiento de un secador solar. 16
Figura 6 Partes de un secador solar 18
Figura 7 Arreglo de prismas y tablas en la pila de secado de madera al aire libre. (a) Dimensiones de la pila en el plano horizontal (b). 26
Figura 8 Horno convencional para el secado de madera. 28
Figura 9 Horno Solar 29
Figura 10 Perfil de la superficie captadora 30
Figura 11 Segmento de cálculo.....31
Figura 12 Esquema de las relaciones y distancias dentro del perfil del CCP...32
Figura 13 Proyección del disco solar sobre el absorbedor 33
Figura 14 Concentradores cilíndricas.....33
Figura 15 Colector cilíndrico.....34
Figura 16 Concentrador térmico plano 39
Figura 17 Concentrador cilíndrico parabólico 42
Figura 18 Determinación de contenido de humedad por método gravimétrico 49
Figura 19 Determinación de contenido de humedad por método eléctrico 50
Figura 20 Diseño y dimensiones de la cámara de secado 54
Figura 21 Perfil del canal parabólico en metros 55
Figura 22 Construcción del concentrador cilíndrico parabólico 56
Figura 23 Construcción de concentrador plano.....57
Figura 24 Perfil del tubo receptor 58
Figura 25 Lugar de instalación del prototipo de secador solar 59
Figura 26 Construcción de techo, puerta y paredes.....60
Figura 27 Construcción de piso.....61
Figura 28 Armado de cámara.....61
Figura 29 Instalación de concentradores térmicos en el prototipo 62
Figura 30 Instalación de electro bomba 62
Figura 31 Instalación de radiador y ventiladores.....63
Figura 32 Sistemas de tuberías.....63
Figura 33 Sistema de control.....64
Figura 34 Software informático PvSyst 65
Figura 35 Fluidos de transporte de calor.....71
Figura 36 Aislante térmico.....72
Figura 37 Equipos de medición.....74
Figura 38 Extracción y procesamiento de la especie seleccionada Guazuma crinita 75
Figura 39 Apilado de tablillas 76
Figura 40 Secado de madera.....77

Figura 41 Rendimiento de los concentradores térmicos solares 83
Figura 42 Comportamiento de la temperatura dentro de la cámara de secado84
Figura 43 Comportamiento de la temperatura en el interior de la cámara 85
Figura 44 Comportamiento de la temperatura en el interior de la cámara 86
Figura 45 Comportamiento de la temperatura en el interior de la cámara 87
Figura 46 Comportamiento de la temperatura en el interior de la cámara 88
Figura 47 Comportamiento de la humedad relativa del aire dentro de la cámara 92
Figura 48 Reducción del contenido de humedad de la Guazuma crinita, Mart. 93
Figura 49 Construcción del piso 107
Figura 50 Fabricación de paredes techo y puerta 107
Figura 51 Construcción del CCP 108
Figura 52 Construcción del concentrador térmico plano 108
Figura 53 Armado de la cámara de secado 109
Figura 54 Instalación de los concentradores 109
Figura 55 Instalación de la bomba y sistema de recirculación 110
Figura 56 Tablillado de la madera Guazuma crinita 110
Figura 57 Emparrillado de las tablillas dentro de la cámara 111
Figura 58 Monitoreo de temperatura 112
Figura 59 Monitoreo de la humedad de la madera 111
Figura 60 Control de reducción de humedad de la madera 112

RESUMEN

El proyecto de investigación tuvo como finalidad demostrar que el uso de aceite residual como fluido de transporte de calor y el uso de cascarilla de arroz como aislante térmico es una alternativa eficiente para el aprovechamiento en mayor plenitud de la energía solar. Para ello se diseñó y se construyó un prototipo de secador solar conformado por un concentrador térmico solar plano y un concentrador térmico cilíndrico parabólico (CCP), seguidamente se realizó las pruebas en días donde las condiciones climatológicas fueron estables, donde finalmente se validó el prototipo mediante el secado de *Guazuma crinita,* Mart. (Bolaina blanca), lo cual fue monitoreado por un Higrómetro de contacto.

Se realizaron cinco pruebas (05), la primera prueba fue considerado como testigo, en la que no se usó fluido de transporte de calor y aislantes térmicos, y en las cuatros (04) pruebas siguientes se combinó dos (02) tipos de fluidos de trasporte de calor (aceite residual de motor y salmuera) y dos (02) tipos de aislantes térmicos (aserrín de madera y cascarilla de arroz), obteniendo como resultado que la prueba más eficiente fue la numero tres (03) conformado por aceite residual de motores como fluido de transporte de calor y cascarilla de arroz como aislante térmico, con estos componentes se obtuvo una temperatura máxima de 48 °C dentro de la cámara lo cual ascendía durante el día, y descendía durante la noche a 30°C por encima de la temperatura ambiente.

Con la prueba más eficiente se procedió a validar el prototipo mediante el secado de madera de baja densidad, logrando reducir de 45.8% a 12.3% de humedad de la madera en diez (10) días soleados.

Palabras claves:

Aislantes térmicos, Concentrador térmico cilíndrico parabólico (CCP), Concentrador térmico plano, fluidos de transporte de calor y radiación solar.

SUMMARY

The purpose of the research project was to demonstrate that the use of residual oil as a heat transport fluid and the use of rice husk as a thermal insulator is an efficient alternative for the full use of solar energy. For this, a prototype solar dryer was designed and constructed, consisting of a flat solar thermal concentrator and a parabolic cylindrical thermal concentrator (CCP), then the tests were carried out on days where the weather conditions were stable, where the prototype was finally validated by The drying of *Guazuma crinita,* Mart. (Bolaina blanca) , which was monitored by a contact hygrometer.

Five (05) tests were performed, the first test was considered as a control, in which no heat transport fluid and thermal insulators were used, and in the following four (04) tests two (02) types of heat transport fluids (residual motor oil and brine) and (02) types of thermal insulators (wood sawdust and rice husk), obtaining as a result that the most efficient test was (03) consisting of residual motor oil as heat transport fluid and rice husk as thermal insulator , with these components a maximum temperature of 48 ° C was obtained inside the chamber which rose during the day, and descended overnight at 30 ° C above room temperature.

With the most efficient test, the prototype was validated by drying low density wood, reducing the humidity of the wood from 45.8% to 12.3% in ten (10) sunny days.

Keywords:

Thermal insulators, Parabolic cylindrical thermal concentrator (CCP), Flat thermal concentrator, heat transport fluids and solar radiation.

INTRODUCCIÓN

El proyecto de investigación atiende una problemática enfocado en la creciente demanda de energía no renovables tales como energía eléctrica, combustibles fósiles, leña, carbón, entre otros, usados para el funcionamiento de secadores industriales, contribuyendo de una u otra forma a generar mayor impacto hacia el ambiente (calentamiento global) y a la salud de las personas (Echagüe, 1997). A raíz de ello nace la necesidad de aprovechar fuentes de energía renovable, como la energía solar aprovechada mediante concentradores térmicos y el uso de fluidos de transporte de calor y aislantes térmicos (aceite residual de motores y cascarilla de arroz) con la finalidad de secar madera.

La importancia del proyecto se refleja en el aprovechamiento de radiación solar, dicha energía es emitida por el sol, que, al llegar a la superficie terrestre, sufre un proceso de debilitamiento por la difusión, reflexión en las nubes, absorción por las moléculas de gases (como el ozono y el vapor de agua) y por las partículas en suspensión (Pardo & Tacury, 2009). Para aprovechar en mayor plenitud la energía solar directa en el secado de madera fue necesario construir un concentrador térmico plano y un concentrador cilíndrico parabólico, al mismo tiempo el uso de aceite residual de motor como fluido de transporte de calor y la cascarilla de arroz como aislante térmico en una cámara de secado.

Para el proyecto de investigación se realizó cinco pruebas, donde la prueba uno (01) fue el testigo y las siguientes cuatro (04) pruebas se usó dos (02) tipos de fluidos de transporte de calor y dos (02) tipos de aislantes térmicos, logrando ser el más eficiente la prueba cuatro (04) conformado por aceite residual de motores y cascarilla de arroz. El aceite residual de motores fue usado como fluido de transporte de calor recirculado por todo el circuito de tuberías, impulsándolo con una electrobomba de marca “Enzo”, cuya capacidad fue de 0.5 hp, mientras que la cascarilla de arroz fue usada como aislante térmico teniendo una conductividad térmica de 0.036 W/m.K y una resistencia térmica de 1.411 m^2 K/W (Gutiérrez, Cadena, & Bula, 2013), logrando obtener una temperatura de 48°C durante el día y descendiendo a 30°C durante la noche. Finalmente, la humedad reducida de la madera fue de 12.3% en diez (10) días.

El proyecto de investigación tiene como objetivo general diseñar y construir un prototipo de secador solar, para secar madera de baja densidad, aprovechando la radiación solar y utilizando fluidos de transporte de calor y aislantes térmicos; y como objetivos específicos: Construir un prototipo de secador solar con concentradores térmicos para el secado de madera de baja densidad; evaluar y seleccionar el fluido de transporte de calor y el aislante térmico que conserve y resiste el flujo de calor para obtener mayor temperatura dentro de la cámara de secado, y como tercer y último objetivo específico, validar la eficiencia del secador solar en el secado de madera de baja densidad aprovechando la radiación solar.

CAPITULO I
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Formulación del problema

El contenido de humedad de la madera es uno de los parámetro más importante a considerar según el propósito correspondiente, actualmente se utilizan secadores industriales para satisfacer estrictamente las exigencias de los mercados internacionales, que se orientan crecientemente hacia madera seca (Gómez & Ramirez, 2006).

El secado de madera es un proceso dentro de las industrias de procesamiento de la madera que permite reducir la humedad a una óptima de 8 a 10 % (Córdova, 2005). Sin embargo, el uso de secadores industriales que se alimentan de energía no renovable, contribuyen de una u otra manera al calentamiento global.

Así mismo, los residuos generados por la industria maderera (aserrín), alimentaria (cascarilla de arroz) y automotriz (aceite residual de motores); no tienen un manejo adecuado según sus clasificaciones; siendo muchas veces utilizados como combustibles en calderas u otras tecnologías de combustión, afectando directamente al ambiente con emisiones de CO_2 y demás Gases de Efecto Invernadero (GEI) que se desprenden de estos compuestos.

Actualmente la región Ucayali cuenta con la gran, mediana y pequeña empresa de procesamiento de la madera donde en su mayoría se utilizan hornos convencionales para el secado de este recurso. Los hornos convencionales hacen uso de energía eléctrica, combustibles fósiles y otros combustibles tales como la leña y carbón.

En el proyecto de investigación se planteó como problema general y específicos los siguientes:

General

- ¿Es posible diseñar y construir un prototipo de secador solar, para secar madera de baja densidad, aprovechando la radiación solar y utilizando fluidos de transporte de calor y aislantes térmicos?

Especificas

- ¿Cómo aprovechar la radiación solar para secar madera de baja densidad?
- ¿Cuál es el fluido de transporte de calor y aislante térmico que conserve y resiste el flujo de calor para obtener mayor temperatura dentro de la cámara de secado?
- ¿Cuál es la eficiencia del secador solar, en el secado de madera de baja densidad aprovechando la radiación solar?

CAPITULO II
MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del problema

2.1.1. Secado de madera en secadores solares.

Los sistemas de secado de la madera compuesta por concentradores térmicos como suministro de calor son tecnologías aun prematuras a nivel nacional, lo cual se ha visto que la mayoría de las industrias de procesamiento de la madera utilizan secadores que para su funcionamiento se alimentan de energía eléctrica o leña (desperdicios de madera generado en la propia industria o adquiridos de otras fuentes) lo cual generan un impacto notable al ambiente y a la salud de las personas (Gómez & Ramírez, 2006).

No obstante, en el plano internacional, secadores de madera alimentado por concentradores térmicos, está en constante investigación para mejorar la eficiencia de los diseños, para capturar y conservar en mayor totalidad la radiación solar para usarse como energía que permita el secado de la madera (Gómez & Ramírez, 2006). Existen diversos proyectos de investigaciones relacionados al tema de secadores solares y concentradores térmicos, uno de ellos es planteado (Herrera, Ruiz, Santiago, & Sarmiento, 2017), que conjuntamente con el Instituto de estudios ambientales de la Universidad de la sierra Juárez, elaboraron un secador solar como alternativa de bajo costo para secar madera aserrada en la sierra de Juárez, Oaxaca, donde secaron 1.7 m^3 de madera de *Pinus sp,* de 25 mm de espesor, 1.8 m de largo y anchos variables

. La estructura del secador se construyó con tubos metálicos y reforzó con bastidores de madera. La cámara de secado se construyó con plástico tipo invernadero y en conjunto el secador quedó ensamblado sobre un piso de concreto de 10 cm de grosor, en donde la madera alcanzó un contenido de humedad por debajo del 12% en dieciséis (16) días. Otro estudio importante es el “Diseño y ensayo de un secador solar para madera” realizado por (Martinez & Pinillos , 1997), donde secaron madera *Pinus sp*, 1200 pies/tabla de 1 pulg. de grueso y varios anchos, alcanzando una humedad de 10% en once (11) días, 8% en quince (15) días respectivamente, con una temperatura promedio de 39.8°C en el interior de la cámara de secado.

También es relevante el estudio de investigación realizo por Muñoz (2015), denominado “Evaluación de la respuesta al secado de madera de caoba *(Swietenia macrophylla King)* en el horno solar de la Unidad de Forestales de Zamorano-Honduras”, donde el horno solar fue elaborado a base de plywood recubierto con pintura negra anticorrosiva. El techo fue una lámina de acrílico montado en un armazón de hierro fundido, que forma el espacio para el colector de calor. Para aprovechar la mayor incidencia de los rayos solares, el horno solar estuvo orientado de norte a sur, en esta cámara de secado se secó un volumen de caoba de 94.75 pie^3, lo cual fueron necesarias 45 horas sol, que corresponden a 5 días de secado, para obtener una humedad de 10% en la madera tratada. Se encontró que el horno solar presenta una temperatura mínima de 28 °C a las siete (07) de la mañana, teniendo su temperatura máxima a la una (01) de la tarde con 49 °C.

Respecto a los estudios de concentradores térmicos plano, un estudio muy importante es de (Pardo & Tacury, 2009), cuyo proyecto de investigación fue denominada “Diseño, construcción y monitoreo de un sistema de secado de arroz por aire forzado con fuente de energía solar utilizando aceite térmico en la piladora de arroz “don lucho” en el cantón macará”, donde su concentrador térmico plano estuvo conformado por placas y los tubos de aluminio, con una caja o carcasa de tol galvanizadas con dos cubiertas de vidrio cada una, con aislante de lana de vidrio, con tanque de reserva debidamente aislado con lana de vidrio y espuma fléx, con tubería de polietileno de ½, haciendo una área de 1 m^2 y alcanzando un rendimiento de 40%.

Respecto a los estudios de concentradores térmicos cilíndrico parabólico (CCP), también podemos encontrar de (Paredes C. ,2012), cuyo proyecto de investigación fue “Diseño de captador solar cilíndrico parabólico para aplicaciones rurales en Paraguay”, donde se construyó un concentrador cilíndrico parabólico de plancha de aluminio cuyas dimensiones son de 3 por 1.2 metros. Se toma el lado de 1.20 m como lado curvo de parábola puesto que estructuralmente es más sencillo un soporte para una abertura menor, finalmente la parábola definitiva tuvo las dimensiones siguientes: foco es igual a 0.30 metros, lado curvo es igual a 1.2 metros y lado recto a 0.78 metros. Finalmente, dicho diseño logro un rendimiento de 70%.

2.2. Climatología en la Región Ucayali

En la región Ucayali pueden presenciarse tres pisos naturales: la selva baja (0 a 500 msnm), que representa el 86% de la superficie; la selva alta (500 a 1000 msnm) en las provincias de Atalaya y Padre Abad; y la ceja de selva (sobre los 1000 msnm), ubicada al norte de la región y que se caracteriza por ser muy accidentada debido a la presencia de la Cordillera Azul (Perú Travel, 2017). Tiene montañas de laderas abruptas y valles encajonados. El clima de la ciudad de Pucallpa, capital de la región, es lluvioso y cálido, con presencia de lluvias en tres estaciones (otoño, primavera y verano). La temperatura promedio anual es de 26ºC, siendo la máxima de 38ºC y la mínima de 21ºC. La temporada de mayores lluvias es de diciembre a abril. Generalmente, en junio se presenta un fenómeno climático conocido como los “fríos de San Juan”, que dura de 3 a 4 días, con temperaturas que descienden y bordean entre los 12ºC y 16ºC (Perú Travel, 2017).

Tabla 1. Clima en la Región Ucayali

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T media (°C)	27	26.6	26.5	26.3	25.7	25.3	25.4	26.2	27	26.9	26.6	27.1
T mínima (°C)	21.7	21.7	21.4	21.4	20.5	19.7	19.2	19.6	20.6	21.3	21.3	21.7
T máxima (°C)	32.3	31.6	31.7	31.2	31	31	31.6	32.8	33.4	32.6	32	32.6
´Precipitación (mm)	158	183	217	178	111	78	49	67	105	165	190	166

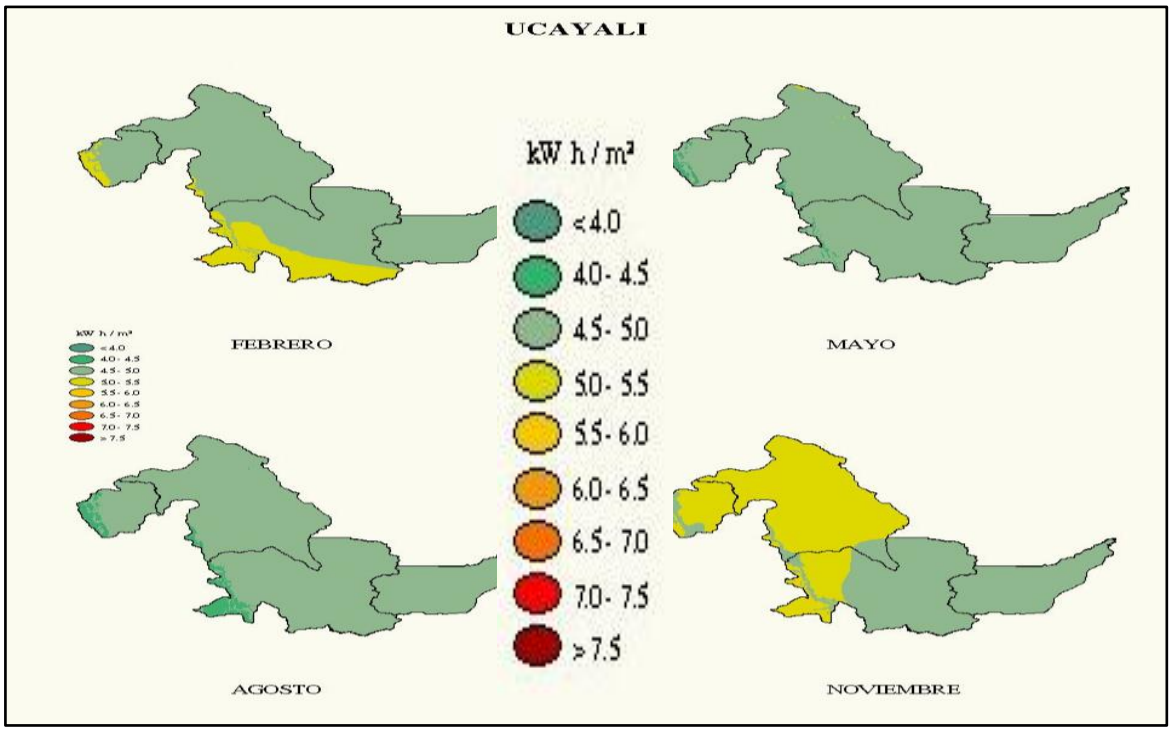
Fuente: Tomado de Senamhi, 2018.

2.3. Radiación solar

Se considera la radiación solar como la energía emitida por el Sol, que se dispersa en todas las direcciones del espacio mediante ondas electromagnéticas. Pardo & Tacury, (2009) menciona que el sol emite energía en forma de radiación de onda corta. Después de pasar por la atmósfera, donde sufre un proceso de debilitamiento por la difusión, reflexión en las nubes y de absorción por las moléculas de gases (como el ozono y el vapor de agua) y por partículas en suspensión, la radiación solar alcanza la superficie terrestre oceánica y continental que la refleja o la absorbe.

Por otro lado, también se toma en cuenta la cantidad de radiación absorbida por la superficie, ello es devuelto al espacio en forma de radiación onda larga, lo cual se refleja en el calor presente en la atmosfera (Inzunza, 2000)

La cantidad de radiación solar que se emite por el sol es 1350 W/m2 este valor es constante (Inzunza, 2000), sin embargo, cuando la radiación atraviesa la atmosfera de la tierra sufre perdidas de radiación solar por dispersión y absorción, esto es debido a la presencia de las partículas de polvo y agua en las nubes (Inzunza, 2000).



Fuente: Adaptado de Radiación solar por departamento (Delat Volt, 1975)

Figura 1. Radiación solar en la región Ucayali

2.3.1. Tipos de radiación solar

La radiación solar se clasifica en los siguientes enunciados:

- **Radiación directa**. - La radiación solar directa sigue una trayectoria recta (con mínimas desviaciones al atravesar la atmósfera terrestre), es decir, sigue una dirección (proviniendo del sol), y como su propio nombre lo dice, este tipo de radiación llega a la superficie terrestre en línea recta (Chambi, 2018).

- **Radiación difusa**. – este tipo de radiación al entrar en contacto con la atmosfera se difunden y se dispersan, por lo que sufre cambios de dirección (Chambi, 2018).
- **Radiación de albedo**. – es la radiación que procede de los cuerpos presentes en la superficie terrestre, ellos pueden ser edificios, suelo, entre otros cuerpos (Chambi, 2018).

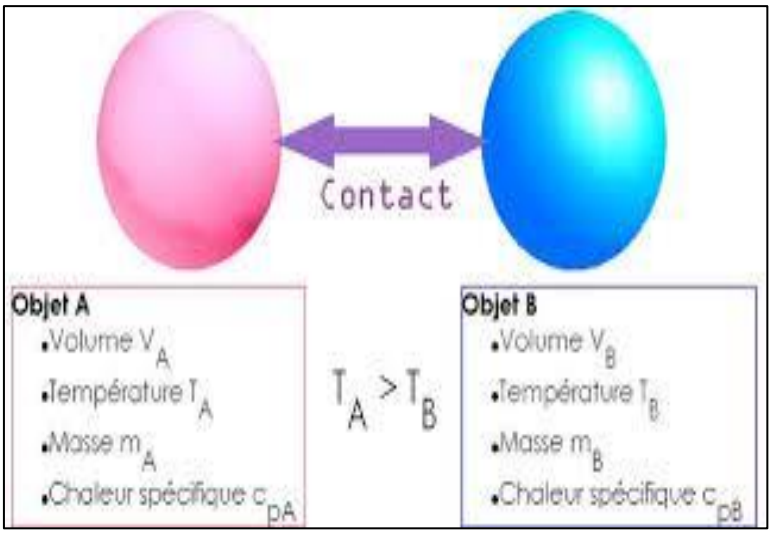
2.4. El calor

El calor es una forma de intercambio energético entre el sistema y sus alrededores debida a una diferencia de temperatura. Los sistemas termodinámicos no poseen calor, poseen energía, y una de las formas en que intercambian esta energía es el calor (Chambi, 2018).

El calor siempre fluye desde el cuerpo de mayor temperatura al de menor temperatura, hasta alcanzar el equilibrio térmico.

2.5. Transferencia de calor

La transferencia de calor no solo puede causar cambios de temperatura, también puede dar lugar a cambios en el estado de agregación de la materia, fusión de sólidos, vaporización de líquidos. Durante estos cambios de fase la temperatura permanece constante, empleándose la energía calorífica en vencer las fuerzas de interacción entre las moléculas que componen en sólido, en el caso de la fusión. En la vaporización la energía calorífica se utiliza para vencer las fuerzas entre moléculas de líquido y permitir que pasen a fase vapor (Chambi, 2018).



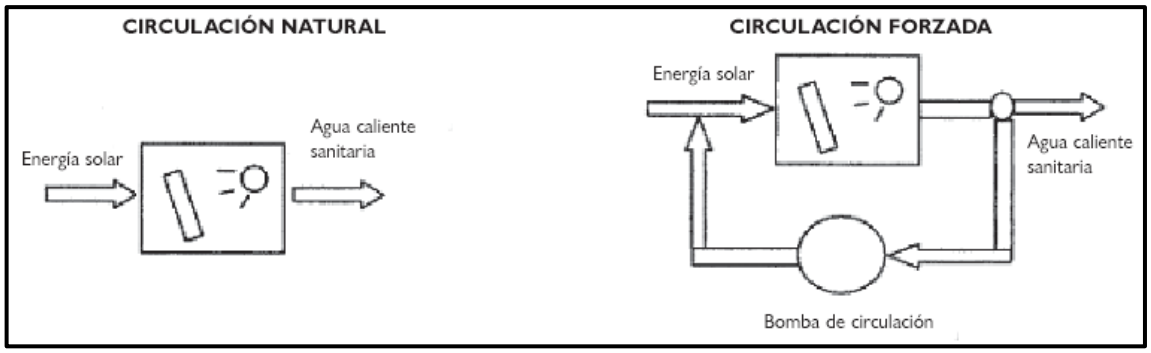
Fuente: Adaptado de Estudio y análisis de la actividad solar, radiación solar global y radiación UV en la ciudad de Arequipa (Chambi, 2018).

Figura 2. Transferencia de calor.

2.6. Tipos de sistemas solares térmicos

La implementación de tecnologías solares térmicas permite el aprovechamiento en su mayor totalidad de la radiación solar para la producción de energía a través de concentradores térmicos que hacen calentar los fluidos y seguidamente insertar el calor dentro de la cámara de secado (Pardo & Tacury, 2009).

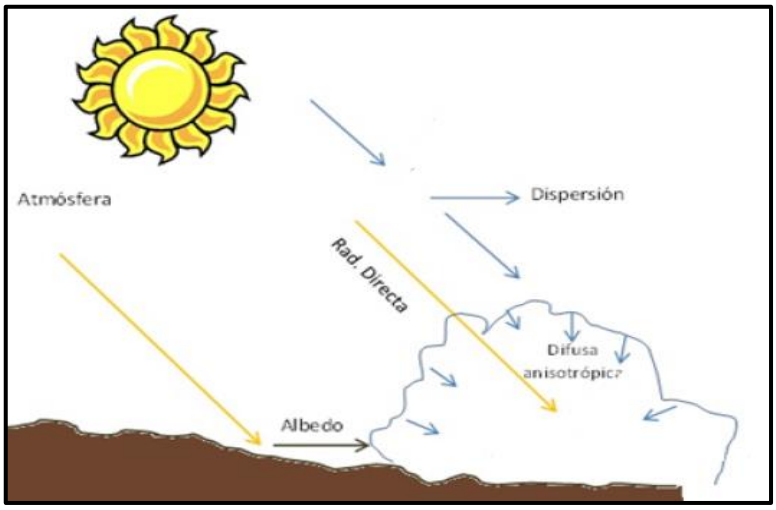
Las principales tecnologías de aprovechamiento de la energía solar es la de circulación natural y forzada, la diferencia entre ambas es que la primera no hay elementos de ayuda para la circulación del fluido, mientras que en la segunda si existen (Pardo & Tacury, 2009).



Fuente: Adaptado de Diseño y construcción de un secador solar de arroz (Pardo & Tacury, 2009).
Figura 3. Sistema de circulación natural y forzada

2.7. Geometría solar

La determínate para el buen funcionamiento de un concentrador es la radiación solar, llegando a la tierra en forma directa a la superficie terrestre y difusa, lo cual se pierde en la superficie. Las dos formas de radiación pueden reflejarse en cualquier superficie, y dependerá de acuerdo al grado de radiación que incida sobre la misma, este fenómeno es conocido como albedo (Hernandez, 2012).



Fuente: Adaptado de Diseño de un concentrador solar de Geometría Paraboidal Portátil (Hernandez, 2012).
Figura 4. Radiación solar

El sol emite una potencia de $173 * 10^{12}\text{KW}$, es decir $15 * 10^{17}\text{KWh}$ de energía al año (Hernandez, 2012). De la cual aproximadamente el 53% es reflejada y absorbida por el Nitrógeno, Oxigeno, ozono, dióxido de carbono, vapor de agua, polvo y nubes. Finalmente a la superficie terrestre llegan en

promedio al año $3 * 10^{13}\mathrm{KWh}$ (Hernandez, 2012). Se conoce como radiación solar la energía que proviene del sol y la magnitud que lo mide hasta alcanzar la superficie de la tierra se le conoce como irradiación. La ecuación de Duffie y Beckman determina los ángulos para describir la posición del sol en el cielo. Así, las ecuaciones relacionan el ángulo de incidencia de la radiación directa en una superficie con otros ángulos.

$$\cos\theta = \cos\theta_z \cos\beta \mathrm{sen}\theta_z + \mathrm{sen}\beta\cos(\gamma_s - \gamma) \qquad (2.1)$$

Donde:

θ_z= ángulo Cenit, el ángulo entre la vertical y la línea que apunta hacia el sol.
α_s= Angulo de altitud solar, el ángulo entre la horizontal y la línea que apunta hacia el sol, (complemento del ángulo cenit)
Y_s=Angulo de acimut solar, el desplazamiento angular con respeto al sur de la proyección de radiación directa en el plano horizontal.
La declinación δ puede ser determinada puede por la ecuación de cooper expresada de la siguiente manera (Cooper, 1980):

$$\delta = 23.45\mathrm{sen}\left(360\frac{284+n}{365}\right) \qquad (2.2)$$

2.7.1. Angulo de salida del sol:

Es la distancia angular entre el circulo de la hora del sol y meridiano del local. El ángulo de la hora se define como cero al mediodía solar local. Se establece como negativas antes del mediodía solar y positivo después del mediodía solar. Para calcular el ángulo de la hora es importante usar la hora solar (Duffie & Beckman, 1969):

$$W_s = -\arccos(-\mathrm{tag}(\delta).\tan(\theta)) \qquad (2.3)$$

Donde:
$Ws_=$Declinación solar
$\emptyset$ =Latitud del lugar

2.7.2. Factor de excentricidad:

Relación entre la distancia del Sol a la Tierra de un día determinado y el valor medio de esta distancia a lo largo del año dado por (Duffie & Beckman, 1969):

$$E_O = 1 + 0.033\cos\left(\frac{360(dn)}{365}\right) \qquad (2.4)$$

2.7.3. Radiación extraterrestre superficie horizontal

La radiación extraterrestre se genera analíticamente tomado en cuenta la evolución astronómica de la radiación solar para una latitud determinada y representa el valor de irradiación solar la tierra recibe en el límite superior de la atmosfera, se calcula mediante la ecuación planteada por (Macagnan, 1993)

$$H_0 = \left(\frac{T}{\pi}\right).l_0.E_0\left[\left(\frac{\pi}{180}\right).(w_s.\sin(\theta).\sin(\delta) - (\cos(\theta).\cos(\delta).\sin(w_s)\right] \qquad (2.5)$$

T=24 días
L_o=constante solar 1367 w/m2
E_o= factor de excentricidad
W_s= ángulo de salida del sol al amanecer
$\emptyset$ =Latitud del lugar
δ =Declinacion solar

2.7.4. Índice de claridad

Es definido como la relación entre la irradiación anual sobre una superficie horizontal situada en la Tierra y la irradiación anual sobre una superficie horizontal situada fuera de la atmósfera (Page, 1979)

$$K_{tm} = \frac{G_o}{H_o}.100 \qquad (2.6)$$

G_o= Radiación directa horizontal sobre la superficie de la tierra
H_O=Radiacion extraterrestre sobre la superficie horizontal

2.7.5. Fracción difusa

Es cuando la radiación solar que alcanza la superficie de la atmósfera de la Tierra se dispersa de su dirección original a causa de moléculas en la atmósfera (Jordan & Lui, 1960).

$$F_{dm} = 1 - 1.13(K_{tm}) \qquad (2.7)$$

2.7.6. Irradiación difusa horizontal sobre la superficie de la tierra

$$D_o = F_m . G_o \qquad (2.8)$$

Donde:

F_m = Fracción difusa

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

2.7.7. Radiación solar directa sobre una superficie inclinada.

Para el cálculo de la radiación solar directa sobre el área del concentrador térmico se utilizó las siguientes fórmulas matemáticas (Garcia Badell, 1983).

$$H_{(\beta,\alpha)} = H_{dm} . K \qquad (2.9)$$

Donde:

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

k =Factor de corrección de la radiación directa

2.7.8. Factor de corrección de la radiación directa.

$$\frac{w_{ss}\left(\frac{\pi}{180}\right)[sing(\emptyset)].sin(\delta).sin(\emptyset-\beta)+cos(\delta).cos(\emptyset-\beta).sin(w_{ss})}{W_s.\frac{\pi}{180}.sin(\delta).sin(\theta)+cos(\delta).cos(\theta).sin(w_s)} \qquad (2.10)$$

Donde:

W_{ss} =Angulo de salida del sol al amanecer sobre un plano inclinado

β=Angulo de inclinación del concentrador térmico plano

2.8. Secadores solares para el secado de madera

Uno de los métodos más usados para alcanzar un contenido de humedad por debajo de un 15%, es el secado en cámara o en horno (Doerner S. A., 2009).

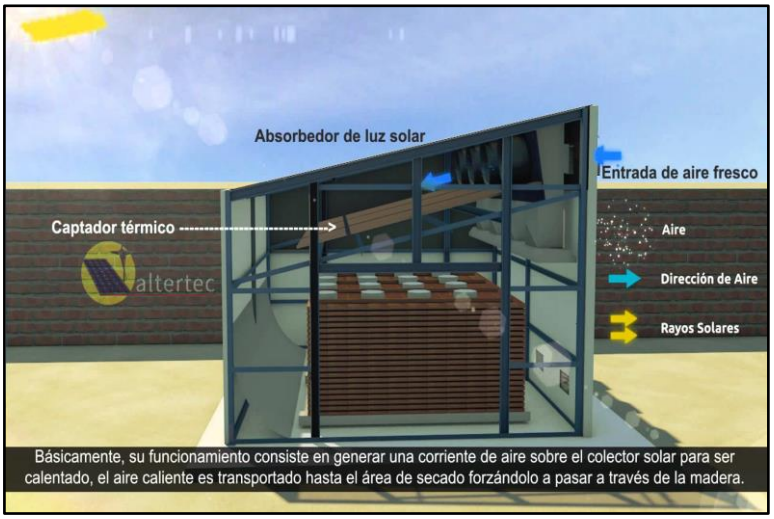
La madera se expone a condiciones de temperatura y humedad relativa que pueden ser controladas. Se realiza en una cámara o compartimiento cerrado, con un sistema de calefacción que permite elevar la temperatura y dispositivos de regulación, para la variación de la humedad relativa. El aire es forzado 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, entre otros (Doerner S. A., 2009)

La cámara en la que se realiza el secado, debe ser hermética, de materiales con buen aislamiento, resistentes a la corrosión y las altas temperaturas. Las temperaturas que se utilizan van desde los 40ºC hasta más de 100ºC, y las velocidades del aire van desde 1 a 7m/s, lo que depende del tipo de secado en cámara que se esté realizando. (Red Madera, 2008)

El diseño básico de un secador solar consta de cuatro partes fundamentales, aun cuando pueden existir variaciones y agregados de equipo, según el diseño o grado de sofisticación, sus elementos principales son: Colector solar. Es la parte más importante del secador solar, para la captación de la energía. Los tipos de colectores comúnmente usados son: el plano y el tipo caja; si bien el tipo plano es el más común, se subdivide en internos (formando parte de la cámara) y externos (independientes de la cámara). El diseño básico de un colector plano consiste de una superficie del absorbedor, una zona de circulación del fluido (aire) y el recubrimiento. (Quintana, 2014)

Un secador solar es una cámara que tiene la capacidad de almacenar el calor que es generado por la incidencia de los rayos solares sobre un colector de temperatura. La cámara de secado tiene dos partes fundamentales: la primera está sobre la cámara y es la responsable que el aire se caliente; la segunda es el área de apilado de madera que se requiere secar (Salas, Moya, & Cordova, 2008)



Fuente: Adaptado de Funcionamiento del Secador Solar Altertec (Nicaragua, 2015).

Figura 5. Funcionamiento de un secador solar

2.8.1. Cámara de secado

La eficiencia en el funcionamiento de una secadora solar depende de una serie de factores que deben ser considerados en su planteamiento y su construcción (Bonilla, 2015):

- Captación y retención eficiente de energía solar, ya que esta es la única fuente de energía necesaria para estimular el secado (Bonilla, 2015) .
- Orientación de la cámara. Es necesario diseñarla para que el ángulo de incidencia de los rayos sea el menor posible; así se evita la reflexión de los mismos y, por consiguiente, aumenta el índice de refracción. Conforme los rayos solares tiendan a incidir más normalmente en el secador, mayor será el número de rayos que pase a la superficie transparente y que llegue al colector (Bonilla, 2015).
- La inclinación del colector debe escogerse de tal forma que el ángulo de incidencia no varíe más de 47° en las diferentes épocas del año. En los diferentes diseños, se ha estudiado cuál es la inclinación óptima, sin embargo, ha habido diferentes opiniones al respecto (Bonilla, 2015).

Quintana (2014), menciona que “Es la parte donde se apila la madera. No existen especificaciones para los materiales de construcción y la capacidad o forma geométrica de la cámara (diseño). En los casos que el colector forma parte de la cámara, ésta se construye con materiales transparentes, para reducir la pérdida de calor del interior, junto con bastidores resistentes para soportar el

peso del colector, según sea el caso, debido a que el techo de la estufa forma parte del recubrimiento superior del colector".

2.8.1.1. Sistema de circulación del aire.

El movimiento del aire en el secador solar debe ser continuo, tanto para que se caliente al pasar por el colector, como para que circule a través de las pilas de madera. El movimiento del aire en la cámara de secado puede realizarse por convección natural o en forma artificial por medio de ventiladores, que es la forma usual de todos los secadores solares (Paredes M. , 2009).

Para secar madera de baja densidad se estiman velocidades de aproximadamente 3 m/s en el interior de la pila de madera (Paredes M. , 2009).

Para determinar el caudal necesario, es necesario calcular el área transversal por donde circulara el aire en la pila de madera y multiplicado por la velocidad de circulación del aire.

La pila está conformada por:

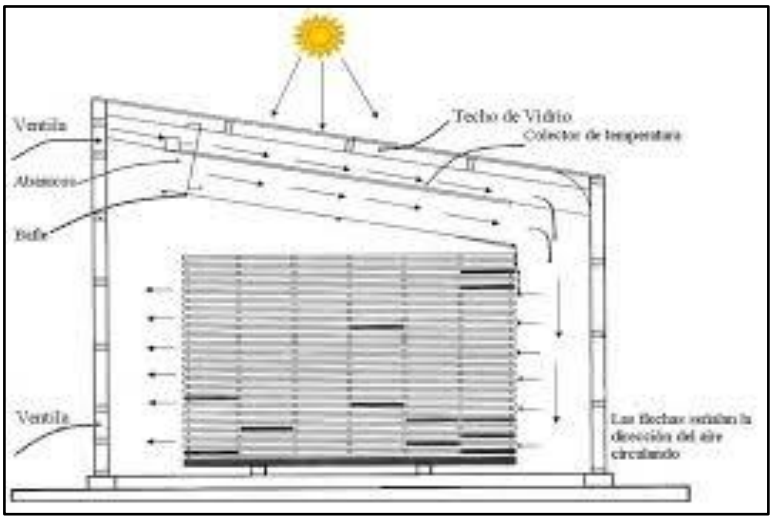
- Alto =1.50 m
- Ancho =0.36 m
- Separadores =0.03m2

Se determina el caudal necesario mediante la fórmula matemática planteado por (Paredes M. , 2009)

$$Q_{Aire} = A_T * V_{aire} \qquad (2.11)$$

2.8.1.2. Sistema de control de humedad y temperatura.

Los sistemas de control son mínimos, y generalmente son gobernados en forma manual, mediante la abertura o cierre de ventilas, y un psicrómetro para registrar y monitorear las condiciones interiores de temperatura y humedad relativa (Quintana, 2014).



Fuente: Adaptado de Diseño y construcción de un secador solar para madera (Salas, Moya, & Cordova, 2008).

Figura 6. Partes de un secador solar

2.8.2. Diseño del secador solar

2.8.2.1. Dimensiones.

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

Para un mejor aprovechamiento y obtener una mayor eficiencia del diseño de la cámara se tiene que tomar más importancia a la capacidad del, volumen de la cámara éste debe ser tan cercano como sea posible al volumen de la carga de madera que sea secada (Bonilla, 2015). Una forma de medir este aprovechamiento es por medio del valor de la relación llamada “Coeficiente de llenado”, el cual es igual al cociente entre el volumen de madera Vm y el volumen de la cámara Vc (Bonilla, 2015):

$$\mathrm{C.LL} = \frac{\mathrm{Vm}}{\mathrm{Vc}} \qquad (2.12)$$

El coeficiente de llenado se considera bueno cuando su valor varía entre 0,35 y 0,5, lo que equivale a decir que el volumen de la cámara es de 2 a 3 veces mayor que el volumen de la madera colocada en su interior (Bonilla, 2015).

2.8.2.2. Materiales de construcción

Las cámaras de secado deben construirse con materiales concisos capaces de soportar los choques que pueden ocurrir durante los procesos de cargue y descargue de la madera a secar, además de asegurar que se cumpla las otras características requeridas para un correcto secado (aislamiento térmico, hermeticidad y resistencia a la corrosión) (Bonilla, 2015).

Dentro de los materiales más utilizados son los ladrillos o de bloques de cemento (para lo cual no debe utilizarse morteros de cemento con cal adicional), los perfiles y láminas metálicas, (que deben cubrirse con pinturas anticorrosivas para evitar que sean atacados por la corrosión). El piso debe resistir el peso de las cargas y facilitar el drenaje del agua (Bonilla, 2015).

Las puertas por lo general deben de llevar empaques elásticos para impedir fugas y permitir la facilidad de maniobra durante el cargue y descargue de la madera (Bonilla, 2015). Los sistemas más utilizados son las puertas de batientes (simples, y se requiere un espacio exterior amplio para abrirlas), las puertas deslizante hacia un costado (ocupan menos espacio al abrirlas pero es más difícil lograr con ellas una buena hermeticidad), las cortinas metálicas (fáciles de conseguir en el comercio pero son malas aislantes), y las puertas deslizantes hacia arriba (requieren rieles y una estructura sólida para soportarlas cuando están abiertas y resistir el posible efecto del viento (Bonilla, 2015).

2.8.2.3. Aislamiento térmico

Por lo general el aislamiento de las cámaras de secado tiene por objeto evitar que el calor de secado se fugue hacia el ambiente exterior. Para efectos de aislamiento e impermeabilización, las cámaras deben considerarse como una edificación y resolver conforme a los principios de arquitectura y construcción (Bonilla, 2015). Si la cámara está situada en el exterior, deben tenerse en cuenta los efectos de la intemperie y de los vientos dominantes; Estas condiciones son más benignas en la cámara de secado situadas en el interior de un edificio (Bonilla, 2015). Cuando el aire húmedo de secado produce condensación de

agua sobre las caras internas de los muros, es necesario mejorar el aislamiento por medio de un aislante térmico de mayor espesor (Bonilla, 2015). Cuando el aislante es propenso a estropearse por la humedad de condensación, debe protegerse su cara interna con una barrera impermeable (papel de aluminio, polietileno, entre otros materiales) (Bonilla, 2015).

2.8.2.4. Hermetismo

Se recomienda evitar las fugas de aire deben para lograr una mayor eficiencia de la circulación del mismo dentro de la cámara a través de la madera (Bonilla, 2015). Las puertas de acceso, los postigos de ventilación controlada y los puntos de paso de las tuberías, cables y ductos de aire, deben llevar empaques adecuados que permitan el movimiento relativo de las partes cuando éste debe existir, pero impida el libre paso del aire hacia el exterior (Bonilla, 2015).

2.8.2.5. Ventilación controlada

Las cámaras de secado están compuestas por lo general por ventiladores provistas de postigos o ventilas que permiten la salida del aire húmedo y su remplazo por aire ambiente más seco (Bonilla, 2015). Según sea el grado de tecnificación de la cámara, las ventilas funcionan en forma manual o por medio de unos mecanismos automáticos; algunas cámaras tienen extractores destinados a la evacuación del aire húmedo hacia el exterior (Bonilla, 2015). Las únicas cámaras que no requieren ventilas de evacuación son los deshumidificadores, los cuales reciclan constantemente el mismo aire, pues poseen un sistema que permite extraer el agua del aire a medida que se desarrolla el proceso de secado (Bonilla, 2015).

2.8.2.6. Circulación del aire

El aire es considerado como el vehículo que transporta la humedad que sale del interior al exterior de la madera (Bonilla, 2015). Para que el aire efectúe su trabajo en forma adecuada, debe poseer una presión suficiente que lo haga circular dentro de la cámara a cierta velocidad y la permita vencer los obstáculos que encuentra en su recorrido (Bonilla, 2015). Este efecto se logra por medio del viento en el secado natural y de manera más efectiva por medio de ventiladores en el secado artificial (Bonilla, 2015). Las características que más nos interesa determinar en un ventilador son su caudal y su presión estática (Bonilla, 2015).

El caudal es el volumen del aire que el ventilador impulsa por unidad de tiempo y se mide en m^3 o pie^3, por minuto, o segundo; el caudal implica que el aire circule a través de la madera con suficiente velocidad (Bonilla, 2015). La presión estática es la ejercida por el aire sobre las paredes de la cámara y es un indicativo de la fuerza que el aire debe aplicar sobre las superficies que se oponen a su libre circulación (Bonilla, 2015). La unidad más común para medir la presión estática de un ventilador es la "longitud de columna de agua (metro de columna, o pulgadas de columna) (Bonilla, 2015). Existen dos tipos de ventiladores que pueden utilizarse en las cámaras de secado de madera: los centrífugos y axiales. Los centrífugos se componen de una carcasa metálica en forma de caracol, donde gira una rueda compuesta de palas o aspas. Los axiales tienen forma cilíndrica y están compuestos por una hélice formada de varias aspas curvas que giran alrededor de un eje. La hélice se encuentra en el interior de una carcasa (Bonilla, 2015).

2.8.3. Clasificación de las cámaras de secado por su aporte de calor

El secado artificial de la madera requiere el aporte de energía en forma de calor (Bonilla, 2015). Este debe ser suministrado de forma suficiente para elevar la temperatura del aire dentro de la cámara, romper los enlaces químicos entre las moléculas de agua y de madera, y luego evaporar el agua; además de compensar las pérdidas de calor por las paredes, piso, techos, por las chimeneas y otros dispositivos de la cámara que estén en contacto con el exterior (Bonilla, 2015).

2.8.3.1. Gas

Los combustibles líquidos derivados del petróleo, el gas puede ser utilizado como fuente de energía directa o para alimentar calderas (Bonilla, 2015). Utilizando de manera directa tiene la ventaja de que, al no ser tóxicos sus gases de combustión, no es necesario utilizar sistemas de intercambio de calor y pueden entonces ser dirigidos a la cámara de secado. Sin embargo, estas son más escasas en nuestro medio que las descritas en el anterior (Bonilla, 2015). Debido a los riesgos de explosión, pues en las instalaciones que funcionan con gas deben tenerse precauciones especiales (Bonilla, 2015).

2.8.3.2. Carbón y leña

Estas calderas requieren gran cuidado en su fabricación y mantenimiento, por esto, su utilización es limitada. La aplicación común del carbón y la leña como fuentes energéticas se hace por medio de estufas más o menos simples que permiten una combustión directa del combustible y poseen un sistema de intercambio para calentar aire limpio de secado (Bonilla, 2015). Aunque estas estufas son sistemas de menor rendimiento térmico, debido a la combustión directa y al sistema de intercambio, son aparatos simples y fáciles de implementar; Al ser el carbón un combustible corriente y barato, y la leña o el retal de madera un sobrante común y a menudo incómodo para los procesadores de madera, es razonable utilizarlos como fuentes energéticas para el secado (Bonilla, 2015). La combustión directa acarrea riesgos de incendio que deben considerarse al posicionar estas estufas en la planta de producción. La combustión del carbón y de la leña produce gases que constituyen una fuente de polución (Bonilla, 2015).

2.8.3.3. Energía eléctrica

La manera más eficiente de utilizar la energía eléctrica para calentar el aire de secado consiste en energizar un aparato llamado “bomba de calor”, que es en esencia un circuito frigorífico similar al de las neveras corrientes, las cámaras de secado de madera basadas en este principio se conocen con el nombre de “deshumidificadores” (Bonilla, 2015). La energía eléctrica puede, también en forma más simple e inmediata, calentar el aire de secado al ponerlo en contacto con una serie de resistencias eléctricas. Esta es una solución cómoda y fácil de instalar si se dispone de un buen suministro de electricidad, pero es costosa, tanto en la instalación que requiere un transformador de gran potencia, como en la operación que genera un gran consumo de energía” (Bonilla, 2015).

2.8.3.4. Energía solar.

Por medio de colectores solares es posible calentar aire, que se conduce directamente a la cámara de secado (Bonilla, 2015). Un colector solar de aire es un aparato diseñado para atrapar el calor del sol y utilizarlo en el calentamiento del aire (Bonilla, 2015). Su principio básico consiste en lograr el calentamiento de una superficie buena conductora de calor, que a su vez transfiere ese calor al

aire. Existen varios diseños de colectores solares de aire que varían en costo y en la efectividad para lograr el calentamiento del aire. Un colector de aire simple puede lograrse adaptando el techo de una edificación, mientras que; uno de mayor eficiencia consta por ejemplo de una buena superficie de intercambio de calor colocado en una caja aislada térmicamente del exterior, cuya superficie superior es un vidrio (Bonilla, 2015). El colector solar puede ser parte integral de la cámara de secado o estar construido aparte y unido a la cámara por medio de túneles o ductos que conducen el aire. Existen pues, también, varios modelos de cámara de secado solares, dependiendo de la colocación de los componentes y de la forma como circula el aire de secado (Bonilla, 2015). En secadores solares se estudian los modelos más conocidos de cámara solares para el secado de la madera (Bonilla, 2015).

Existen diferentes sistemas de secado artificial, el secado artificial al aire caliente que consiste en uniformizar la circulación del aire y su temperatura sin regular la humedad relativa; el secado a bajas temperaturas y deshidratación del aire que reproduce las condiciones del secado natural pero manteniendo una temperatura, humedad relativa y circulación del aire controlados y constantes, lo que asegura una mayor velocidad de secado con mínimos defectos en la madera; el secado a altas temperaturas, llamado también métodos tradicional artificial que utiliza intercambiadores de calor a vapor que eleva la temperatura alrededor de los 100ºC a fin de acelerar el secado, este sistema es muy adecuado para secar grandes cantidades de madera de la misma dimensión y especie por carga tiene la desventaja de requerir cargas de madera homogéneas, estricto control técnico del proceso y mayores inversiones iniciales en la planta (secadora, caldero y ablandadores de agua) (Vizcarra, 1998).

2.9. Secado de la madera

El secado de madera se refiere a la relación entre la madera y la humedad, y es sin duda uno de los aspectos más importantes de la tecnología de la madera (Atencia, 2006).

Tamani (2008), menciona que, como premisa fundamental para evitar pérdidas y problemas de calidad, la madera debe secarse en forma controlada, de manera que la humedad final esté definida por las condiciones ambientales o de clima del lugar donde se desarrollará el proceso de secado. Al referirnos al

lugar donde se secará la madera, hacemos mención a una práctica que va cayendo en desuso, como es el secado al aire, tanto al descubierto como bajo techo; de esta forma, la duración del secado depende de los factores climáticos, inmanejables, por cierto, y de las características de las especies. Esta práctica se contrapone con la premisa de control del clima en los procesos de eliminación del agua de la madera (Tamani, 2008).

Castillo (2001), menciona que la calidad del secado (contenido de humedad final, gradiente de humedad, tensiones internas y defectos como grietas superficiales y alabeos, etc.), en forma importante se ve influenciada por las características y la calidad de la madera (densidad, ubicación de nudos, inclinación de fibra, contracción, madera de reacción, madera juvenil, tensiones de crecimiento, etc.). Los defectos son particularmente embarazosos para los usos que se pretenden desarrollar, lo cual da lugar a que el proceso requiera ciertos cuidados, si lo que se pretende es obtener madera seca de calidad libre de los defectos anteriores. Por lo anterior es de vital importancia hacer una adecuada diferenciación de la calidad de la madera de los diferentes híbridos y evaluar su comportamiento frente al secado (Castillo, 2001).

2.9.1. Ventajas de secado de la Madera

Según (Instituto Nacional Forestal y de Fauna (1988) el secado de la madera es importante porque aporta las siguientes ventajas:

- Aumento de la estabilización dimensional de madera seca
- El secado, es una condición indispensable para la preservación de la madera
- El secado, es una condición indispensable para los acabados de superficies de madera.
- Aumento de los esfuerzos admisibles de la madera por secado.
- El secado artificial es la base para el encolado y la ingeniería de la madera

2.9.2. Programas de Secado

Gonzales, Rodriguez , Mendez, & Sandoval (2009), mencionan que un programa de secado se establece de acuerdo con la especie, espesor y uso final de la madera; en este proceso se considera la relación entre el balance de calor transferido por el flujo de aire a la superficie del material y del transporte de agua

del centro a la superficie del mismo. El proceso de secado consta de tres fases determinadas por la variación de la velocidad del secado: una fase de calentamiento una fase de secado y una de acondicionamiento; el movimiento del agua a través de la madera dependerá de las propiedades físicas del material y la velocidad del secado, la cual es controlada por las condiciones externas (temperaturas, velocidad de aire, humedad relativa); en la fase higroscópica, la velocidad de secado es controlada por la resistencia interna; en la tercera fase el contenido de humedad de la madera se uniformiza hasta alcanzar el equilibrio.

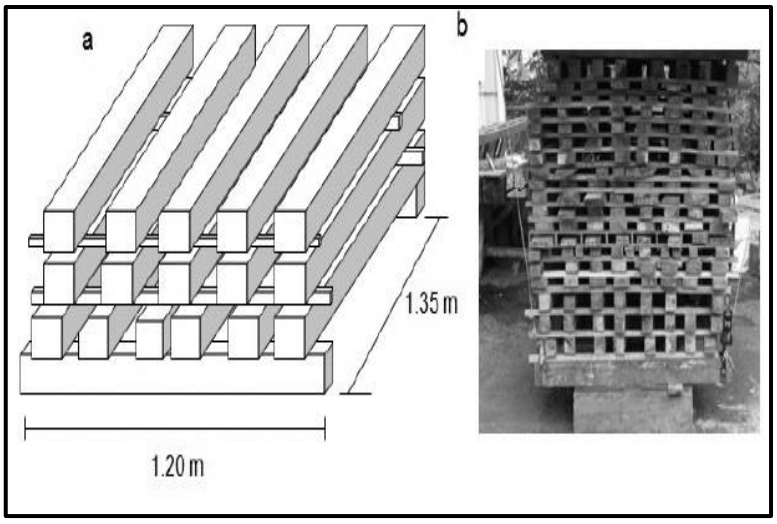
La guía de secado básica que se usa, consiste en abrir y cerrar las ventilas a determinadas horas durante el tiempo que permanezca funcionando el secador. El procedimiento consiste en encender el sistema a las ocho o nueve de la mañana abriendo las ventilas durante media hora. Esto, con la finalidad de permitir la salida de la humedad que pudiera haberse concentrado durante el tiempo que la estufa estuvo sin funcionar (Steinmann, 1989); posteriormente se cierran las ventilas y se mantienen así, para que el aire circule en el interior de la secadora. Después de este período se pueden abrir nuevamente durante media hora, alrededor del medio día para extraer el aire húmedo del interior, si se considera necesario. Al concluir esto, se cierran nuevamente las ventilas y se vuelven a abrir entre las 4 y 6 de la tarde durante media hora. al cabo de la cual se cierran y se apaga el sistema, repitiendo el procedimiento al día siguiente y los que dure el proceso de secado, hasta alcanzar el contenido de humedad deseado en la madera (Durand, 1984).

2.9.3. Métodos de secado de la madera

2.9.3.1. Secado al Aire.

El secado al aire es la exposición de la madera a las condiciones ambientales (viento y sol), sin altas temperaturas artificiales, control de velocidad, o control de humedad. La madera está dispuesta de modo que permite la circulación del viento a través de la pila para su secado; es posible que la madera se seque demasiado rápido, llegando a causar pérdidas, o secarse demasiado despacio, incrementando los costos operativos. Los altos riesgos de deterioro hacen que éste método sea muy costoso, especialmente para especies que presentan mayor probabilidad de presentar daños, en función a su espesor. Para madera destinada a la elaboración de muebles, cuyo contenido de

humedad (CH) requerido es del 6 al 8% (Monte, 2014), el secado al aire es considerado como el primer paso, ya que ésta necesitará ser secada en horno para alcanzar dicho nivel de CH. La madera puede ser protegida de la lluvia y la luz solar con un techo o cobertizo en cada pila de madera. Los cobertizos reducen deterioros notoriamente, y, por lo tanto, hacen posible secar económicamente especies como el roble. Sin embargo, se requiere de inversión adicional para su construcción, el tiempo de secado puede llegar a incrementarse, y factores como la humedad, la corriente de aire y temperaturas no podrán ser controladas. Este método acarrea muchas desventajas, tales como: período de secado muy largo, influencia adversa de las estaciones, presencia de insectos, el porcentaje de humedad final de la madera no llega a ser menor al 13% (Monte, 2014).



Fuente: Adaptado de Características tecnológicas de la madera de dos especies de Costa Grande, Guerrero, México (Herrera & Perez, 2012)

Figura 7. Arreglo de prismas y tablas en la pila de secado de madera al aire libre. (a) Dimensiones de la pila en el plano horizontal (b).

2.9.3.2. Aire Forzado / Secado con Aire (o cobertizo de secado con ventiladores).

El secado con aire forzado o secado con aire es el cobertizo descrito en el anterior método, con la inclusión de ventiladores que absorben aire del exterior para distribuirlo a través de la madera apilada, proporcionando un secado muy rápido, con un mínimo de pérdida por deterioro (Monte, 2014).

Como una regla empírica aproximada, la velocidad del aire se registra en alrededor de 700 pies por minuto (FPM) y la trayectoria del flujo máximo de aire es de 20 pies. Normalmente, se cuenta con 1 caballo de fuerza (hp) de potencia del ventilador por cada 6 pies de superficie en la secadora. (Monte, 2014)

Este método de secado es especialmente atractivo para especies que tienen la propiedad de secar rápidamente, con bajo riesgo de deterioro, en función a su espesor.

2.9.3.3. Secado a Baja Temperatura (Pre-secado).

Un depósito de pre-secado es un recinto amplio, con una capacidad de 1,5 millones de pies de superficie (BF) de madera apilada, en el que se controlan la temperatura y humedad. Los ventiladores permiten la circulación de aire a través de la madera en el depósito, que, a la vez, alimenta el sistema de escape. Se cuenta con una fuente de calor, normalmente con bobinas de calefacción de vapor, cuya temperatura se mantiene alrededor de los 35ºC (Mora, 2015).

Por lo general no cuenta con sistema de humidificación, sino la humedad generada por el secado de madera. Éste método de secado es el más popular para el roble y otras especies difíciles de secar. La madera se seca al contenido de humedad (CH) de 20 a 30%, para luego ser llevada a un horno (Mora, 2015).

2.9.3.4. Horno de Secado a Temperatura Normal o a Temperatura Convencional.

Este es el método probado de secado de madera, que se ha utilizado durante décadas para las frondosas y coníferas. Por lo general, la calidad es excelente si el equipo está diseñado y operado correctamente (Monte, 2014). El secado artificial, con aire caliente, por condensación, o al vacío, permite obtener un secado de mayor uniformidad; el secado al vacío asegura la eliminación de una parte considerable de sustancias resinosas. Se deben cumplir con dos funciones en el secado de la manera que Alcanzar el nivel de humedad adecuada, de acuerdo con la aplicación de la madera y asegurar una distribución uniforme de la humedad, de modo que la presencia de tensiones y fisuras sea nula (Monte, 2014).

La madera se apila en el horno para su secado, donde el flujo de aire, la temperatura y la humedad son controlados para alcanzar niveles óptimos

de operación (Monte, 2014). Ventiladores proporcionan la circulación de aire a través de la carga, y el calor es suministrado por vapor de bobinas. El exceso de humedad se agota a través de conductos de ventilación. Puede añadirse humedad con rociador de vapor.

Este tipo de hornos pueden variar de acuerdo al modo en que la temperatura y humedad son controladas; entre estos tenemos: hornos convencionales, deshumidificadores y solares (Monte, 2014).

2.9.3.5. Horno Convencional.

Fernandez M. (2015), menciona que el horno convencional recibe calor de un quemador o caldera y un intercambiador de vapor o agua caliente. El agua que se evapora de la madera se convierte en vapor y es removida del interior del horno con el aire caliente. El horno convencional pierde calor, ya que el vapor y el aire caliente son retirados al exterior del horno, hecho que se traduce en un consumo de energía mayor.



Fuente: Adaptado de Hornos Convencional de Secado de Madera (Carnotherm, 2015).
Figura 8. Horno convencional para el secado de madera.

2.9.3.6. Horno Solar

Este horno es alimentado con energía solar. Una vez alcanzado un nivel de humedad removida de la madera, se requiere una cierta cantidad de calor que no podrá ser modificada para obtener resultados de secado óptimos. Sin embargo, la fuente de calor no puede ser prevista, ya que está en función de la energía obtenida de acuerdo con las condiciones climáticas. Adicionalmente,

es adecuado contar con ventiladores alimentados con energía eléctrica, en la mayoría de los casos (Fernandez M. , 2015).

Sin embargo, hoy en día la mayoría de los nuevos hornos son pre-fabricados de material de aluminio, con una estructura adecuada. Por otro lado, es importante por lo menos crear un espacio de dos pulgadas de aislamiento ya que son necesarias para la conservación de energía y para evitar las temperaturas desiguales en el interior de la secadora.



Fuente: Adaptado de Fabricación artesanal de un secador de madera solar (Todoproductividad, 2012).
Figura 9. Horno Solar

2.10. Concentradores térmicos

Son implementados con el fin de aumentar la radiación solar directa sobre la superficie absorbente, al mismo tiempo aumentando la temperatura en el cuerpo receptor al que se conduce. Uno de los principales inconvenientes que se manifiesta es la necesidad de incorporar un sistema de seguimiento de la radiación solar (Hernandez, 2012).

2.10.1. Concentradores térmicos cilíndricas parabólico (CCP).

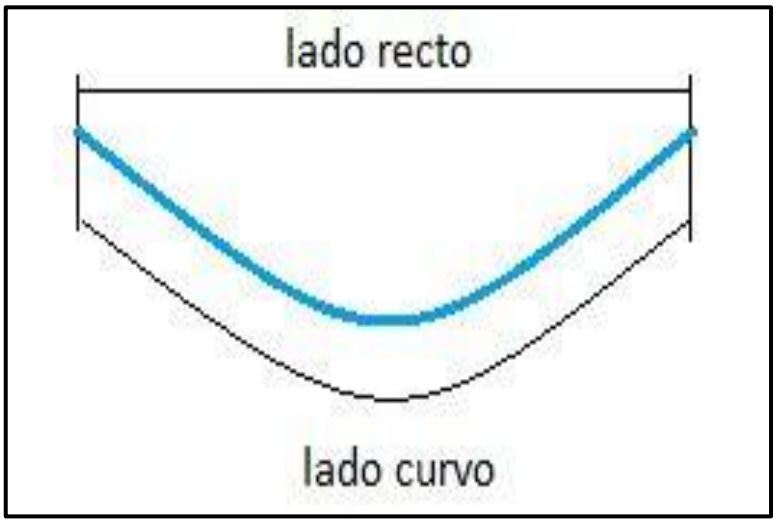
Se caracteriza por la superficie colectora ya que es la mitad de un cilindro, debido a la concavidad de su geometría, en el foco se coloca un conducto por donde pasa un fluido como aceite o salmuera. Dependiendo de la longitud de exposición, el área de captación solar y la irradiación, el líquido se calienta por encima de los del punto de ebullición, llegando alrededor de 300 °C (Hernandez, 2012). Una vez caliente, el fluido pasa aun caldera donde calienta el agua

convirtiéndole en vapor donde la energía contenido en el vapor puede ser para generar electricidad**.**

2.10.1.1. Dimensionamiento del canal Parabólico

2.10.1.1.1. Calculo del lado recto, de los puntos máximos y el foco F.

Para poder saber el tamaño del lado recto, se procede a realizar una serie de cálculos en función de diferentes distancias focales (Paredes C. , 2012).

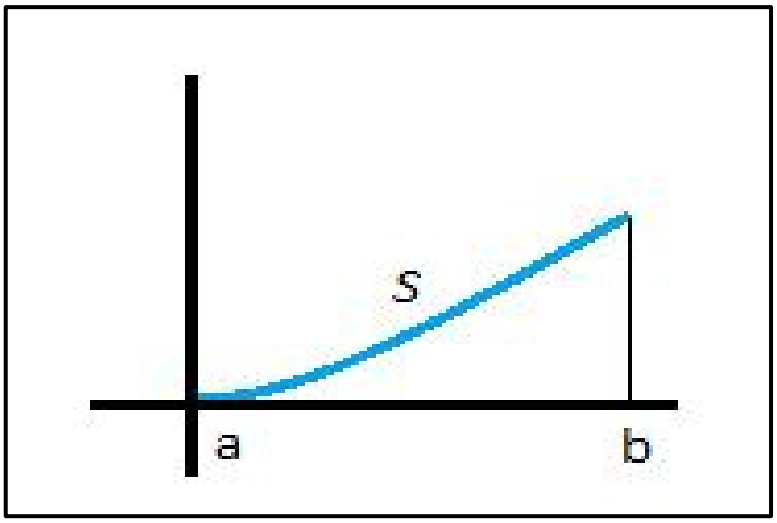


Fuente: Adaptado de Diseño de captador solar cilíndrico parabólico para aplicaciones rurales en Paraguay (Paredes C. , 2012)

Figura 10. Perfil de la superficie captadora

Para calcular la abertura, es decir, el lado recto “Lr, se utiliza la fórmula del arco de una curva, por la cual se puede conocer la longitud de esta (Paredes C. , 2012).

$$\boldsymbol{S = \int_a^b \sqrt{1 + f'(x)}\,dx} \qquad (2.13)$$



Fuente: Adaptado de Diseño de captador solar cilíndrico parabólico para aplicaciones rurales en Paraguay (Paredes C. , 2012)

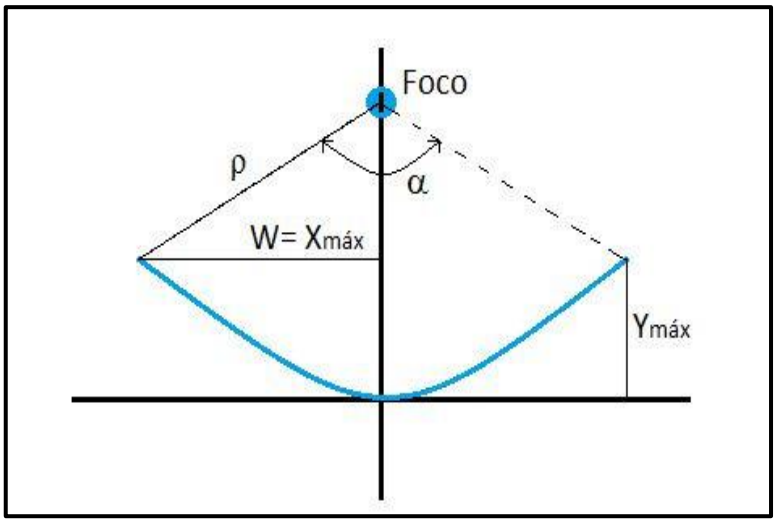
Figura 11. Segmento de cálculo

El limite a=0, y el limite b es desconocido. Por tanto, operando, sustituyendo y despejando b, se obtiene el valor de la semi abertura, o de lo que es lo mismo, de X_{max}. Este valor depende del foco F que se escoja se expresa en la siguiente formula (Paredes C. , 2012):

$$\boldsymbol{f(x) = y = \frac{x^2}{4.F}} \qquad (2.14)$$

Para obtener $Y_{máx}$, se sustituye la $X_{máx}$ obtenida, en la ecuación general de la parábola (Paredes C. , 2012).

2.10.1.1.2. Cálculo del ángulo de abertura α y de la distancia ρ



Fuente: Adaptado de Diseño de captador solar cilíndrico parabólico para aplicaciones rurales en Paraguay (Paredes C. , 2012).

Figura 12. Esquema de las relaciones y distancias dentro del perfil del CCP

Para el cálculo de la abertura α se utiliza la siguiente fórmula matemática según (Paredes C. , 2012).

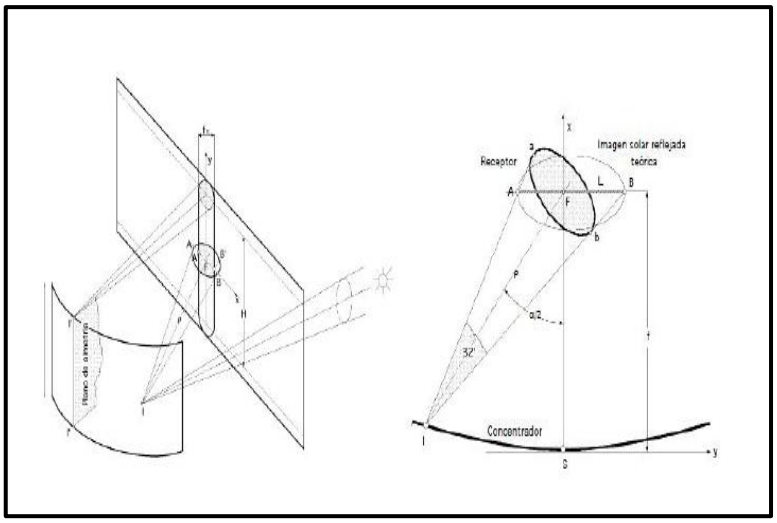
$$\mathrm{Tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{x_{max}}{F - y_{max}} \qquad (2.15)$$

Para el cálculo de la distancia ρ se utiliza la siguiente fórmula matemática según (Paredes C. , 2012).

$$\rho = \sqrt{W^2 + (F - Y^2)} \qquad (2.16)$$

2.10.1.1.3. Calculo del diámetro del tubo receptor

El Sol no es una fuente solar luminosa puntual. Visto desde la superficie de la Tierra (Paredes C. , 2012), el disco solar que conforma corresponde a un Angulo de apertura de 32', por tanto, la radiación solar directa sobre la superficie terrestre no está formada por rayos perfectamente paralelos entre sí, sino que se distribuyen sobre un cono de direcciones de semi ángulo igual a 16 alrededor de la línea que une el punto de observación con el centro del disco solar (Paredes C. , 2012). Así, no todos los rayos de este cono alcanzaran un receptor de tamaño arbitrario (Paredes C. , 2012).



Fuente: Adaptado de Diseño de captador solar cilíndrico parabólico para aplicaciones rurales en Paraguay (Paredes C. , 2012).

Figura 13. Proyección del disco solar sobre el absorbedor

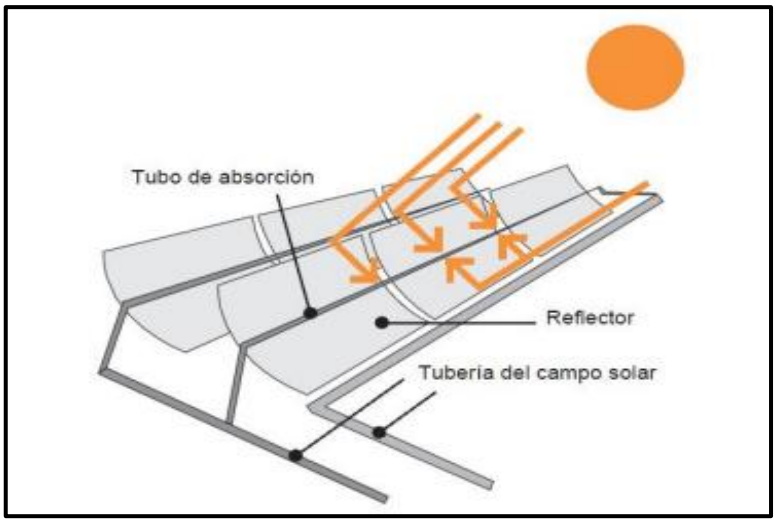
El valor del diámetro mínimo que tiene que tener el tubo receptor depende principalmente de la distancia focal a través del valor de (Paredes C. , 2012), por lo que el diámetro mínimo se obtiene a través de la siguiente ecuación:

$$\emptyset_{\min} = \frac{2 * \rho * \mathrm{tg}16''}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \qquad (2.17)$$



Fuente: Adaptado de Diseño de un concentrador solar de Geometría Paraboidal Portátil (Hernandez, 2012).

Figura 14. Concentradores cilíndricas



Fuente: Adaptado de Diseño de captador solar cilíndrico parabólico para aplicaciones rurales en Paraguay (Paredes C. , 2012).

Figura 15. Colector cilíndrico

2.10.1.2. Rendimiento de un concentrador térmico cilíndrico parabólico (CCP).

En ello se puede definir los siguientes rendimientos:

- **Rendimiento óptico con un ángulo de incidencia de 0° ($\eta_{opt.0^\circ}$).-** Tiene en cuenta todas las perdidas ópticas que tiene lugar en el colector con un Angulo de incidencia de 0° (Paredes C. , 2012). valor viene dado por el producto de estos cuatro factores: reflectividad de los espejos, transmisividad del tubo de vidrio, factor de interceptación (que tiene en cuenta la parte de radiación reflejada que por cualquier causa no alcanza el absorbente) y absortividad de la superficie selectiva que recubre el tubo metálico absorbente (Paredes C. , 2012).
- **Rendimiento térmico (η_{th}).-** Considera todas las perdidas térmicas que tienen lugar en el colector (Paredes C. , 2012).
- **Rendimiento global (η_{global}).-** Considera todas las pérdidas, tanto ópticas como geométricas y térmicas, que tienen lugar en el colector (Paredes C. , 2012).
- **Modificador por ángulo de incidencia (K). -** Considera todas las pérdidas ópticas y geométricas que tienen lugar en el colector para un ángulo de incidencia que no se tienen en cuenta en (η_{th}) (Paredes C. , 2012).

La energía solar incidente sobre un colector cilindro parabólico viene dada por (Paredes C. , 2012):

$$Q_{sol} = S_c * l_0 * \cos(\theta) \qquad (2.18)$$

Donde:

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

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

L0= Radiación solar directa (W/m^2)

θ = Ángulo de incidencia

Por otra parte, según (Paredes C. , 2012), la energía térmica útil suministrada por el colector viene dada, en términos de incremento entálpico que experimenta el fluido de trabajo en el colector" por la siguiente expresión matemática:

$$q = \frac{T - T_\infty}{\left(\frac{\ln\frac{r_2}{r_1}}{2*\pi*Kf.aire}\right) + \left(\frac{1}{h*2*\pi*l*r2*180/360}\right)} \qquad (2.19)$$

Donde:

T= Temperatura media en el tubo

T_∞= Temperatura ambiente

r_2 = Radio exterior tubo

r_1 = Radio tubo interior (fluido)

l= Longitud del tubo

El rendimiento global del colector viene dado como el cociente entre la energía térmica útil suministrada por el colector y la energía solar incidente sobre el colector (Paredes C. , 2012):

$$\eta_{Global} = \frac{Q_{util}}{Qsol} \qquad (2.20)$$

Por lo tanto, el rendimiento de un concentrador solar cilíndrico no depende de la radiación solar ni de la temperatura de trabajo del fluido, si no la limpieza

del colector ya que ello ayuda a la reflectividad de los rayos solares además de la transmisividad del tubo absorbente. Un valor típico del rendimiento óptico pico es aproximadamente 0.75, para un grado de limpieza del 100% (Paredes C. , 2012).

El rendimiento térmico depende directamente de la temperatura de trabajo del fluido y de la radiación solar directa (Paredes C. , 2012).

2.10.1.3. Componentes de los concentradores térmicos cilíndrico parabólico (CCP).

2.10.1.3.1. El Reflector Cilíndrico Parabólico. - Tiene como objetivo reflejar y concentrar sobre el Receptor la radiación solar directa incidente sobre la superficie A grandes rasgos es un espejo curvo que forma en una de sus dimensiones una parábola, de forma que concentra sobre su línea focal toda la radiación reflejada (Paredes C. , 2012), dentro de los materiales utilizados podemos encontrar plásticos recubiertos con películas de plata o aluminio, chapas metálicas, o el más usado: vidrios sobre los que se depositan una capa de plata junto con un protector de base de cobre y pintura epoxi (Paredes C. , 2012).

- **Perdidas geométricas:** Según (Paredes C. , 2012) menciona que provocan la disminución del área efectiva de captación solar de los colectores. En un CCP se dividen en pérdidas debidas a la posición relativa de los colectores entre sí, los cuales se pueden dar sombra unos a otros; y las pérdidas inherentes a cada colector, que son motivo del ángulo de incidencia, el cual provoca que en los extremos del colector haya una pérdida de superficie reflexiva útil (Paredes C. , 2012). El área que el colector pierde por este hecho se define según las ecuaciones según (Paredes C. , 2012):

$$S_e = L_r * L_e = L_r * F_m * \tan(\theta) \qquad (2.21)$$

$$F_m = F + (F * \frac{L_R^2}{48 * F^2}) \qquad (2.22)$$

Donde:

Se= El área perdida

Lr= El lado recto de la parábola

F= La distancia focal

Θ = El Angulo de incidencia de la radiación solar directa.

Fm= Distancia media entre la superficie de la parábola y el receptor

- **Perdidas Ópticas:** Esto se produce básicamente por la imperfección de los elementos de del colector. Esta desventaja hace que solo una parte de la radiación solar incida sobre los colectores, de esta manera llega en poca proporción la energía solar hacia el tubo receptor (Paredes C. , 2012). Los parámetros que afectan son:

  Reflectividad de la superficie del concentrador ($\boldsymbol{\rho \pm 90\%}$).- disminuye la reflectividad según aumenta la suciedad en la superficie colectora (Paredes C. , 2012). Según (Hongn, Flores, & Saravia, 2011) la reflectividad para una lámina de 2mm es de 0.91 y una reflectividad espectral de 0.92 según (Hongn & flores, 2014)

  Factor de interceptación ($\boldsymbol{\gamma \pm 95\%}$).- Esto se refleja en las imperfecciones del espejo y los posibles errores de seguimiento de sol, haciendo que los royos no intercepten en su totalidad al tubo absorbente (Paredes C. , 2012). según (Méndez Burgos, 2015) tiene un valor de 0.92

  Transmisividad de la cubierta de cristal ($\boldsymbol{\tau \pm 90 - 95\%}$).- Una parte de radiación solar que emite el colector no es capaz de atravesar el tubo absorbedor (Paredes C. , 2012)**.**

  Absortividad ($\boldsymbol{\alpha \pm 90 - 96\%}$).- Cuantifica la cantidad de radiación incidente sobre la superficie selectiva que ésta puede absorber (Paredes C. , 2012), la absortividad es de 0.97 (Ibarra & Rojas, 2012).

Por tanto, según (Paredes C. , 2012), se define como Rendimiento Óptico Pico del CCP, al producto de los cuatro parámetros descritos:

$$\eta_{\mathrm{opt.0^\circ}} = \rho * \gamma * \tau * \alpha \qquad (2.23)$$

2.10.1.3.2. El tubo de absorción o Receptor. - es un elemento fundamental, pues el rendimiento del colector depende en gran parte de la calidad termodinámica del absorbente, ello puede constar de uno o dos tubos concéntricos por lo que el primer tubo inferior debe ser metálico de elevada absorbida (mayor a 90%) y de baja emisividad (menor 30%) (Paredes C. , 2012). Por otro lado, el tubo exterior es de cristal y tiene el objetivo de reducir las pérdidas térmicas por convección del tubo metálico, así como de protegerlo frente a las condiciones meteorológicas adversas (Paredes C. , 2012).

- **Perdidas térmicas:** Según (Paredes C. , 2012), "las perdidas asociadas están formadas por perdidas por conducción, por convección y por radiación de los diferentes medios que conforman el conjunto del tubo absorbedor, es decir, por el tubo metálico, la cubierta de cristal, y la atmosfera. Aunque cada una de las perdidas asociadas se pueden calcular de forma independiente según las ecuaciones de transferencia de calor, en la práctica las perdidas térmicas totales QL se engloban en un único coeficiente global $\mathrm{U_L}\ \left[\frac{W}{m^2_{abs}} * °C\right]$".

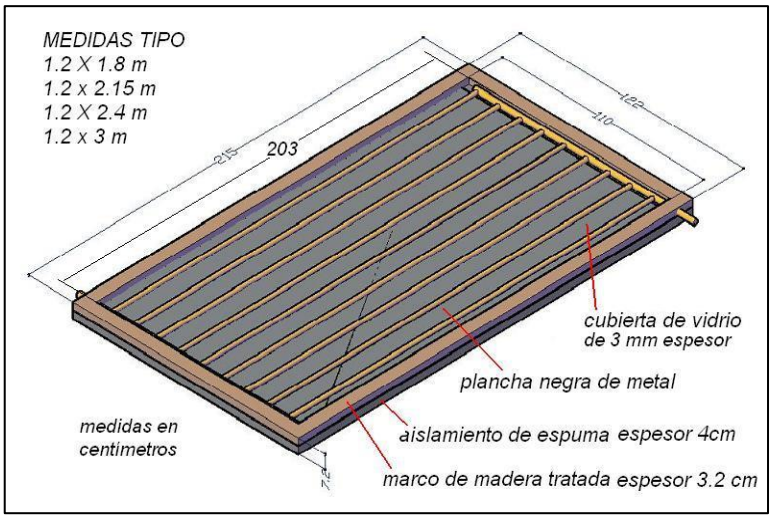
$$\mathrm{QL} = \mathrm{Qabc, radiacion} + \mathrm{Qabc, conduccion/conveccion}$$

$$\mathrm{QL} = \mathrm{U_{L,abc}} * \pi * \mathrm{D} * \mathrm{L} * (\mathrm{T_{abc}} - \mathrm{T_{amb}}) \qquad (2.24)$$

Donde:
T_{abc}= Temperatura media del tubo absorbente metálico.
T_{amb}= Temperatura ambiente.
D= Diámetro exterior del tubo metálico absorbente.
L= Longitud del tubo metálico absorbente. $\mathrm{UL} = 4\ \left[\frac{W}{m^2_{abs}} * °C\right]$

2.10.2. Concentrador térmico plano

En los procesos térmicos de los concentradores de placa plana, la radiación se intercepta sobre una placa de absorción por la que pasa el llamado fluido de transporte de calor, se calienta al atravesar los canales por transferencia de calor desde la placa de absorción. La energía transferida por el fluido portador, dividida entre la energía solar que incide sobre el colector y expresada en porcentaje, se llama eficiencia instantánea del colector. Los colectores de placa plana. Son capaces de calentar fluidos portadores hasta 82 °C y obtener entre el 40 y el 80% de eficiencia (Pardo & Tacury, 2009).



Fuente: Adaptado de Diseño, construcción y monitoreo de un sistema de secado de arroz por aire forzado con fuente de energía solar utilizando aceite térmico en la piladora de arroz " Don Lucho" en el cantón de Macara (Pardo & Tacury, 2009).

Figura 16. Concentrador térmico plano

2.10.2.1. Rendimiento del concentrador térmico plano.

Según Pardo & Tacury (2009), para el cálculo de la eficiencia del concentrador térmico plano Se considera estos parámetros

- Área del colector =2.9 m^2
- Temperatura ambiente [Ta] = 34ºC
- Temperatura de la placa Promedio [Tp] = 74ºC
- Emitancia de la placa [εp] = 0.7
- Emitancia de la cubierta de vidrio [εc] = 0.6
- Velocidad del viento [u] = 2 m/s
- Inclinación del colector [θ] = 12º
- Conductividad térmica del Aislante (fibra de vidrio) [ka] = 0.038W/mº
- Conductividad térmica de la placa Y de los tubos (material aluminio) [k] = 211W/m2

2.10.2.1.1. Cálculo del número de Nusselt

$$N_u = 0.56\left[\left(\frac{D.\rho^2.\beta.g.\Delta T}{u^2}\right)\left(\frac{u}{CP_{ac}.k_{ac}}\right)\right] \qquad (2.25)$$

Donde:

Densidad del aceite [ρ] =875 kg/m^3

Viscosidad dinámica [μ] =1,936 N/m^2

Calor específico [cpac] =2070J/KgºK

Conductividad térmica [kac] =0.128 J/s.m.k

Número de Reynolds [Re] = 74.57

2.10.2.1.2. Calculo del factor de eficiencia de calor

Según Pardo & Tacury (2009), se utiliza la siguiente fórmula matemática.

$$n = \frac{1/UL}{w\left[\frac{1}{UL[D+(W-D)n_a]}+\frac{1}{\pi.D.H_{fi}}\right]} \qquad (2.26)$$

Donde:

UL= perdidas térmicas
H_{fi} = Coeficiente de transferencia de calor

2.10.2.1.3. Radiación Absorbida

Según Pardo & Tacury (2009), se utiliza la siguiente fórmula matemática.

$$S = E_{Tm} \times \tau \times \alpha \qquad (2.27)$$

Donde:

E_{Tm} = radiación solar directa en un plano inclinado (W/m^2)
α = Coeficiente de absorción es 0.90
τ = Coeficiente de transmisión es 0.88

2.10.2.1.4. Calor útil

Según Pardo & Tacury (2009), se utiliza la siguiente fórmula matemática**.**

$$Q_u = A_c.F_r\left[S - U_L\left(T_p - T_a\right)\right] \qquad (2.28)$$

Donde:

Ac= Área del concentrador
Fc =Factor de remoción de calor
S=Radiación absorbida
UL= Perdidas térmicas
Tp =Temperatura ambiente

Ta =Temperatura de la placa Promedio

2.10.2.2. Eficiencia del concentrador plano

Para calcular la eficiencia del concentrador térmico plano se utiliza la ecuación matemática planteada por (Pardo & Tacury, 2009).

$$n_c = \frac{Q_{ut}}{E_{tm}.A_c}.100 \qquad (2.29)$$

Donde:

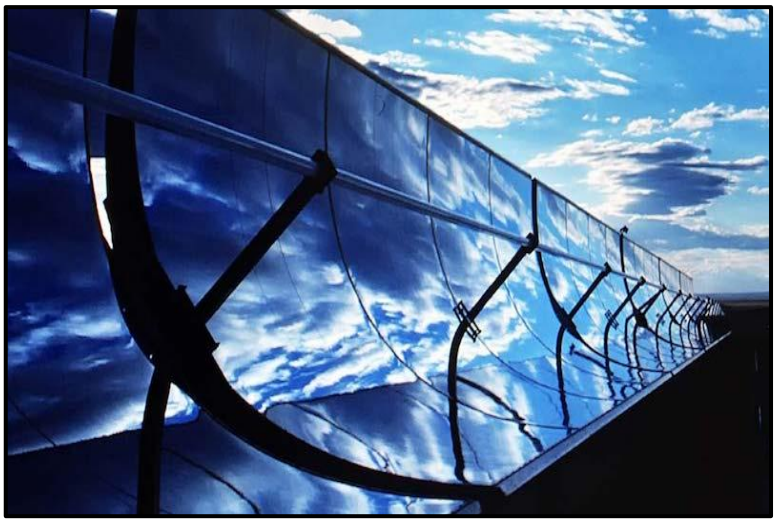
Q_{ut}=Calor útil
E_{tm}= Radiación solar directa sobre una superficie inclinada
A_c =Area del concentrador térmico plano.

2.11. Transferencia de calor en los concentradores térmicos

Se considera transferencia de calor, en física, proceso por el cual se intercambia energía en forma de calor entre cuerpos que se encuentran a distintas temperaturas (Sibaja, 1985).

Según (Bonilla, 2015) en un secador solar la radiación solar se convierte en un motor para su funcionamiento donde se utiliza los principios de transferencia de energía. La determinación del régimen de transferencia del calor a una específica diferencia de temperatura, es la clave para determinar el tamaño del colector necesario para proveer una determinada temperatura, el calor se transfiere de tres modos diferentes según (Sibaja, 1985):

Las pérdidas de calor en un colector solar del tipo cilíndrico, son por causa de convección (Bonilla, 2015). Por supuesto, el porcentaje de incidencia de cada uno de los factores (radiación, conducción y convección) depende de la temperatura del colector, los materiales que se utilizan y las características ambientales (Sibaja, 1985).



Fuente: Adaptado de Colectores Solares (Sibaja, 1985)
Figura 17. Concentrador cilíndrico parabólico

2.11.1. Conducción

La conducción es un proceso por el cual el calor fluye de una región de alta temperatura a una región de baja temperatura dentro de un sólido, un líquido o un gas, o entre diferentes medios que están en contacto físico (Bonilla, 2015). De los tres modos de transferencia de calor, la conducción es el único que puede fluir en sólidos opacos (Sibaja, 1985). La relación básica de transferencia de calor por conducción establece que el régimen de flujo de calor por conducción en un material está dado por la siguiente ecuación:

$$\mathrm{Qcond} = \frac{\mathrm{K}*\mathrm{A}}{\mathrm{x}} * (\mathrm{T}_1 - \mathrm{T}_2) \qquad (2.30)$$

Donde:

K =conductividad térmica W/m°C
A=área de sección transversal (m^2)
ΔT=diferencia de temperatura entre los puntos
X= distancia en dirección del flujo de calor (m)

La conducción de calor es muy parecida a la conducción eléctrica, pues en ambas se requiere una diferencia de temperatura (en electricidad, la diferencia es de voltaje) y una vía material de transmisión (Bonilla, 2015). Las propiedades de los conductores de electricidad y del calor son similares (los metales conducen muy bien, mientras que los plásticos ofrecen gran resistencia).

Las vías cortas y anchas conducen mejor que las vías largas y angostas. La razón del flujo depende de la diferencia en la temperatura entre los dos puntos (Bonilla, 2015).

2.11.2. Radiación térmica

La emite cualquier cuerpo que tiene calor, como las ondas de radios parten de una antena (Bonilla, 2015). El flujo de calor depende de la temperatura ambiente del objeto, sin tomar en cuenta la distancia. Un colector solar está normalmente más caliente que el medio que lo rodea y va a irradiar calor hacia afuera de la lámina de absorción (Bonilla, 2015). En sistemas solares debe tomarse en cuenta la irradiación, pero no se puede controlar en forma tan sencilla como la convección y la conducción (Bonilla, 2015). La radiación o intensidad de calor que emite una superficie está en función de la temperatura a la cuarta potencia por la emisividad de la superficie y por la constante de Stefan Boltzman (5,667 x 10-8 W/m2 K 4) según (Sibaja, 1985). La radiación de una superficie se obtiene de la siguiente manera según (Bonilla, 2015):

$$E = \epsilon * \sigma * T_e^4 \qquad (2.40)$$

Donde:

ϵ = emisividad de la superficie
σ= constante de Estfan Boltzman
A= área efectiva
T= temperatura absoluta

Con respecto al caso especial del colector solar, hay dos casos especiales cuyos cálculos se realizan en forma más simplificada (Bonilla, 2015). El primer caso especial es cuando se quiere establecer la radiación térmica entre 2 superficies planas paralelas a infinito. En este caso según (Cengel, 2013), la fórmula aplicable es la siguiente:

$$Q = A * \frac{\sigma * \left(T_e^4 - T_1^4\right)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1\right)} \qquad (2.41)$$

Donde:

ϵ = emisividad de la superficie
σ= constante de Estfan Boltzman
A= área efectiva

El segundo caso especial es cuando una superficie pequeña (colector solar) está rodeada por una superficie grande (como el cielo). En este caso (Cengel, 2013) no dice que, la fórmula es la siguiente:

$$Q = A * \epsilon * \sigma * (T_{Cielo}^4 - T_{Colector}^4) \qquad (2.42)$$

Donde:

ϵ = emisividad de la superficie
σ= constante de Estfan Boltzman
A= área efectiva
ΔT=diferencia de temperatura entre el cielo y el colector

2.11.3. Convección

La transferencia de calor por medio de convección requiere del movimiento o flujo de un líquido o un gas (Bonilla, 2015). La transferencia ocurre cuando el líquido o gas se mueve de un punto a otro llevando calor (Bonilla, 2015). La transferencia de calor por medio de convección es un factor muy importante de considerar en el diseño y construcción del colector solar. La fórmula general de la convección es según (Cengel, 2013):

$$Q = A * H * (T_1 - T_2) \qquad (2.43)$$

Donde:

H=coeficiente de transferencia de calor W/m°C
A=área de sección transversal (m2)
ΔT=diferencia de temperatura entre los puntos

Para el adecuado funcionamiento de un colector solar, se requiere controlar la convección de dos formas (Bonilla, 2015). Primero, se debe tratar de disminuir la convección de calor que ocurre entre las superficies de la lámina de absorción y la cubierta del colector. Esto ocurre naturalmente por el calentamiento de aire por la lámina (convección natural) (Bonilla, 2015). Segundo, se debe tratar de disminuir la pérdida de calor por medio del flujo de aire que pasa encima del colector por el viento (convección forzada) (Bonilla, 2015). Estas medidas tienen el propósito de reducir las pérdidas de calor de los colectores solares de placa plana con el fin de mejorar su eficiencia (Bonilla, 2015).

2.12. Fluidos de trasporte de calor.

2.12.1. Aceite residual de motor

Los aceites usados de motores son materiales altamente contaminantes, lo cual puede causar daño al medio ambiente, agua, suelo y salud de las personas. El aceite residual contiene diversos compuestos químicos tales como metales pesados (cromo, cadmio, arsénico, plomo, entre otros) hidrocarburos aromáticos polinucleares, benceno y algunas veces solventes clorados, entre otros (Fong, Quiñonez, & Tejada, 2017).

La valorización energética del aceite usado de motores al mezclarse con el fuel-oil para combustión directa en hornos de cemento o en calderas industriales pequeñas, se presenta como alternativa de aprovechamiento; por su alto poder calorífico se constituye en uno de los residuos con mayor potencial para ser empleado como combustible en calderas domésticas, industriales y comerciales de baja potencia. Esta práctica, sin embargo, no es recomendable debido a la gran problemática ambiental que generan al contaminar el aire y cuerpos de agua (Fong, Quiñonez, & Tejada, 2017).

Las propiedades de los aceites usados dependen de las bases lubricantes, de los aditivos para mejorar la viscosidad, el poder detergente y la resistencia a altas temperaturas (Pardo & Tacury, 2009).

Tabla 2. Caracterización de aceite usado de motores reciclados F-2 y F-1

Aceites Usados	
Propiedad	**Valor**
Viscosidad (Centi Stokes)	60
Humedad (%)	0.01
Azufre (ppm)	0.16
Aluminio (ppm)	12.28
Hierro (ppm)	3.03
Sodio (ppm)	15.52
Zinc (ppm)	7.04
Cobre (ppm)	0.041
Silicio (ppm)	2.43
Fosforo (ppm)	5.46

Cloro (ppm)	18.95
Calcio (ppm)	48.33
Sedimentos (%)	0.01
Cenizas (%)	0.008
Densidad (Kg/L)	0.9004

Fuente: Tomado de Fong, Quiñonez, & Tejada, (2017).

Los aceites y grasas usadas oscilan un poder calorífico de 9.000 kilocalorías sobre kilogramo (Angarita, 2000) por lo que puede remplazar al carbón como combustible ya que esta tiene un poder calorífico de 7.000 kilocalorías sobre kilogramo (Angarita, 2000).

La densidad del aceite residual es de 875 kg/m^3, una viscosidad cinemática de 3.86x10^{-6} m^2/s^{-1} (Gallego & Campagnoli, 2017), una conductividad térmica de 0.128 J/s.m.k , así como también una viscosidad dinámica de 1,936 N/m^2 (Paredes C. , 2012) y con poder calorífico de 2070 J/kg°K (Tenazoa & Mallqui, 2017)

2.12.2. Salmuera

Según Carrier (1980), menciona que, la salmuera es agua con una concentración de sal superior al 5 % (NaCl) disuelta. Existen ríos y lagos salados en donde no hay vida por el exceso de sal y de donde se extrae la salmuera, principalmente para obtener su sal evaporando el agua en salinas. La salmuera puede ser venenosa para algunos animales que beben de esta".

Por extensión, también se llama salmuera a disoluciones altamente concentradas de otras sales. En refrigeración recibe el nombre de salmuera toda solución acuosa que se utiliza como medio de transferencia de calor cuando la temperatura es inferior a 0 ºC (Carrier, 1980).

Respecto al uso de la salmuera en concentradores térmicos, podemos abarcar amplia gama de información. Por lo general se tiene conocimiento que todos los materiales absorben calor proveniente de la radiación solar, esos actúan diferentes dependiendo a su naturaleza (Carrier, 1980).

Cuando los fotones golpean los átomos acurren dos fenómenos naturales: la conducción (el calor se focaliza dentro del material) y la convección (emisión de calor al exterior). Amos aspectos son importantes para la absorción de la

energía seleccionada a partir del material adecuado, lo cual debe de tener alta conducción y baja convección (Carrier, 1980).

Existen ejemplos típicos para almacenar calor, es el aceite térmico y otra es la sal fundida.

En un estanque relleno con salmuera (solución de agua con sal) las aguas que están en la parte superior sorben como colectores y del parte inferior como almacenes de energía (cuya densidad salina es mayor), logrando obtener temperaturas de 80 a 90 °C (Avalos, 2010).

2.13. Aislantes térmicos

Un aislante térmico es un material que presenta una elevada resistencia al flujo de calor, lo cual reduce la transferencia de calor a la cara opuesta. Un aislante térmico mejora la eficiencia energética, por lo que se considera un aislante térmico aquel material que tiene una conductividad térmica menor que 0,050 W/mk y una resistencia mayor que 0,25 m^2K/W (Palomino, 2017).

2.13.1. Cascarilla de arroz como aislante térmico

La cascarilla de arroz es el recubrimiento del grano de arroz, su tamaño oscila entre los 5 y 11 mm. Su apariencia superficial es irregular con un patrón de ranuras longitudinales (superficie ‘dentada’) que le confieren propiedades altamente abrasivas (Gutiérrez, Cadena, & Bula, 2013).

Tabla 3. Composición química de la cascarilla de arroz

Elemento	% en peso
Carbono	39-42
Oxigeno	32-34
Minerales	14-24
Hidrogeno	4-5
Nitrógeno	0.3-2

Fuente: Tomado de Gutiérrez, Cadena, & Bula, (2013).

La cascarilla de arroz tiene gran cantidad de poros en su interior, los cuales representan un 54% de su volumen (Gutiérrez, Cadena, & Bula, 2013), lo que le confiere gran capacidad termoaislante. Su coeficiente de conductividad térmica k es comparable a la del corcho granulado o lana mineral, convirtiéndola en candidata para usarla como componente de sistemas de aislamiento térmico.

Según (Gutiérrez, Cadena, & Bula, 2013) la cascarilla de arroz a una temperatura de 50°C tiene una conductividad térmica de 0.036 W/m.K, además tiene un contenido de humedad 9.08% con una densidad de 92kg/m3, y un poder calorífico mínimo de 14.22 MJ/kg.

2.13.2. Aserrín de madera como aislante térmico

El aserrín es el desperdicio generado en el proceso de serrado de la madera. A este material, que en principio es un residuo o desecho de las labores de corte de la madera, se le han buscado destinos tipos de uso con el paso del tiempo.

Según Gutiérrez & González, (2012), menciona que el aserrín de madera tiene una densidad de aparente de 175 kg/m^3, y una conductividad térmica de 0,092 W/m.K.

2.14. Humedad de la madera

El contenido de humedad promedio de *Guazuma crinita,* Mart. (Bolaina blanca) es 85.63%, así mismo, se determinó que la base del fuste presentó mayor contenido de humedad (98.46 %) siendo estadísticamente superior que al nivel medio (80.83%) y ápice (77.61 %) (Rivera, 2014).

Toda la madera, de árboles en crecimiento, contiene una considerable cantidad de agua que se la conoce como savia. El peso del agua del árbol vivo (o madera verde) después de que es cosechado puede ser similar al peso de la madera en sí (Medrano, 2003)

En terminología, el agua presente en la madera o en un producto de madera se expresa como el contenido de humedad (Cordova, 2005). El contenido de humedad se define como la relación porcentual del peso del agua contenida en la madera, con respecto al peso seco, es decir sin humedad en la madera (Cordova, 2005). El contenido de humedad se representa con la fórmula (Salas, Moya, & Cordova, 2008).

$$\mathrm{CH} = \frac{\text{Peso del agua}}{\text{Peso seco del horno}} * 100 \qquad (2.43)$$

Existen varios métodos para determinar la humedad, pero los más relevantes son las que se mencionaran a continuación (Cordova, 2005):

2.14.1. Método gravimétrico o por diferencia de peso

De una pieza de madera se corta una muestra e inmediatamente se pesa para obtener el peso inicial (Pi), luego se coloca en un horno a una temperatura máxima de 105 grados Celsius hasta que se obtenga peso constante de la muestra, el que será el peso seco al horno o peso final (Po) (Cordova, 2005). Para calcular el contenido de humedad (CH) se aplica la siguiente fórmula según (Cordova, 2005)

$$\mathrm{CH} = \frac{\mathrm{Pi}-\mathrm{Po}}{\mathrm{Po}} * 100 \qquad (2.44)$$



Fuente: Adaptado de Conceptos básicos sobre el secado de la madera (Cordova, 2005).

Figura 18. Determinación de contenido de humedad por método gravimétrico

2.14.2. Métodos eléctricos

Las propiedades eléctricas de la madera más importantes son su resistencia al paso de una corriente eléctrica y sus características como material dieléctrico (Cordova, 2005). Estas se utilizan como base para la fabricación de aparatos destinados a medir el contenido de humedad de la madera (Cordova, 2005). Estos medidores eléctricos tienen la ventaja de que las lecturas del contenido de humedad son inmediatas y es una determinación no destructiva; pero presentan ciertas limitantes, principalmente el rango de confiabilidad (6 a 25% CH), se debe corregir la lectura según especie, temperatura y dirección del grano en la madera (Cordova, 2005).



Fuente: Adaptado de Conceptos básicos sobre el secado de la madera (Cordova, 2005).

Figura 19. Determinación de contenido de humedad por método eléctrico

DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Aceite residual de motores: Fluido que contiene diversos compuestos químicos tales como metales pesados (cromo, cadmio, arsénico, plomo, entre otros) hidrocarburos aromáticos polinucleares, benceno y algunas veces solventes clorados, entre otros (Fong, Quiñonez, & Tejada, 2017).

Aislantes térmicos: Material que presenta una elevada resistencia al flujo de calor, lo cual reduce la transferencia de calor a la cara opuesta (Palomino, 2017).

Aserrín de madera: Residuo del proceso de aserrío y pueden llegar a ser un problema en la industria de la madera, debido a que ocupan mucho espacio en la línea de producción después del aserrío (Juárez et al., 2001).

Cámara de secado: Espacio útil de la estufa en el que se introduce la carga de madera a secar (Quintana, 2014).

Cascarilla de arroz: Material que recubre del grano de arroz, su tamaño oscila entre los 5 y 11 mm. (Gutierrez , Cadena, & Bula, 2013).

Concentrador térmico: Armado con superficie reflectora, se caracteriza por ser la mitad de un cilindro, ayudando a reflectar eficazmente la radiación solar hacia el foco (Hernandez, 2012).

Energías renovables: Energías limpias obtenidas de fuente que son capaces de regenerarse por medios naturales y, por lo tanto, se consideran inagotables. (Rodiguez & Zambrano, 2010)

Fluido trasportador de calor: Sustancia que puede fluir, se puede encontrar en estado lıquido y gaseoso. Se caracterizan por su conductividad térmica. (Torres J. , 2015).

Humedad de madera: Cantidad de agua que se encuentra en la madera, parámetro medido en porcentaje (%), (Perré, 1993).

Densidad de la madera: Propiedad de la madera, presenta una estrecha relación con el comportamiento físico-mecánico de este material (Carmona, Espinoza, & Bull, 1998).

Secado de madera: Proceso de reducción de humedad de madera. Durante el secado se generan algunos defectos debido a la distribución variable del contenido de humedad y de la temperatura al interior del material (Torres S. , 2009).

Radiación solar: Ondas solares emitidas por el sol que llega a la tierra en forma de radiación solar con una longitud de onda entre 300 y 2.500 nm (Twidell & Weir, 2006)

Salmuera: Agua con una concentración de sal superior al 5 % (NaCl) disuelta (Carrier, 1980).

Transferencia de calor: Emisión de calor de un cuerpo a otro**,** desde el más caliente al más frío, resultado de la Segunda Ley de la Termodinámica. (Carrier, 1980).

CAPITULO III
METODOLOGÍA

3.1. Método de investigación

El método de investigación fue de tipo descriptivo experimental, aplicada en campo, con un nivel de investigación exploratorio, con 5 pruebas experimentales en el que se diseñó y construyó un prototipo de secador solar, utilizando fluidos de trasporte de calor y aislantes térmicos para el secado de madera de baja densidad, aprovechando la radiación solar.

3.2. Población y muestra

La población y muestra es de tipo no probabilístico, por lo que representara el prototipo construido en el Instituto de Investigación de la Amazonia Peruana, km 12.300 de la carretera Federico Basadre, Distrito de Yarinacocha, Provincia de Coronel Portillo, Región Ucayali.

3.3. Procedimiento de recolección de datos

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

3.3.1.1. Diseño y dimensiones de la cámara de secado.

La cámara de secado tuvo la forma geométrica de un cubo cuya capacidad volumétrica fue de 8 m^3. Las paredes se construyeron de aluminio galvanizado con armazones de madera quinilla, para los armazones se utilizaron listones de 2 pulg por 1 ¼ pul por 2 m de largo. Cada pared tuvo 2 m de largo por 2 m de ancho, con un espesor de 2 pulg en donde se colocó los aislantes térmicos (cascarilla de arroz y aserrín de madera) en las pruebas correspondientes. La cámara de secado tuvo una puerta de 2 m de largo por 2 m de alto abriéndose hacia afuera (figura 20). Se instaló dos (02) ventiladores de 12 voltios cada uno, frente al radiador. Los fluidos de transporte de calor (aceite residual de motor y salmuera) recircularon por el circuito cerrado de tubos de aluminio durante un tiempo de 30 segundos y deteniéndose 90 segundos durante un tiempo de 8 horas (8 a.m. – 4 p.m.), trasportando el calor hacia la cámara de secado. Se utilizó jebe de goma entre las uniones de las paredes para hermetizar la cámara y evitar fugas de aire durante el proceso de secado de la misma manera la cámara de secado tuvo cuatro (04) ventilas de 0.3 m de diámetro ubicadas en la parte superior del techo.

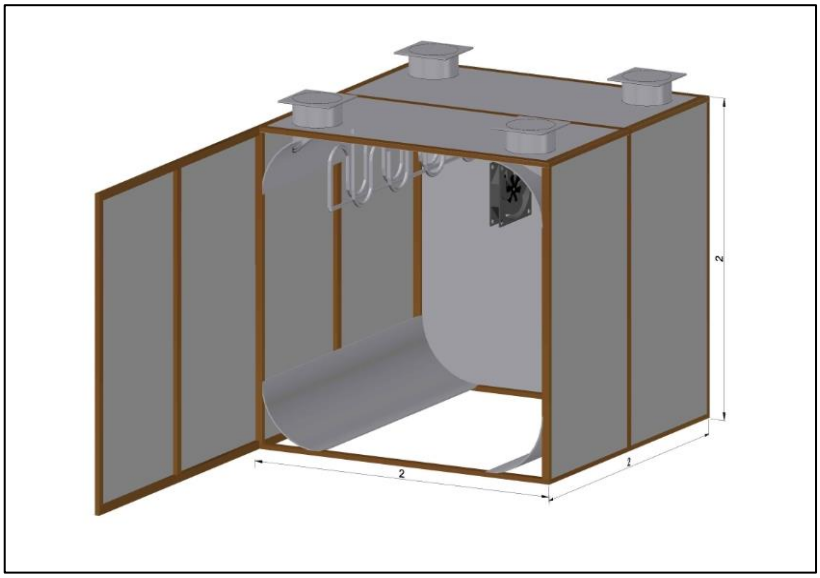


Figura 20. Diseño y dimensiones de la cámara de secado

3.3.1.2. Diseño y dimensiones del concentrador térmico cilíndrico parabólico (CCP) y concentrador térmico plano.

3.3.1.2.1. Cálculo de las dimensiones del concentrador térmico cilíndrico parabólico (CCP).

Tomado como referencia las ecuaciones matemáticas de (Paredes C. , 2012) se procedió a calcular las dimensiones del concentrador térmico y del tubo receptor.

Para calcular el lado recto y foco, se utiliza la fórmula del arco de una curva, por la cual se puede conocer la longitud de esta.

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

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

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

Por lo tanto, se contó con una placa de metal de 1.51m de ancho y 1.8 m de largo, lo cual fue cubierto de espejo. Se tuvo lo siguientes datos.

Tabla *4.* Relación del foco con su respectiva coordenada de abertura máxima

Foco	**0.325 m**
X máximo	**0.65 m**
Y máximo	**0.325 m**

Dicho esto, la parábola definitiva tuvo las siguientes dimensiones: Foco es igual a 0.325 m, lado cuervo tuvo 1.51 m y el lado recto fue de 1.30 m.

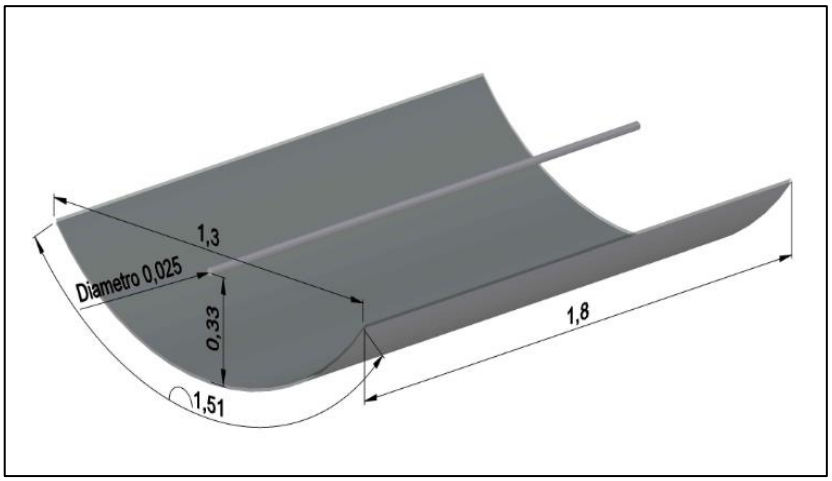


Figura 21. Perfil del canal parabólico en metros

En la figura 21, se muestra el concentrador térmico de tipo cilíndrico parabólico, lo cual tuvo la función de reflectar la radiación solar, dicha radiación fue absorbida por el tubo de aluminio que en su interior recirculaba los fluidos de transporte de calor (aceite residual de motores y salmuera) en diferentes pruebas.



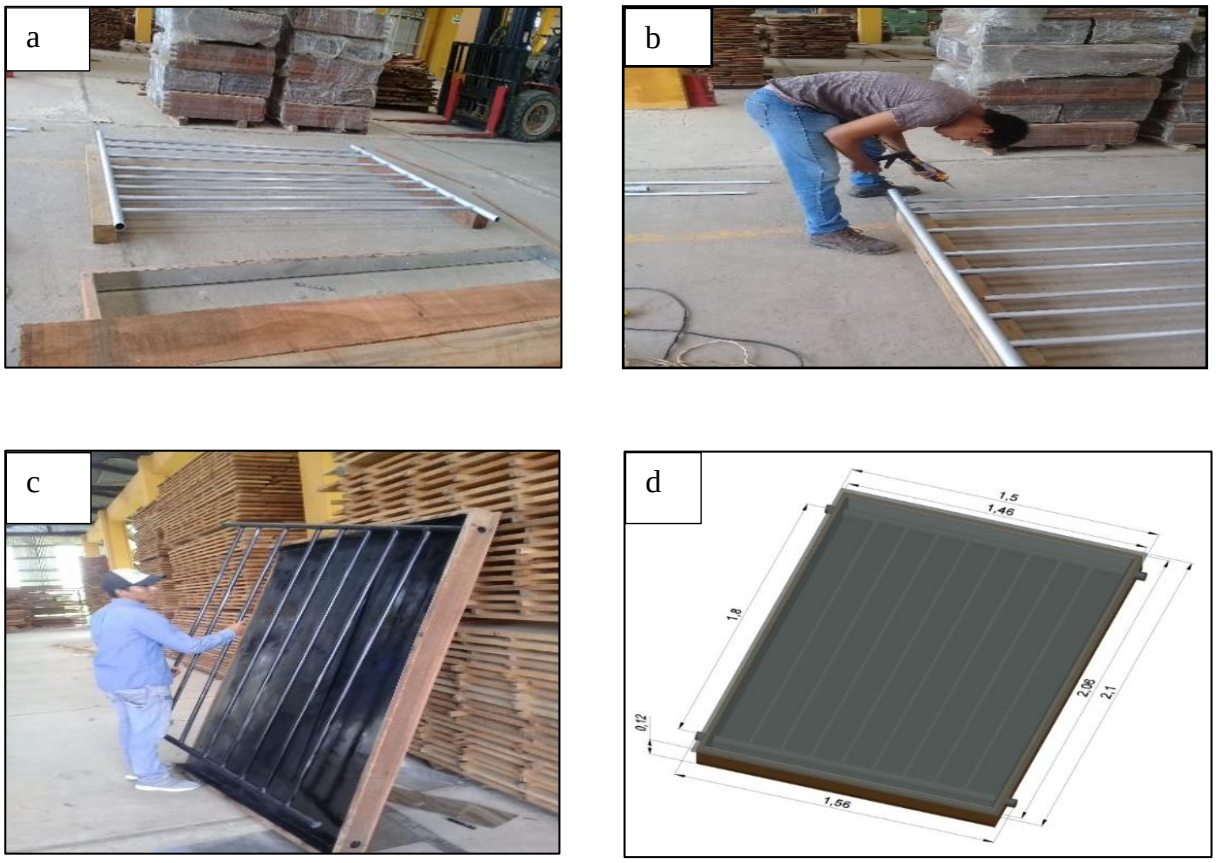
Nota: Construcción del armazón de metal (a), pegado de láminas de espejo (b), Concentrador térmico cilíndrico parabólico terminado (c).

Figura 22. Construcción del concentrador cilíndrico parabólico

En la figura 22, el concentrador térmico cilíndricos parabólico que se ubicó en la parte superior de la cámara de secado, fue construido con tubos de fierro y una plancha de aluminio galvanizado de 1.51m de lado curvo por 1.80m de largo, sobre cuya superficie se colocaron espejos de 2cm de ancho por 90 cm de largo adheridos con silicona fría.

3.3.1.2.2. Diseño y dimensiones del concentrador térmico plano.

Se construyó un concentrador plano con base de madera y una recubierta de aluminio galvanizado, con medidas de 1.46 m de lago, 2.06 m de ancho y 0.10 m de alto. Se seleccionó el tipo de tubos paralelos debido a que del flujo del fluido es mayor, el cual cuenta con dos (02) tubos de aluminio de 2 pul. de forma horizontal de 1.56 m de largo ubicados en los extremos del concentrador; y ocho (08) tubos de aluminio de 1pulg. de forma vertical insertados entre los dos tubos horizontales, estos fueron pintados de color negro con pintura spray y para adherir los tubos entre si se utilizó silicona automotriz. Se utilizó una plancha de vidrio de 1.5 m de ancho, 2.1 m de largo y un espesor de 6 mm colocado en la parte superior del concentrador. La trayectoria del flujo del colector fue de tipo “U” ya que el flujo recorre todos los tubos, trayectoria en longitud y geometría.



Nota: Armado del concentrador térmico plano (a), sellado de tubos de aluminio (b), Pintado del sistema de tubería (c). Medidas y acabado de concentrador térmico plano (d).

Figura 23. Construcción de concentrador plano

3.3.1.3. Características y cálculo del diámetro del tubo receptor

Para el cálculo del diámetro del tubo receptor se tuvo que calcular el ángulo de abertura α y la distancia ρ mediante las ecuaciones matemáticas que se plantea en marco teórico por (Paredes C. , 2012), obteniendo valor de α igual a 133° y distancia ρ igual a 0.212 m empleando la siguiente ecuación se calculó el diámetro mínimo del tubo receptor siendo 0.016m.

$$\emptyset_{\min} = \frac{2 * \rho * \text{tg}16"}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

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

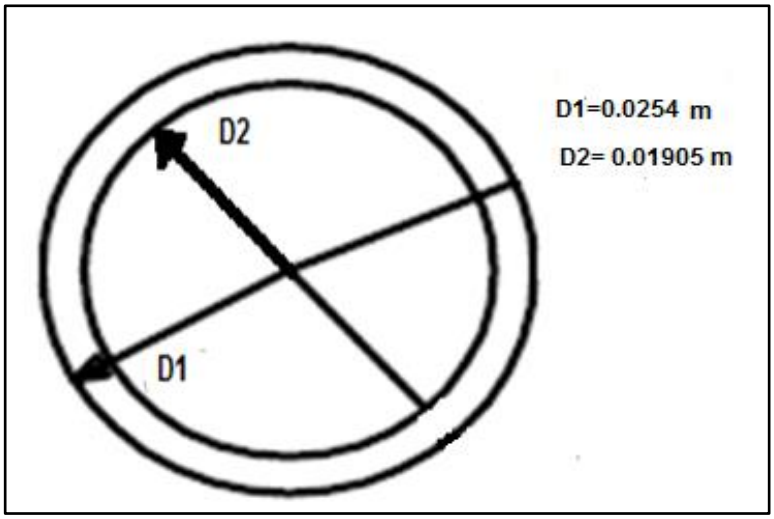


Figura 24. Perfil del tubo receptor

3.3.1.4. Selección del lugar de construcción del prototipo de secador solar.

Para la instalación del prototipo se seleccionó un área ubicada en las instalaciones del “Cava” (Proyecto de manufactura de madera perteneciente al IIAP), debido a que se encuentra con mayor área despejada y de fácil acceso. En Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana-IIAP, se encuentra ubicado en el Km 12.300 de la carretera Federico Basadre, Distrito de Yarinacocha, Provincia de Coronel Portillo, Región Ucayali. Coordenadas UTM: 539729.88 E y 9071140.48 N.

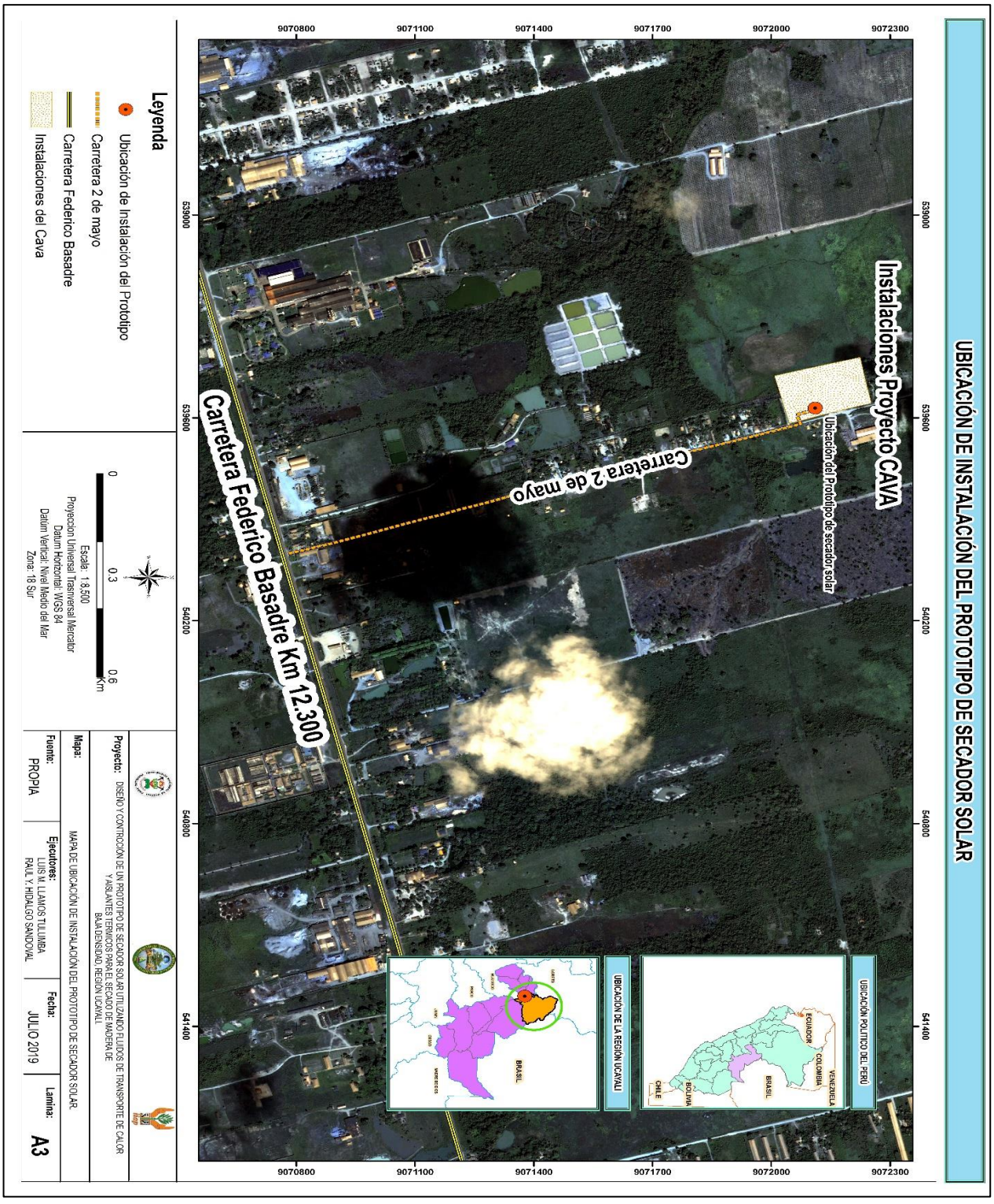
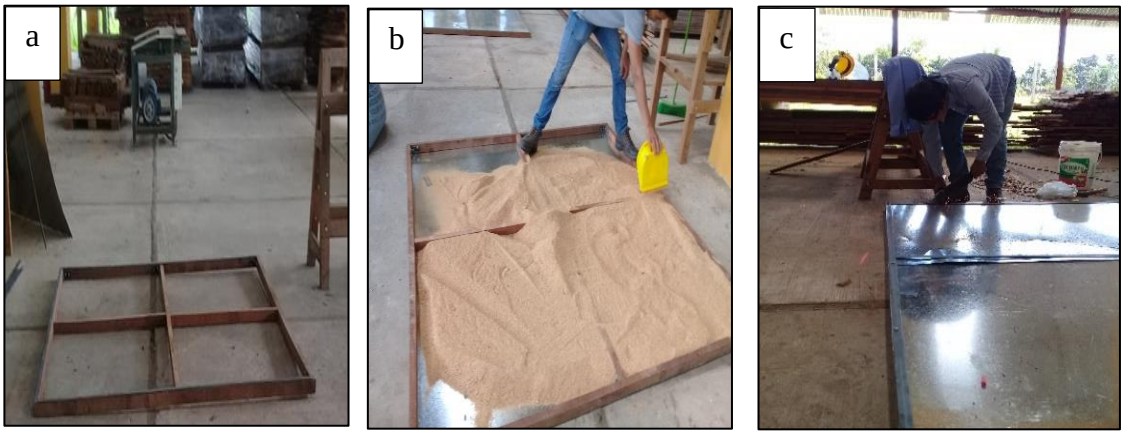


Figura 25. Lugar de instalación del prototipo de secador solar

3.3.1.5. Construcción del prototipo de secador solar.

3.3.1.5.1. Construcción de techo, puerta y paredes.

Se armó tres (03) paredes laterales, un techo y una puerta, cada pared tuvo un área de 4 m^2, se utilizó seis (06) listones de 0.0508m de ancho, 0.0318 m alto y 2 m de larga, siendo espacio entre caras de 0.0508 m para colocar los aislantes térmicos, la estructura se hizo a base de madera quinilla, que por su dureza soporto el flujo de calor, las paredes fueron recubierto de placas de aluminio galvanizado y para generar presión de las placas con la estructura de madera se utilizó varillas de platinas adheridos mediante tornillos autorroscantes. Para la construcción del techo y la puerta se utilizó los mismos materiales y dimensiones de las paredes. En el techo se colocó cuatro (04) ventilas de 0.3 m de diámetro y en el parte inferior derecho de la puerta se colocó una rueda para facilitar el movimiento, de mismo modo se colocó tres seguros para cerrar de manera correcta.



Nota: Estructura de madera (a), llenado del aislante (b), adhiriendo platina (c).

Figura 26. Construcción de techo, puerta y paredes

3.3.1.5.2. Construcción del piso.

En el área seleccionada se construyó un falso piso de 3 m de largo por 3 m de ancho y 0.05 m de espesor con una ligera pendiente, donde se utilizó 21 baldes de ripio y 3 bolsas de cementó APU.

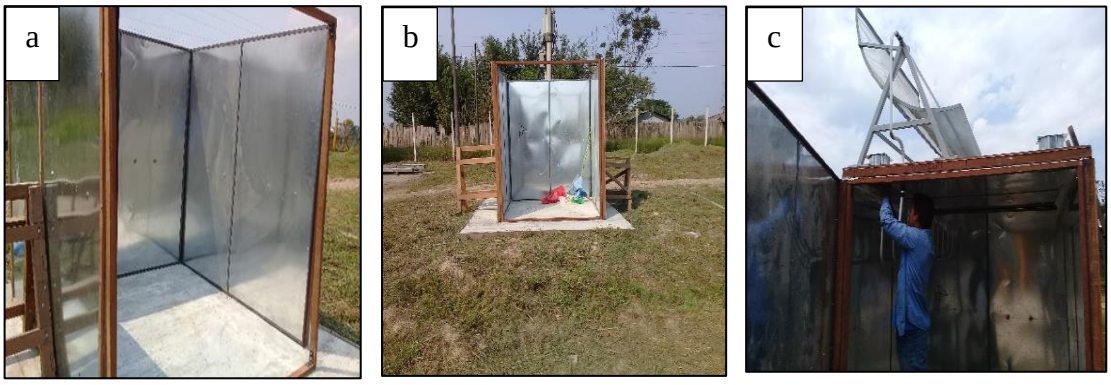


Nota: Desbroce del área (a), mezclado de ripio con cemento (b), piso terminado (c).

Figura 27. Construcción de piso

3.3.1.5.3. Armado de la cámara de secado.

Con las paredes y el piso construido se procedió al armado de la cámara de secado mediante la unión de las paredes formando una figura cubica, estas fueron adheridas mediante tornillos autorroscantes de 4 pulg. la puerta estuvo sujetada mediante 3 bisagras. En las uniones se colocó jebe de caucho para hermetizar la cámara.

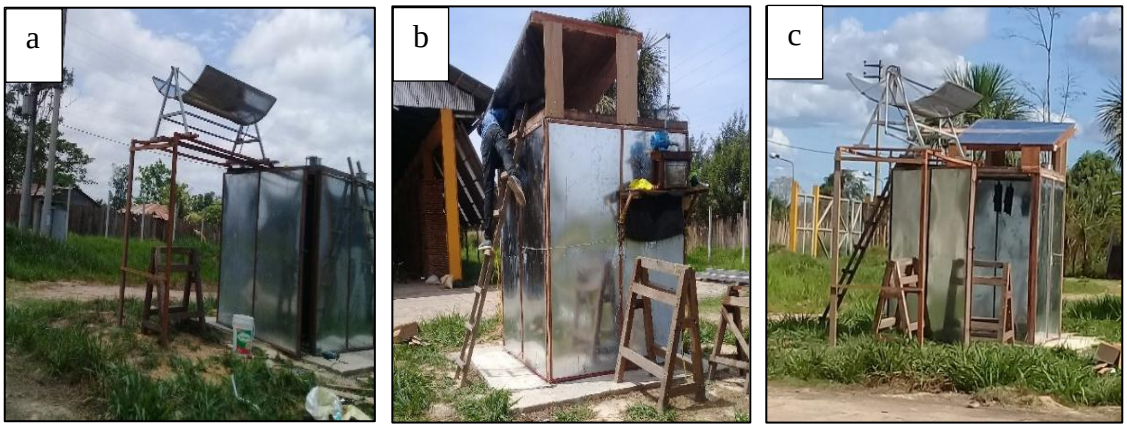


Nota: Unión de las paredes (a), vista frontal de las paredes (b), colocación de puerta (c).

Figura 28. Armado de cámara

3.3.1.5.4. Instalación de concentradores térmicos.

Con la cámara de secado construido se instaló el concentrador térmico plano ubicándolo en la parte superior, teniendo un ángulo de inclinación de 12°, delante de ello se construyó un armado con cuatro columnas para sostener el concentrador térmico cilíndrico parabólico con una orientación de este a oeste.

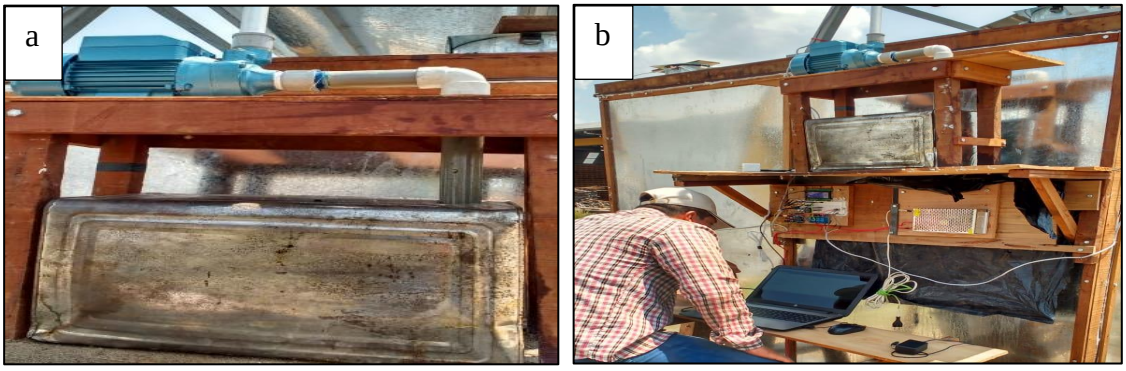


Nota: Construcción del armazón de soporte para CCP (a), instalación de concentrador térmico plano (b), instalación del concentrador térmico plano (c).

Figura 29. Instalación de concentradores térmicos en el prototipo

3.3.1.5.5. Instalación de la electrobomba.

Se instaló una electrobomba de 0.5 hp de marca ENZO en la parte posterior de la cámara, la misma que posee un caudal de 0.66 litro/ seg, dicho caudal fue ideal debido a que la bomba solo hizo recircular el fluido por las tuberías generando su propio flujo másico. Debajo de la bomba se colocó un reservorio con capacidad de 15 litros. Para la salida de la bomba se utilizó unión mixta de 1 Pulg, también se usó un codo de una 1 pulg. adherido a una válvula check list para succionar el fluido, y finalmente se hizo usó de teflón y pegamento de tuvo PVC para evitar fuga.



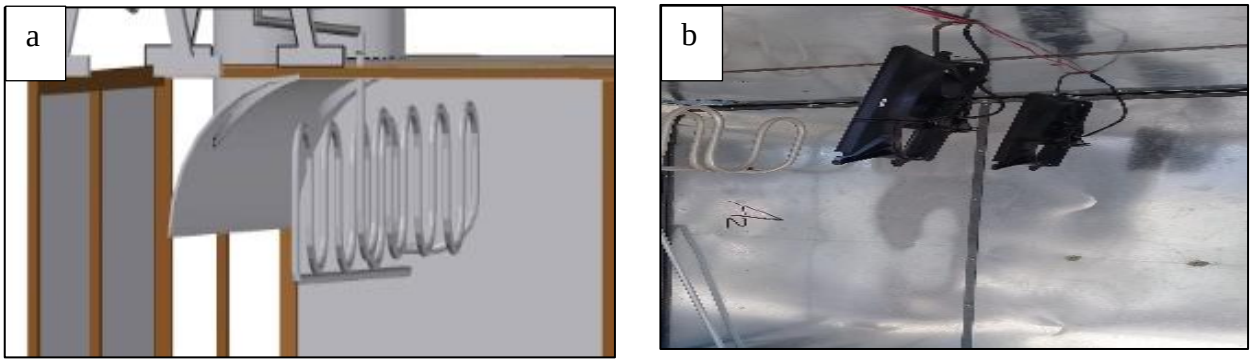
Nota: Instalación de una electrobomba de marca ENZO (a), instalación del reservorio de fluido (b).

Figura 30. Instalación de electro bomba

3.3.1.5.6. Instalación del radiador y ventiladoras.

El radiador se construyó de tubo aluminio de 1 pulg. contando con 2 filas paralelas en forma de serpentín, teniendo 1.80 m de largo y 0.3 m de ancho.

El radiador fue instalado en la parte superior de la pared lateral derecho, frente a él se instalaron 2 ventiladores de 12 v cuyo caudal total es de 1.26 m^3/s.

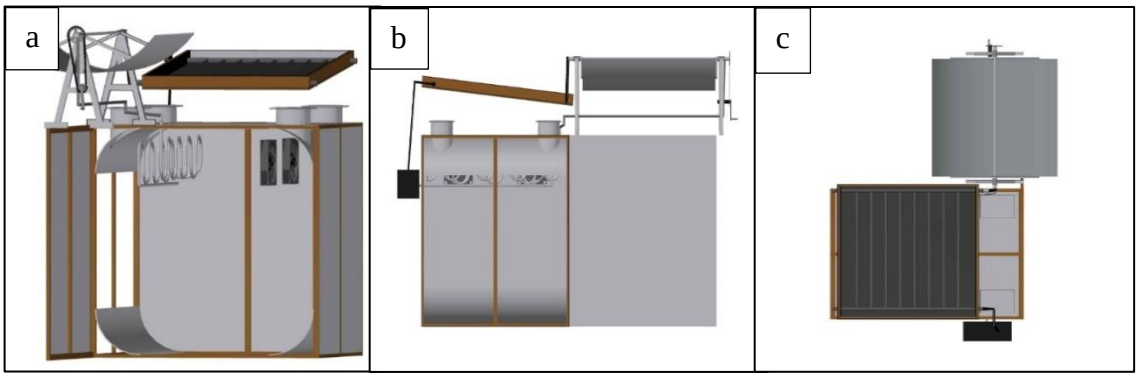


Nota: Instalación del radiador dentro de la cámara de secado (a), Instalación de ventiladoras (b).

Figura 31. Instalación de radiador y ventiladores

3.3.1.5.7. Instalación del sistema de tuberías.

El sistema de tubería dio inicio en la salida de la electrobomba; mediante tubo de aluminio de 1 Pulg se unió al concentrador térmico plano, usando adaptadores de 1 pulg. de entrada y 2 pulg. de salida, seguidamente se hizo la conexión al concentrador térmico cilíndrico parabólico mediante un codo de 1 pulg. y tubo de aluminio. Luego se procedió a conectar la tubería que pasa por el CCP hacia el radiador que se encontró dentro de la cámara. Finalmente se hizo la conexión del radiador hacia el reservorio.

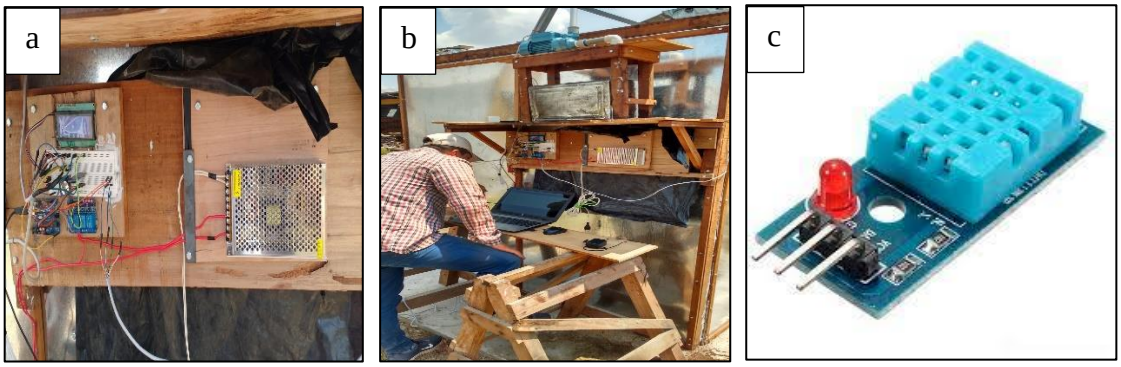


Nota: Vista frontal del sistema de tubería (a), vista lateral del sistema de tubería (b) y vista de planta del sistema de tuberías (c)

Figura 32. Sistemas de tuberías

3.3.1.6. Instalación del sistema de control

Se utilizó una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador Atmel AVR con puertos de comunicación y puertos de entrada/salida también conocido como sistema Arduino. Se instaló un sensor DHT11 en la parte del concentrador térmico para medir la temperatura y humedad relativa alrededor, de la misma manera se instaló dos (02) sensores dentro de la cámara de secado. Respecto a las ventilas se instaló cuatro servomotores para controlar la expulsión del aire húmedo de manera automatizada.



Nota: Instalación del sistema Arduino (a), programación del sistema Arduino (b), sensor de humedad relativa y temperatura (c).

Figura 33. Sistema de control

3.3.1.7. Calculo del rendimiento del concentrador cilíndrico parabólico y la radiación solar directa sobre un plano horizontal.

3.3.1.7.1. Radiación solar directa sobre una superficie horizontal.

Para el cálculo de la radiación solar directa sobre la superficie horizontal en el concentrador cilíndrico parabólico se utilizó una base de datos de irradiación global en la ciudad de Pucallpa, proporcionado por el software informático PvSyst que permite realizar el diseño, simulación y análisis de datos de una instalación fotovoltaica. El software ha sido desarrollado por la Universidad de Ginebra.



Pagina inicial programa PVsyst

Figura 34. Software informático PvSyst

Con la irradiación global sobre la superficie terrestre se procedió a calcular la radiación directa, lo cual fue necesario calcular, mediante las fórmulas matemáticas planteados por (Garcia Badell, 1983) el Angulo de salida del sol, factor de excentricidad, radiación extraterrestre, índice de claridad, fracción difusa e irradiación difusa.

a. Radiación directa

$$H_{dm} = G_0 - D_o \qquad (3.1.)$$

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

b. Angulo de salida del sol:

$$W_s = -\arccos(-\tan(\delta).\tan(\theta)) \qquad (3.2)$$

$Ws_=$Declinación solar
$\emptyset =$Latitud del lugar

c. Factor de excentricidad:

$$E_O = 1 + 0.033\cos\left(\frac{360(dn)}{365}\right) \qquad (3.3.)$$

d. Radiación extraterrestre superficie horizontal

$$H_0 = \left(\frac{T}{\pi}\right).l_0.E_0\left[\left(\frac{\pi}{180}\right).(w_s.\sin(\theta).\sin(\delta) - (\cos(\theta).\cos(\delta).\sin(w_s)\right]$$

(3.4)

T=24 días
L_o=constante solar 1367 w/m2
E_o= factor de excentricidad
W_s= ángulo de salida del sol al amanecer
$\emptyset$ =Latitud del lugar
δ =Declinacion solar

e. Índice de claridad

$$K_{tm} = \frac{G_o}{H_o}.100 \qquad (3.5)$$

G_o= Radiación directa horizontal sobre la superficie de la tierra
H_O=Radiacion extraterrestre sobre la superficie horizontal

f. Fracción difusa

$$F_{dm} = 1 - 1.13(K_{tm}) \qquad (3.6)$$

g. Irradiación difusa horizontal sobre la superficie de la tierra

$$D_o = F_m.G_o \qquad (3.7)$$

F_m = Fracción difusa
G_o= Irradiación global sobre la superficie de la tierra (BD)

3.3.1.7.2. Rendimiento de un concentrador térmico cilíndrico parabólico

Para calcular en rendimiento se planteó la fórmula matemática que plantea (Paredes C. , 2012) lo cual viene dado como el cociente entre la energía térmica útil suministrada por el colector y la energía solar incidente sobre el colector:

$$\eta_{Global} = \frac{Q_{util}}{Qsol} \qquad (3.15)$$

Por lo tanto, el rendimiento de un concentrador solar cilíndrico no dependió de la radiación solar ni de la temperatura de trabajo del fluido, si no de la limpieza del colector ya que ello ayudo a la reflectividad de los rayos solares. Un valor típico del rendimiento óptico pico es aproximadamente 0.75, para un grado de limpieza del 100% (Paredes C. , 2012).

a. Energía solar incidente en el colector solar:

Según (Paredes C. , 2012) La energía solar incidente sobre un colector cilindro parabólico viene dada por:

$$Q_{sol} = S_c * l_0 * \cos(\theta) \qquad (3.8)$$

Donde:

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

S_c=Área de apertura de la superficie reflexiva del colector (m^2)

L_0= Radiación solar directa (W/m^2)

θ = Ángulo de incidencia

- **Perdidas geométricas**

$$F_m = F + \left(\frac{F.L_r^2}{48.F^2}\right) - ST \qquad (3.9)$$

F=Distancia focal

L_r = Lado recto de la parábola

θ=Angulo de incidencia de la radiación solar

ST =Superficie total

- **Perdidas térmicas del tubo receptor.**

Para este cálculo, según (Paredes C. , 2012) en la práctica las perdidas térmicas totales QL se engloban en un único coeficiente global $U_L \left[\frac{W}{m^2_{abs}} * °C\right]$".y determina mediante la siguiente fórmula matemática:

$$QL = Qabc, radiacion + Qabc, conduccion/conveccion$$

$$QL = U_{L,abc} * \pi * D * L * (T_{abc} - T_{amb}) \qquad (3.10)$$

Donde:

T_{abc}= Temperatura media del tubo absorbente metálico.

T_{amb}= Temperatura ambiente.

D= Diámetro exterior del tubo metálico absorbente.

L= Longitud del tubo metálico absorbente.

UL= $4 \left[\frac{W}{m^2_{abs}} * °C\right]$

- **Calculo del Angulo de incidencia de acuerdo al giro del colector sobre eje horizontal Este-Oeste, con ajuste continuo.**

$$\cos(\theta) = \sqrt{1 - \cos^2(\delta).\text{sen}^2(\tau)} \qquad (3.11)$$

δ=Declinación solar

τ =Angulo horario

b. Potencia útil del fluido de transporte de calor.

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

- Densidad = 875 kg/m^3
- Viscosidad cinemática = 3.86x10^{-6} m^2/s^{-1}
- Calor especifico = 2070 J/kg°K
- Conductividad térmica = 0.128 J/s.m.k
- Velocidad del aceite = 2m/s
- Viscosidad dinámica = 1,936 N/m^2

- **Caudal másico del aceite**

$$m = \frac{\rho.v.\pi.D^2}{4} \qquad (3.12)$$

Donde:

ρ =Densidad
v =Velocidad del aceite
D =Diámetro del tubo

- **Coeficiente de película h**

$$h = \frac{N_u.Kf_{Aire}}{D_{tubo\ exteriro}} \qquad (3.13)$$

Donde:
N_u =Numero de Nussel
Kf_{Aire}=conductividad térmica del aire

La potencia útil del aceite se calculó Según (Paredes C. , 2012) quien plantea la siguiente fórmula matemática:

$$q = \frac{T - T_\infty}{\left(\frac{\ln\frac{r_2}{r_1}}{2*\pi*Kf.aire}\right)+\left(\frac{1}{h*2*\pi*l*r2*180/360}\right)} \qquad (3.14)$$

Donde:

T= Temperatura media en el tubo

T_∞= Temperatura ambiente

r_2 = Radio exterior del tubo

r_1 = Radio interior tubo (fluido)

l= Longitud del tubo

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

Se calculó el rendimiento mediante una expresión muy sencilla, planteado por (Pardo & Tacury, 2009).

$$n_c = \frac{Q_{ut}}{E_{tm}.A_c}.100 \qquad (3.22)$$

Donde:
Q_{ut}=Calor útil
E_{tm}= Radiación solar directa sobre una superficie inclinada
A_c =Area del concentrador térmico plano

3.3.1.8.1. Radiación solar directa sobre una superficie inclinada.

Para el cálculo de la radiación solar directa sobre y el factor de corrección de la radiación directa en el concentrador térmico se utilizó las siguientes fórmulas matemáticas (Garcia Badell, 1983).

$$H_{(\beta,\alpha)} = H_{dm}.K \qquad (3.16)$$

H_{dm} =Radiacion directa sobre la superficie horizontal.
k =Factor de corrección de la radiación directa

a. Factor de corrección de la radiación directa

$$\frac{w_{ss}\left(\frac{\pi}{180}\right)[sing(\emptyset)].\sin(\delta).\sin(\emptyset-\beta)+\cos(\delta).\cos(\emptyset-\beta).\sin(w_{ss})}{W_s.\frac{\pi}{180}.\sin(\delta).\sin(\theta)+\cos(\delta).\cos(\theta).\sin(w_s)} \qquad (3.17)$$

W_{ss} =Angulo de salida del sol al amanecer sobre un plano inclinado.
β=Angulo de inclinación del concentrador térmico plano

Se consideró estos parámetros para el modelamiento matemático del colector solar plano:

- Área del colector =2.9 m^2
- Temperatura ambiente [Ta] = 34ºC
- Temperatura de la placa Promedio [Tp] = 74ºC
- Emitancia de la placa [εp] = 0.7
- Emitancia de la cubierta de vidrio [εc] = 0.6
- Velocidad del viento [u] = 2 m/s
- Inclinación del colector [θ] = 12º
- Conductividad térmica del Aislante (fibra de vidrio) [ka] = 0.038W/mºC
- Conductividad térmica de la placa y de los tubos (material aluminio) [k] = 211W/m^2

3.3.1.8.2. Calor útil

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

$$Q_u = A_c . F_r\left[S - U_L\left(T_p - T_a\right)\right] \qquad (3.21)$$

Donde:

Ac= Área del concentrador
Fc =Factor de remoción de calor
S=Radiación absorbida
UL= Perdidas térmicas
Tp =Temperatura ambiente
Ta =Temperatura de la placa Promedio

a. Cálculo del número de Nusselt

$$N_u = 0.56\left[\left(\frac{D.\rho^2.\beta.g.\Delta T}{u^2}\right)\left(\frac{u}{CP_{ac}.k_{ac}}\right)\right] \qquad (3.18)$$

Donde:

Densidad del aceite [ρ] =875 kg/m^3

Viscosidad dinámica [μ] =1,936 N/m^2

Calor específico [cpac] =2070J/KgºK

Conductividad térmica [kac] =0.128 J/s.m.k

Número de Reynolds [Re] = 74.57

b. Calculo del factor de eficiencia de calor

$$n = \frac{1/UL}{w\left[\frac{1}{UL[D+(W-D)n_a]}+\frac{1}{\pi.D.H_{fi}}\right]} \qquad (3.19)$$

Donde:

UL= perdidas térmicas
H_{fi} = Coeficiente de transferencia de calor

c. Radiación Absorbida

$$S = E_{Tm} \times \tau \times \alpha \qquad (3.20)$$

Donde:

E_{Tm} = radiación solar directa en un plano inclinado (W/m^2)
α = Coeficiente de absorción es 0.90
τ = Coeficiente de transmisión es 0.88

3.3.2. Evaluación y selección del fluido de transporte de calor y aislante térmico que conserve y resiste el flujo de calor para obtener mayor temperatura dentro de la cámara de secado

3.3.2.1. Calculo del volumen de fluido transportador de calor.

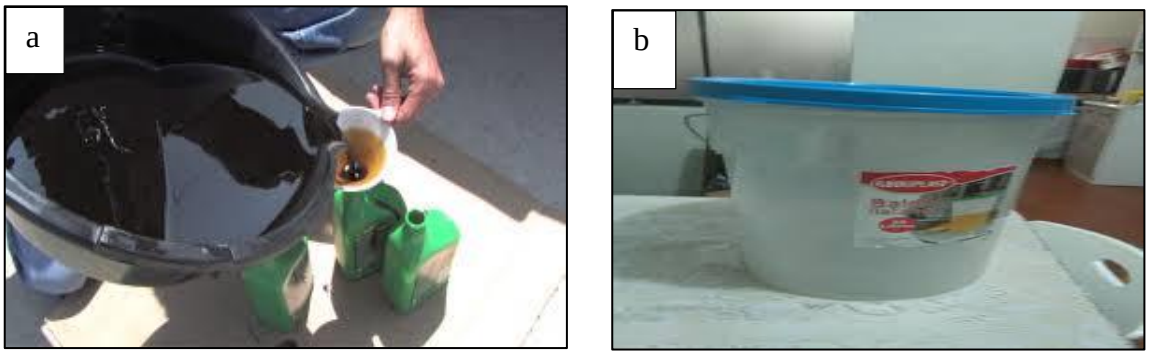
Para calcular el volumen del fluido se tomó en cuenta las dimensiones del área interior del tubo receptor y su longitud total, incluyendo la longitud lineal del radiador, de esta manera se contó con 12 litros, calculado mediante la siguiente ecuación matemática:

$$V_f = A_{ti} * L \qquad (3.23)$$

Donde:

V_f=Volumen del fluido transportador de calor.
A_{ti}=Área del tubo receptor
L=Longitud lineal del tubo receptor

El aceite residual se adquirió en los lubricentros y para la salmuera se utilizó la proporción de cada 20 litros de agua se disuelve 2 kg de sal.



Nota: Aceite residual de motores (a), salmuera (b).

Figura 35. Fluidos de transporte de calor

3.3.2.2. Calculo del volumen del aislante térmico.

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

$$Vat = Ap * Es * 5 \qquad (3.24)$$

Donde:

V_{at}=Volumen de aislante térmico
A_p=Área de la pared
E_s=Espesor requerido

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



Nota: Aserrín de madera (a), cascarilla de arroz (b).

Figura 36. Aislante térmico

3.3.2.3. Realización de las pruebas correspondientes.

Después de la construcción del prototipo se realizó las pruebas correspondientes en diferente tiempo: la primera prueba denominada como testigo, no contenía ningún tipo de aislante en las paredes, del mismo modo ningún tipo de fluido en el sistema de tubería, lo cual fue evaluado los días 8,9 y 10 de septiembre. Para realizar la segunda prueba se tuvo que desarmar el prototipo e insertar los componentes correspondientes, lo cual estuvo conformado por aceite residual de motores como fluido y aserrín de madera como aíslate se realizó los días 15, 16 y 17 del mes de septiembre; para la tercera prueba se tuvo que desarmar las conexiones de tuberías, seguidamente lavarlos y de esta manera cambiar el fluido, esta prueba se realizó los días 25, 26 y 27 del mismo mes, lo cual estuvo conformado por salmuera como fluido y aserrín de madera como aislante, cabe destacar que las pruebas se realizaron en los días óptimos, donde la radiación excedía las 7 horas. Para realizar la cuarta prueba se tuvo que desarmar todo el prototipo para cambiar el fluido y el aislante, esta prueba estuvo compuesta por aceite residual como fluido y cascarilla de arroz como aislante, y se realizaron en los días 3, 4 y 5 del mes de octubre.

Finalmente, para la prueba cinco se procedió a desarmar el sistema de tuberías cambiando el fluido, esta prueba fue realizada los días 9, 10 y 14 del mes de octubre, lo cual estuvo conformado por salmuera como fluido y cascarilla de arroz como aislante.

Tabla 5. Distribución de las pruebas

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

Donde:

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

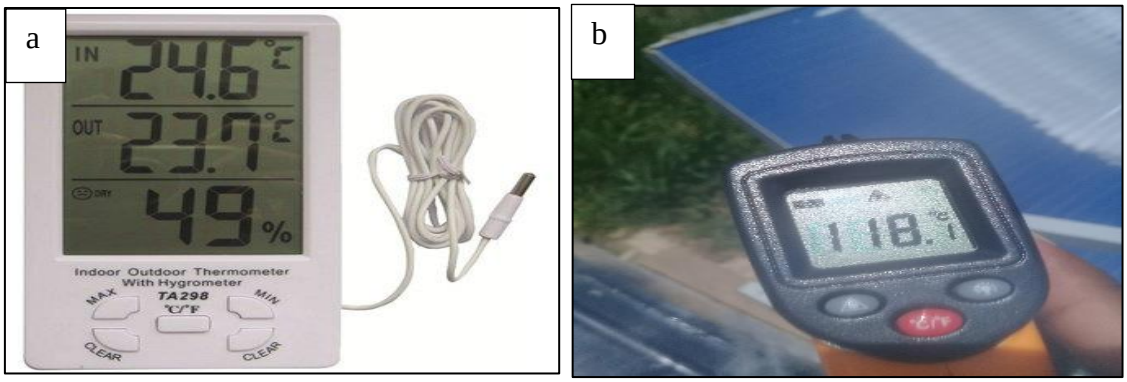
3.3.2.4. Evaluación y selección la prueba eficiente.

Se evaluó el comportamiento de cada prueba a través del sistema Arduino y equipos correspondientes. El sistema Arduino arrojaba datos de temperatura y humedad relativa durante el día y la noche del interior y exterior de la cámara, con el mismo sistema se abría y cerraba las ventilas de manera automática en horas específicos del día para expulsar el aire cargado de humedad.

Durante los días de prueba también se tomó datos de temperatura del tubo absorbedor en el concentrador plano y cilíndrico parabólico con Termómetro Digital de Láser Infrarrojo, Pantalla LCD de marca KKMOON, también se usó un termómetro ambiental de panel GRALF TGF-298.

Para la selección de la prueba eficiente se tuvo en cuenta la temperatura máxima que se alcanzada dentro de la cámara durante el día, así como también la temperatura mínima que se alcanzaba durante la noche, siendo un factor

importante a tener en cuenta la potencia del fluido transportador de calor y la resistencia al flujo de calor del aislante.



Nota: Termómetro ambiental de panel GRALF TGF-298 (a), Termómetro Digital de Láser Infrarrojo.

Figura 37. Equipos de medición

3.3.2.5. Calculo de la potencia de los fluidos de transporte de calor y resistencia térmica de los aislantes térmicos.

3.3.2.5.1. Calculo de la potencia de los fluidos de transporte de calor.

Se calculó mediante la siguiente formula planteado por (Paredes C. , 2012) .

$$q = \frac{T - T_{\infty}}{\left(\frac{\ln\frac{r_2}{r_1}}{2*\pi*Kf.aluminio}\right)+\left(\frac{1}{h*2*\pi*l*r2*180/360}\right)} \qquad (3.26)$$

Donde:

T= Temperatura media en el tubo
T_{∞}= Temperatura ambiente
r_2 = Radio exterior tubo de aluminio
r_1 = Radio interior del tubo de aluminio
l= Longitud del tubo

3.3.2.5.2. Calculo de la resistencia térmica de los aislantes térmicos.

Se calculó la resistencia térmica lo cual representa la capacidad del material para oponerse al flujo del calor expresada en metros cuadrado por grados centígrados sobre vatios ($m^2 * °C/W$). Se calculó mediante la siguiente expresión matemática planteado por (Palomino, 2017).

$$R = \frac{e}{\lambda} \qquad (3.27)$$

Donde:

e= el espesor de la capa (m)

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

a. Conductividad térmica

La conductividad térmica se calculó mediante la expresión que plantea (Ostachuk, Di Paolo, & Orlando, 2000).

$$k = \frac{R * L_f * h}{A * \Delta T} \qquad (3.28)$$

Donde:

R= m/ Δt (masa de hielo/tiempo que tarda en fundirse el hielo)
L_f= calor de fusión
h= Ancho del material
A= área efectiva a través de la cual se da la transferencia de calor.
ΔT = Diferencia de temperatura a ambos lados del material.
Cuanto mayor sea su conductividad térmica, será mejor conductor del calor. Cuanto menor sea, el material será más aislante térmico.

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

3.3.3.1. Selección de especie de la madera de baja densidad.

Se eligió la especie *Guazuma crinita,* Mart. (Bolaina blanca) por la accesibilidad, lo cual fue extraído de una parcela del Instituto de Investigación de la Amazonia Peruana-IIAP.



Nota: Extracción de la madera (a), canteo de la madera (b), tableo de la madera (c).

Figura 38. Extracción y procesamiento de la especie seleccionada Guazuma crinita

3.3.3.2. Volumen de madera *Guazuma crinita,* Mart. (Bolaina blanca) apilado.

Se hizo una pila con 63 tablas de 0.09 m de ancho, 1.50 m largo y 0.02 m de espesor y 54 tablas de 0.13 m de ancho, 1.50 m de largo y 0.02 m de espesor, haciendo un volumen de 0.3 m^3 de madera. Se utilizó 16 separadores de 0.03*0.03*1m.



Nota: Etapa inicial de apilada (a), colocación de separadores (b), pila de madera terminada (c).

Figura 39. Apilado de tablillas

3.3.3.3. Secado de madera de baja densidad

Se procedió a secar la madera con una humedad inicial promedio de 45.8%, durante los días 21, 22, 25, 27,28 del mes de octubre y los días 2, 5, 6, 13 y 17 del mes de noviembre, haciendo un total de 11 días. Se monitoreo la temperatura y humedad relativa del aire dentro de la cámara, se insertaba calor dentro de la cámara mediante la recirculación del fluido con la ayuda de electrobomba, dando inicio a su funcionamiento a las 8 am y culminado a las 5 pm, también en el mismo horario funcionaban las ventiladoras. El sistema Arduino funcionaba todo el día y toda la noche registrando los datos en una memoria micro SD. Para el control del aire cargado de humedad dentro de la cámara se abría las ventilas de manera automática a las 8 am, 1 pm y 4 pm por un tiempo de 30 minutos.

Al finalizar el día se habría la cámara de secado para controlar la reducción de humedad de la madera en tres testigos a, b y c ubicadas en la parte media y superior de la pila, tomando lectura con un medidor de humedad por contacto de marca MERLIN MMC220.



Nota: Higrómetro de contacto (a), medición de humedad día 1 (b), control de humedad día 10 (c).

Figura 40. Secado de madera

3.4. Técnicas e instrumentos para recolección de datos

3.4.1. Técnica

Se usó la técnica “Observación directa” donde se recolecto información de un prototipo construido, monitoreándolo durante las pruebas y secado de la madera.

3.4.2. Instrumentos

- 1 Ficha de registro de datos. - Se recolecto información de temperatura ambiente, temperatura en concentrador térmico cilíndrico parabólico y plano, del mismo modo la humedad de la madera reducida por día.
- 2 sensores DTH11 de temperatura y humedad relativa. – se tomó lectura de la temperatura y humedad relativa en el interior de la cámara de secado, del mismo modo se usó cuatro servomotores para abrir y cerrar las ventilas, lo cual fue controlado con un sistema Arduino almacenando la información en una memoria SD.
- 1 Termómetro infrarrojo. - se tomó datos de temperatura en la tubería del concentrador térmico cilíndrico parabólico y plano.
- 1 Termohigrometro digital. - ayudo a monitorear la temperatura ambiente durante los días de pruebas y secado.
- 1 Higrómetro de contacto. - se monitoreo la humedad reducida por día de la madera *Guazuma crinita,* Mart. (Bolaina blanca).

3.5. Procesamiento para recolección de datos

Los datos recolectados fueron analizados de manera numérica y descriptiva, por lo que se utilizó el software estadístico SPSS 24 (Statistical Package for the Social Sciences).

3.6. Tratamiento de datos

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

CAPITULO IV
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

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

Mediante los cálculos y el diseño se obtuvo datos de la cámara de secado, concentrador térmico cilíndrico parabólico y plano.

4.1.1. Dimensiones y características de la cámara del prototipo.

Tabla 6. Especificaciones y dimensiones de la cámara del prototipo de secador solar

Especificaciones	Dimensión
Espesor de las paredes	0.058 m
Ancho de la cámara	2m
Alto de la cámara	2m
Largo de la cámara	2m
Volumen de la cámara	8 m^3
N° de puertas	1
Cantidad de ventilas	4
Diámetro de las ventilas	0.30m
N° de ventiladores	2
Caudal de aire	2.52m/s
Numero de bombas:	1
Tipo de bomba:	Eléctrica/periférica 0.5hp
Caudal:	0.66 l/s
Longitud lineal del circuito de tubería	35.22 m
Diámetro del tubo:	0.0254m
Radio externo del tubo:	0.0127m
Radio interno del tubo:	0.009525m
Área interna del tubo:	0.00029m^2
Volumen del fluido de transporte de calor:	12 L
Tanque receptor	5 L

Mediante las dimensiones y características obtenidos del diseño de la cámara del prototipo de secador solar con concentradores térmicos, se pudo secar un volumen de 0.3m^3 de madera, mientras que (Herrera, Ruiz, Santiago, & Sarmiento, 2017) indican que su prototipo de secador solar tuvo una capacidad de 1.7m^3, por lo que se puede apreciar una diferencia considerable, aun sí ambos volúmenes de madera son aceptables para un estudio a nivel prototipo, ya que el tamaño de la carga depende de la capacidad y tipo de secador a ser empleado (Vizcarra, 1998).

4.1.2. Diseño y dimensiones del concentrador térmico cilíndrico parabólico (CCP) y concentrador térmico plano.

4.1.2.1. Características y dimensionamiento del Concentrador térmico cilíndrico parabólico

Mediante los cálculos y el diseño se obtuvo datos de dimensión del concentrador térmico cilíndrico parabólico, mostrados en la tabla 6.

Tabla 7. Especificaciones y dimensiones del Concentrador térmico cilíndrico parabólico

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

Los resultados obtenidos en tabla 6, logró cumplir las expectativas planteadas en el proyecto de investigación, en donde se tuvo un foco de 0.325m permitiendo capturar mayor la radiación solar incidencia en el material reflectante (espejo), el diámetro del tubo receptor fue de 0.0254m por lo que concordamos con (Paredes C. , 2012) quien construyo un concentrador térmico cilíndrico parabólico con características y dimensiones similares a lo planteado en el

proyecto de investigación, lo cual tiene un foco de 0.30 m, lado curvo de1.2 m y lado recto de 0.78 m.

4.1.2.2. Características y dimensiones del Concentrador térmico plano

Mediante los cálculos y el diseño se obtuvo datos de dimensión del concentrador térmico plano, mostrados en la tabla 7.

Tabla 8. Especificaciones y dimensiones del Concentrador térmico plano

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

De acuerdo a los resultados obtenidos en la tabla 7 sobre especificaciones y dimensiones del concentrador térmico plano, se consideró competitivo y eficiente debido a que tuvo una área de 3 m^2 cuyas tuberías de aluminio fueron de 0.0254m recubierta con vidrio de 2 mm, por lo que concordamos con (Pardo & Tacury, 2009), ya que en su estudio su concentrador térmico plano se conforma por placas y tubos de aluminio, con una caja de tol galvanizadas cubiertas de vidrio, haciendo un área de 1 $m^{2,}$, de esta manera logro cubrir las expectativas planteados.

4.1.3. Rendimiento del concentrador térmico cilíndrico parabólico y plano.

Mediante los cálculos y el diseño establecido se obtuvo datos del rendimiento del concentrador térmico cilíndrico parabólico y plano.

4.1.3.1. Rendimiento del concentrador térmico cilíndrico parabólico (CCP)

Tabla 9. Rendimiento del concentrador térmico cilíndrico parabólico (CCP) durante los meses de septiembre, octubre y noviembre del 2019

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

4.1.3.2. Rendimiento del concentrador térmico plano

Tabla 10. Eficiencia del concentrador térmico plano durante los meses de septiembre, octubre y noviembre del 2019

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

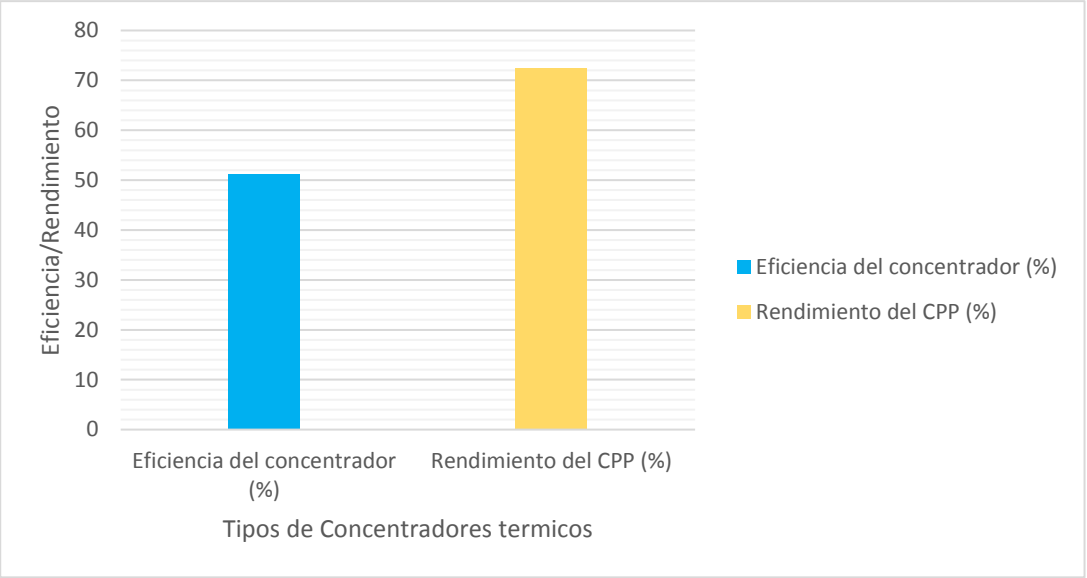


Figura 41. Rendimiento de los concentradores térmicos solares

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

4.2. Evaluación y selección del fluido de transporte de calor y aislante térmico que conserve y resiste el flujo de calor para obtener mayor temperatura dentro de la cámara de secado.

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

4.2.1. Prueba N° 01 (Testigo).

Para evaluar el comportamiento del testigo respecto a la temperatura dentro de la cámara, no se utilizó fluidos de transporte de calor ni aislantes térmicos, obteniendo el siguiente resultado.

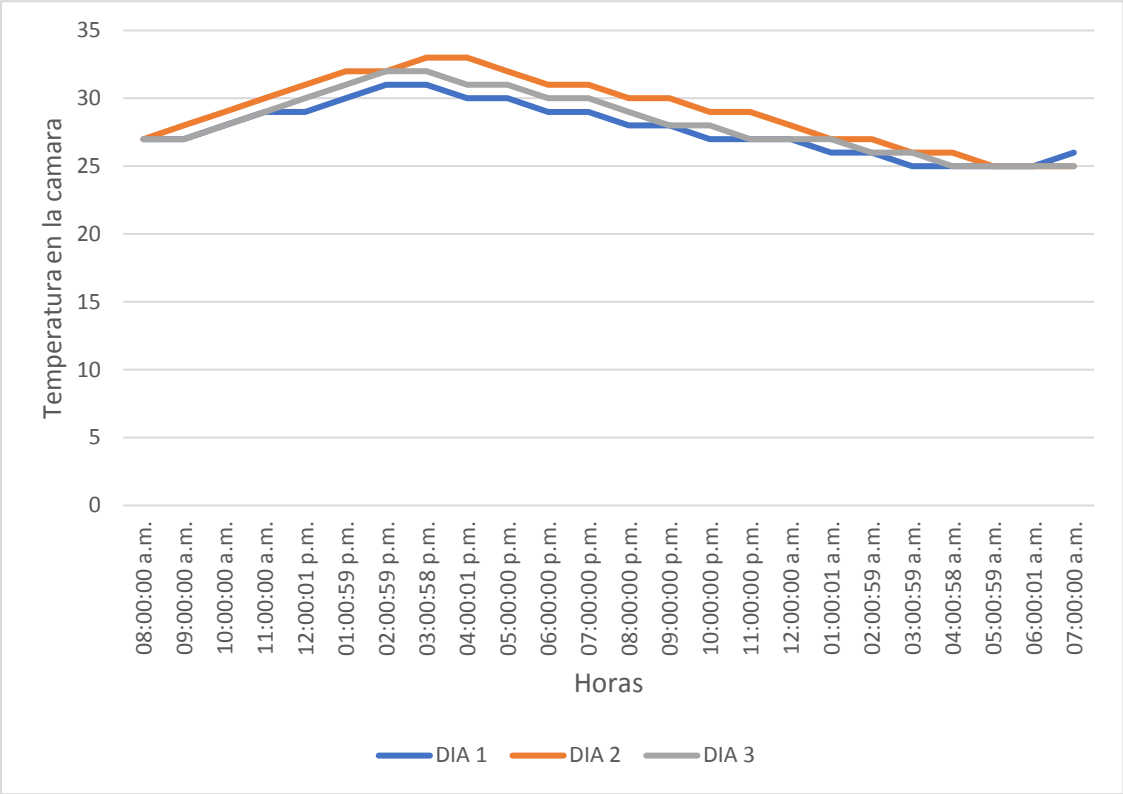


Figura 42. Comportamiento de la temperatura dentro de la cámara de secado

Durante el día 1 la temperatura dentro de la cámara alcanzo una temperatura máxima de 31°C entre las 14 y 15 horas. Durante el día 2 se alcanza una mayor temperatura con respecto al día 1, llegando a 33°C entre las 15 y 14 horas, siendo esta la mayor temperatura alcanzada dentro de la cámara durante los días de prueba del testigo. El tercer día solo se obtuvo una temperatura de 32°C durante las 15 horas; con esto podemos decir que durante el día las temperaturas máximas solo se diferencian de 1 a 2°C.

Por otro lado, durante las horas nocturnas la temperatura mínima fue de 25°C alcanzada en los 3 días de pruebas.

4.2.2. Prueba N° 02 (AM-ARM)

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

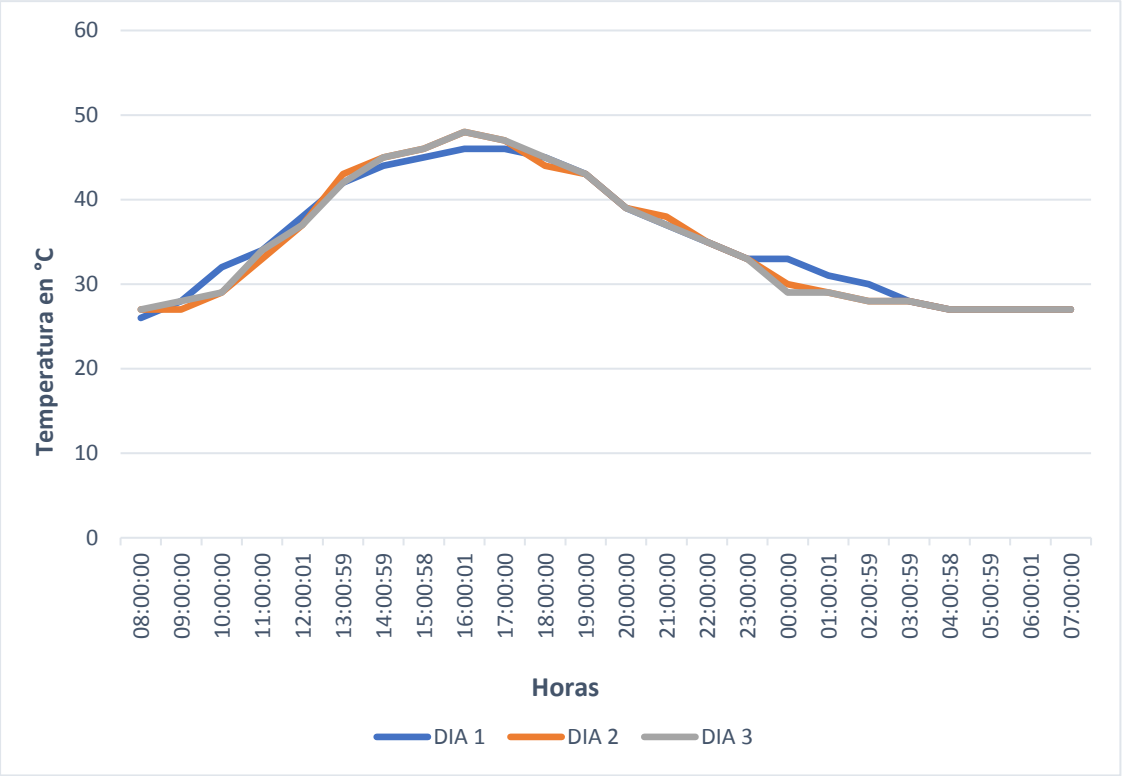


Figura 43. Comportamiento de la temperatura en el interior de la cámara

En la figura 43, se observa el comportamiento de la temperatura dentro de la cámara a lo largo de las 24 horas en cada uno de los 3 días que se realizó las pruebas; donde se tiene que las temperas máximas dentro de la cámara se registran entre las 15 y 17 horas diurnas. El primer día de prueba se obtuvo una temperatura máxima de 46°C entre las 16 y 17 horas; mientras que el segundo día de prueba se obtuvo una temperatura de 48°C a las 16 horas: y el tercer día de prueba se obtuvo una temperatura de 48°C a las 16 horas.

Por otro lado, durante las horas nocturnas, el primer día se obtuvo la menor temperatura 27°, el segundo y tercer día de pruebas se obtuvo la temperatura más baja 27°C.

4.2.3. Prueba N°03 (AM-S)

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



Figura 44. Comportamiento de la temperatura en el interior de la cámara

En la figura 44, se observa el comportamiento de la temperatura dentro de la cámara a lo largo de las 24 horas en cada uno de los 3 días que se realizó las pruebas; las temperaturas máximas dentro de la cámara se registran entre las 15 y 17 horas diurnas. El primer día de prueba se obtuvo una temperatura máxima de 42°C a las 15 horas; mientras que el segundo día de prueba se obtuvo una temperatura también de 42°C entre las 15 y 17 horas: y el tercer día de prueba se obtuvo una temperatura de 42°C entre las 15 y 16 horas. Por otro lado, durante las horas nocturnas, durante los tres días de prueba se registró una temperatura más baja de 27°C.

Identificando según los valores obtenidos en esta prueba, tiene valores menores que los de la prueba N°1 durante el día, y durante la noche alcanza los mismos valores que los de dicha prueba.

4.2.4. Prueba N°04 (CA-ARM)

La prueba N°04 tuvo como fluido de transporte de calor al aceite residual de motor y como aislante térmico a la cascarilla de arroz, obteniendo el siguiente resultado con respecto a la temperatura:



Figura 45. Comportamiento de la temperatura en el interior de la cámara

En la figura 45, se observa que en el primer día de prueba se obtuvo una temperatura máxima de 48°C entre las 16 y 17 horas; mientras que el segundo día de prueba se obtuvo una temperatura también de 48°C también entre las 16 y 17 horas, y el tercer día de prueba se obtuvo una temperatura de 48°C, pero durante las 15 y 17 horas.

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

4.2.5. Prueba N°05 (CA-S)

La prueba N°05 tuvo como fluido de transporte de calor a la salmuera y como aislante térmico a la cascarilla de arroz, obteniendo el siguiente resultado con respecto a la temperatura:

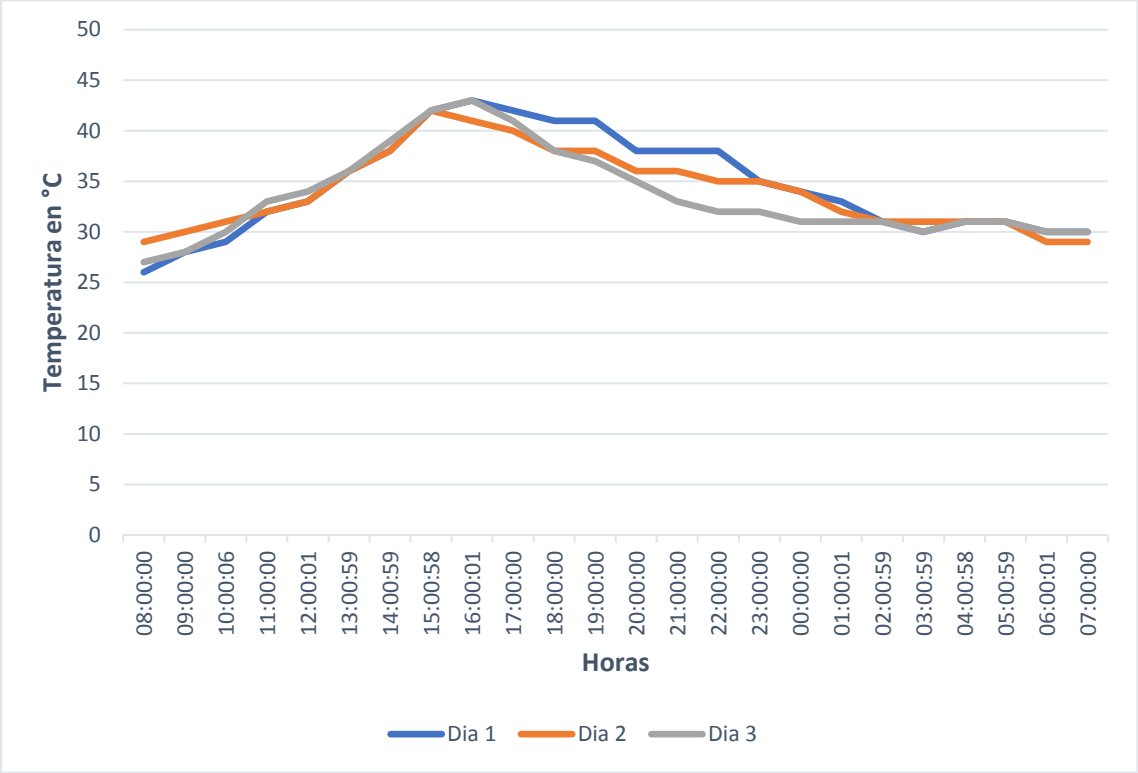


Figura 46. Comportamiento de la temperatura en el interior de la cámara

En la figura 46, se observa el comportamiento de la temperatura en el primer día de prueba una máxima de 43°C a las 16 horas; mientras que el segundo día de prueba se obtuvo una temperatura menor de 42°C a las 15 horas, y el tercer día de prueba se obtuvo una temperatura de 43°C a las 16 horas.

Por otro lado, durante las horas nocturnas, el primer día se tuvo una temperatura mínima de 31°C, en el día 2 se obtuvo una temperatura de mínima de 30°C y finalmente en el día 3 se tuvo una temperatura mínima de 31°C.

Según los valores obtenidos en las cinco pruebas, se determinó que la prueba N°4 que tuvo aceite residual de motor como fluido de transporte de calor y cascarilla de arroz como aislante térmico, es la que alcanzo mayor temperatura dentro de la cámara de secado, siendo esta de 48°C.

La potencia útil del aceite residual de motor fue 64.37 w, mientras que de la salmuera fue menor, la resistencia al flujo de calor de la cascarilla de arroz fue 1.4 m2x°C/W, mientras que del aserrín de madera 0,52 m2x°C/W, por lo que es importante mencionar que la eficiencia de cada prueba dependió de la potencia del fluido y resistencia de los aislantes térmicos.

4.2.6. Determinación estadística de la prueba eficiente

Se hizo el análisis de varianza (ANVA) de un factor, en la que se comparó las medias de temperatura dentro de la cámara de secado de cada prueba y poder determinar si existen diferencias significativas o altamente significativas entre sí.

Tabla 11. Prueba ANVA para comparar medias de temperatura para las pruebas de Testigo, ARM/AM, S/MA, ARM/CA y S/CA.

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

Nota: ** Altamente significativo

La prueba estadística ANVA (análisis de varianza) muestra que existe diferencias altamente significativas entre las medias de temperaturas de la prueba P_1 (testigo) con las P_2 (aceite residual de motor/aserrín de madera), P_3 (salmuera/aserrín de madera), P_4 (aceite residual de motor/cascarilla de arroz) y P_5 (salmuera/cascarilla de arroz).

Tabla 12. Prueba de Tukey HSD para las temperaturas en la prueba Testigo, ARM/AM, S/MA, ARM/CA y S/CA

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

La prueba de Tukey HSD evidencio que existe diferencia altamente significativa entre la prueba P_1 (testigo) y las pruebas P_2 (aceite residual de motor/aserrín de madera), P_4 (aceite residual de motor/cascarilla de arroz) y P_5 (salmuera/cascarilla de arroz), caso contario con la prueba P_3 (salmuera/aserrín de madera) no se evidencia diferencia significativa. Así mismo no presenta significancia entre la prueba P_2 (aceite residual de motor/aserrín de madera), P_3 (salmuera/aserrín de madera), P_4 (aceite residual de motor/cascarilla de arroz) y P_5 (salmuera/cascarilla de arroz). La prueba P_3 (salmuera/aserrín de madera) y la prueba P_4 (aceite residual de motor/cascarilla de arroz), muestran diferencias significativas. Finalmente, la prueba P_3 (salmuera/aserrín de madera), y la prueba P_5 (salmuera/cascarilla de arroz) no muestran diferencia significativa, del mismo modo la prueba P_4 (aceite residual de motor/cascarilla de arroz) no muestra diferencia significativa con respecto a la prueba P_5 (salmuera/cascarilla de arroz).

Para fines de proyecto de investigación y de acuerdo al análisis de las pruebas correspondientes se utilizó la P_4 (aceite residual de motor/cascarilla de arroz) para la validación de prototipo, debido a que alcanzo mayor temperatura respecto a las demás pruebas, siendo esta de 48°C.

De acuerdo a los resultados obtenidos se consideró que el fluido de transporte de calor y aislante térmico utilizado son los adecuados para nuestro proyecto de investigación, por lo existe relación con el estudio planteado por Herrera, Ruiz, Santiago, & Sarmiento (2017), quienes manifiestan haber obtenido una temperatura máxima de 40.6°C dentro de la su cámara de secado con un secador solar de tipo invernadero, por lo tanto, el proyecto de investigación se considera competitivo y eficiente respecto a este estudio. Del mismo modo, se comparó con el estudio realizado por (Muñoz, 2015) donde evaluó la respuesta al secado de *(Swietenia macrophylla King)* caoba en el horno solar de la Unidad de Forestales de Zamorano, donde alcanzo una temperatura máxima de 49°C, por tal motivo existe una relación estricta con el proyecto de investigación, y finalmente el proyecto de investigación muestra ventaja significativa respecto a la temperatura obtenida, con el estudio realizado por (Martínez & Pinillos , 1997), quien logro una temperatura promedio de 39.8° C.

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

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

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

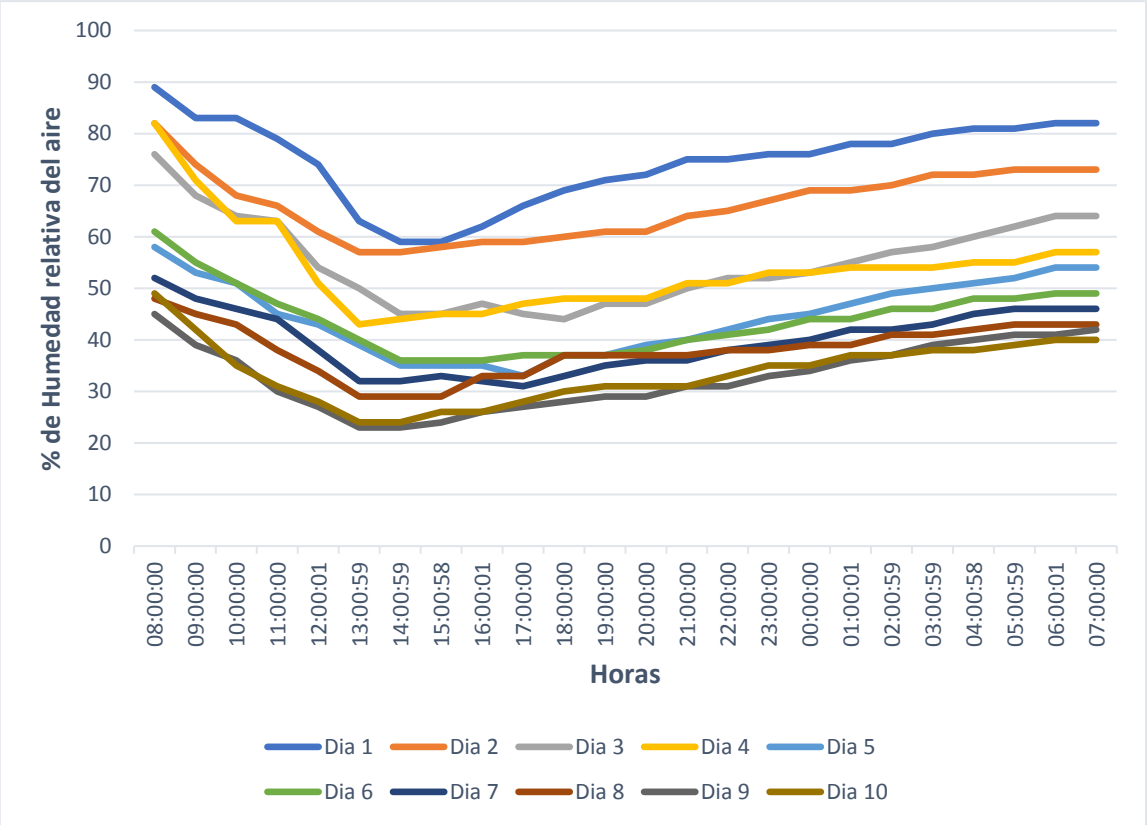


Figura 47. Comportamiento de la humedad relativa del aire dentro de la cámara

En la figura 47, se observa el comportamiento de la Humedad relativa del aire por cada uno de los 10 días que duro el secado a lo largo de las 24 horas. Se muestra que a las 7 de la mañana de cada día se tiene el mayor contenido de Humedad relativa, y entre las 13 y 16 horas los menores. El día 1,2 y 3, se tiene una disminución progresiva de la humedad relativa de 89% a 78% a las 8 de la mañana, en el día 4 mostro un desbalance de la humedad relativa, lo cual ascendió a 82% a la misma hora, mientras que en día 5 a las 8 de la mañana mostro una humedad relativa de 58%, el cual aumenta para el día 6 a 61%. El día 7,8 y 9 el sistema Arduino arrojo una humedad relativa de 45% a las 8 de la mañana, pero en el día 10 el valor de la humedad relativa asciende 49% a la misma hora, lo cual finaliza con un valor de 40% a las 8 de la mañana del día siguiente. Por lo tanto, se evidencio una considerable disminución de la humedad relativa desde el primer día donde se registró un valor de 89%, hasta el último día de secado, culminando con un valor de 40%.

4.3.2. Reducción del porcentaje de Humedad de la madera

Con respecto al control de la disminución del porcentaje de humedad en la madera se evidencia:

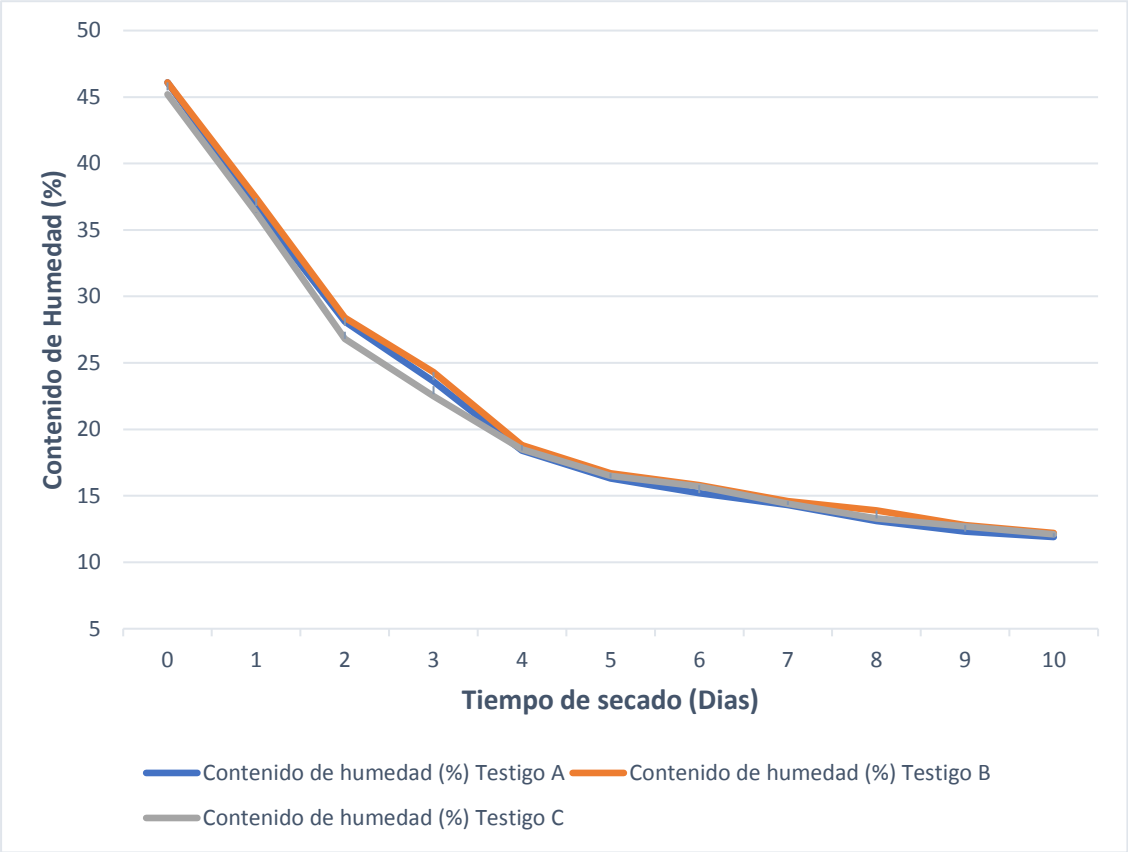


Figura 48. Reducción del contenido de humedad de la Guazuma crinita, Mart. (Bolaina blanca).

Tabla 13. Regresión lineal y ecuación de la curva de la reducción de humedad

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

Según la tabla 12, muestra que existe una relación altamente significativa entre los días de secado y el contenido de humedad de la madera, dicha relación está representada por el elevado coeficiente de correlación (r) de -0.99 y una

ecuación de tipo exponencial $y = 50.228x^{-0.593}$, así mismo por un coeficiente tabular (r_{tab}) de 0.988 a un nivel de significancia de 0.05 y 0.9995 a un nivel de significancia de 0.01.

El coeficiente de determinación (r^2) indica que el contenido de humedad (CH) de la madera depende de un 98.01% de los días de secado.

Las tres probetas seleccionadas A, B y C, tuvieron un porcentaje de humedad al ingresar a la cámara de 46.1, 41.1 y 45.2 respectivamente; el cual según lo que se muestra en la figura 48. Disminuyo de forma similar en las 3 probetas durante el día 1 y 2, al finalizar el día 2 en la probeta A de 28.1%, en la B de 28.4% y en la C de 26.8%, siendo la probeta B el que tuvo mayor reducción en su contenido de humedad. El día 3 la probeta C tuvo una mayor disminución en su porcentaje de humedad reduciéndose a 22.5%, mientras que las probetas A y B redujeron su humedad hasta 23.6 y 24.3% respectivamente.

En día 4 la probeta B fue el que obtuvo una mayor reducción en su humedad con un valor de 18.8%, seguido de la probeta A con un contenido de humedad de 18.4% y por último la probeta C con 18.5% de humedad. El día 5 la reducción del contenido de humedad fue similar en las tres probetas, teniendo un valor en A de 16.3, en B de 16.7 y en C de 16.5. En los días 6, 7 y 8 la reducción de la humedad fue aproximadamente de 1% por día, donde la probeta A alcanzo el porcentaje menor con un 13.1%, seguido de la probeta C con 13.3% y por último la B con 13.9%. El día 9 se alcanzó un contenido de humedad en la probeta A de 12.3, en B de 12.8 y en C de 12.7. El día 10 la probeta A fue la que más redujo su humedad con 11.9%, seguid de la probeta C con 12.1% y por último la probeta C con un 12.2% de contenido de humedad.

La validación del prototipo duro un tiempo de diez (10) días óptimos, donde las horas de sol fueron de entre 6.5 a 11.1, de acuerdo a los resultados obtenidos del secado de madera *Guazuma crinita,* Mart. (Bolaina blanca), el prototipo es considerado eficiente y competitivo, puesto que Herrera, Ruiz, Santiago, & Sarmiento (2017), menciona haber alcanzado un conteniido de humedad en la madera por de bajo del 12% en un tiempo de 16 dias, del mismo modo Muñoz (2015), ofirma haber secado madera *(Swietenia macrophylla King)* caobo menor al 10% en 8 dias, en un horno solar, considerandose mas

eficiciente. Tambien se puedo compara (Martinez & Pinillos , 1997), alcanzando una humedad de 10% en 11 días, considerándose coherente respecto al proyecto de investigación.

CAPITULO V
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

1. Se construyó un prototipo de secador solar con concentradores térmicos cilíndrico -parabólico y plano para el secado de madera de baja densidad, donde la cámara de secado tuvo una capacidad volumétrica de 8m3, y el rendimiento de los concentradores térmicos fueron 72.49% y 51.22 % respectivamente.
2. El aceite residual de motor como fluido de transporte de calor y la cascarilla de arroz como aislante térmico, son los componentes más eficientes, obteniendo una potencia útil del fluido de 64.37 w, y una resistencia al flujo de calor de 1.4 m2x°C/W por parte del aislante, logrando alcanzar una temperatura máxima de 48°C dentro de la cámara de secado, a una temperatura ambiente de 35°C.
3. Se validó la eficiencia del prototipo de secador solar, mediante el secando de 0.3m3 de volumen de madera de baja densidad *Guazuma crinita,* Mart. (Bolaina blanca), logrando la reducción del contenido de humedad final en un rango de 11.9 a 12.2% en 10 días óptimos, donde las horas de sol variaron de 6.5 a 11.1 durante el día.

5.2. Recomendaciones

1. Probar con un concentrador cilíndrico parabólico donde la longitud lineal sea igual a la del radiador utilizado dentro de la cámara de secado, de esta manera lograr mayor homogenización de la temperatura del fluido de transporte de calor y poder aumentar la temperatura dentro de la cámara.
2. Introducir dentro del diseño del concentrador térmico cilíndrico parabólico un tubo de vidrio de mayor diámetro al del tubo receptor a lo largo del eje focal, para lograr aislar y disminuir la perdida de la radiación solar.
3. Adicionar al prototipo un sistema de paneles solares que abastezcan de energía eléctrica para el funcionamiento del sistema de ventilación y sistema Arduino.
4. Probar el funcionamiento del prototipo con otras especies de madera de baja y alta densidad.
5. Estudiar e investigar un programa de secado con diferentes especies de madera para el prototipo de secador solar, de esta manera lograr una mejor calidad del producto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Angarita, J. (Marzo de 2000). Aceite usado será combustible en hornos.

Arbelaez, & Feria. (2003). Diseño y construcción de una cámara para el secado de la madera.

Atencia, M. (2006). Secado de la Madera .

Avalos. (Abril de 2010). Energia solar: Una propuesta para la generacion de electricidad .

Bond, B., Espinoza, o., & Philip, A. (Enero de 2011). Diseño y operación de un secador solar de madera para países tropicales.

Bonilla, F. (Junio de 2015). Horno solar para secado de madera.

Carmona, R., Espinoza, F., & Bull, C. (1998). Influencia de la densidad de la madera en la encolabilidad de Pinus Radiata,D.DON. Revista de ciencias forestales, 9.

Carnotherm. (2015). Hornos Convencional de Secado de Madera.

Carrier. (1980). Manual de aire acondicionado. Marcombo S.A,.

Castillo, J. (2001). Secado de madera aserrada de Populus euroamericana cv. Talca.

Cengel, A. (2013). Transferencia de calor y masa, un enfoque práctico. Toluca-Mexico.

Chambi, V. N. (2018). Estudio y analisis de la actividad solar, radiacion solar global y radiacion UV en la ciudad de Arequipa. .

Cooper, P. (1980). Solar Engineering of Termal Proceses. New York: Wiley.

Córdova, R. (Junio de 2005). Conceptos Basico sobre el secado de madera. Revista Forestal Karú, 3-5.

Cordova, R. (2005). Conceptos básicos sobre el secado de la madera.

Delat Volt. (1975). Radiacion Solar por departamento: Energia solar y eolica en el Perú

Doerner, A. (2009). Proyecto camara de secado para madera elaborada.

Doerner, S. A. (2009). Proyecto Camara de secado Para madera elaborada. 32-38.

Duffie, J., & Beckman, W. (1969). The Absorption of solar radiation in solar stills, Sol. Energy 12, 333-346.

Durand, P. (1984). Experimentations with low-cost solar timber drying in Ivory Coast. North American Wood Drying Symposium. Mississippi, 223-231.

Echagüe, G. (1997). Cambio Climatico, hacia un nuevo modelo energético. Colegio Ofiacial de fisico, 9-12.

Estrucplan. (Abril de 2003). Impactos Ambientales y Actividades Productivas .

Fernandez, G. (Octubre de 2015). La radiación del cuerpo negro-Hipótesis de Planck.

Fernandez, G. (13 de Diciembre de 2017). Obtenido de Transferencia de calor: www.quimicafisica.com.

Fernandez, M. (2015). Secado de la Madera.

Flores, A., Ivan , M., Ocampo, J., & Contreras, L. (2016). Calculo de dimension del tubo receptor en u concentrador cilindrico parabolico.

Fong, s., Quiñonez, E., & Tejada, C. (Junio de 2017). Caracterización físico-química de aceites usados de motores .

Gallego, J., & Campagnoli, S. (2017). Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades fisicas y mecanicas de mezclas asfálticas que contienen RAP. Escuela Colombiana de Ingeniería, 15.

Gamarra, T. (2002). Taxonomía de las fanerógamas útiles del Perú. Vol 1. Normas Legales S.A. C.

Garcia Badell, J. J. (1983). Calculo de la Energia solar . Madrid: Crida.

Gómez, E., & Ramirez, M. (2006). Analisis y estudio del contenido de humedad final de la madera. Revista Ingenieria Industrial, 24-25.

Gonzales, L., Rodriguez , J., Mendez, L., & Sandoval, S. (Octubre de 2009). Evaluación de programas de secado para madera de chalamite (Pinus pseudostrobus).

Gutierrez , J., Cadena, C., & Bula, A. (2013). Aislamiento térmico producido a partir de cascarilla de arroz aglomerada utilizando almidón producido con saccharomyces cerevisiae.

Gutierrez, J., & González, A. (2012). Determinación experimental de conductividad térmica de materiales aislantes naturales y de reciclado.

Hernandez. (2012). Diseño de un concentrador solar de Geometria Paraboidal Portatil.

Herrera , E., & Perez, C. (Noviembre de 2012). Características tecnológicas de la madera de dos especies de Costa Grande, Guerrero, México.

Herrera, O., Ruiz, F., Santiago, W., & Sarmiento, D. (2017). Secador solar: una alternativa de bajo costo para secar madera aserrada en la sierra Juárez, Oaxaca. ResearchGate, 84-99.

Hongn, M., & flores, S. (2014). Medidas de reflectancia espectral para espejos utilizados en la captación de energía solar. Asades, 5-6.

Hongn, M., Flores, S., & Saravia, L. (2011). Estudio de reflectividad de espejo para un concentrador solar Fresnel Lineal. Asades, 5-6.

Ibarra, B., & Rojas, F. (2012). Diseño y construcción de un prototipo de colector solar parabólico giratorio de mediana temperatura . 38-39.

Instituto Nacional Forestal y de Fauna. (1988). Secado y Preservado de la madera . Lima.

Inzunza, J. (2000). Radiación solar y terrestre.

Johnson. (1998). Secado de la madera -Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Antioquia.

Jordan, R., & Lui, B. (1960). The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. Sol.Energy, 1-19.

Junta de acuerdo Cartagena. (Agosto de 1989). Manual del Grupo Andino para el Secado de Madera. Medllin-Colombia: Carvajal S.A.

LIGNUM. (Abril de 2014). Scadores de Madera Optimos (Optimizando energia).

Macagnan, M. (1993). Caracterización de la radiación solar para aplicaciones fotovoltaicas en el caso de Madrid. Madrid: ETSI.

Martinez, E., & Pinillos , C. (1997). Diseño y ensayo de un secador solar para madera. Madera y Bosques, 13-28.

Medrano, S. (Febrero de 2003). Humedad en Maderas. Contenido de Humedad en Equilibrio (En línea).

Méndez Burgos, J. (2015). Optimizacion de la radiacion Solar para las diferentes tecnologias de concentracion solar sin hibridación ni almacenamiento térmico. Madrid III, 30.

Mercado, C., & Lam, E. (2015). Evaluación de un sistema de desalinización solar, tipo concentrador cilíndrico parabólico de agua de mar.

Monte, B. (2014). Métodos de Secado de Madera.

Mora, N. (2015). Secado Artificial de la madera.

Munoz, R. (2015). Evaluación de la respuesta al secado de madera de caoba (Swietenia macrophylla King) en el horno solar de la Unidad de Forestales de Zamorano. 9-11.

Nicaragua, A. (Dirección). (2015). Funcionamiento del Secador Solar Altertec [Película].

Ostachuk, Di Paolo, & Orlando. (Julio de 2000). Una manera simple de determinar la conductividad térmica de los materiales.

Page, J. (1979). The estimation of monthly mean values of daily total short-wave radiation on vertial and inclined surfaces from sunshine records for latitudes 40ºN-40ºS. Proc. Ann. Meet. Am. Section, Int. Sol. Denver, Colorado: Energy Soc.

Palomino, M. (2017). Aislantes Termicos.

Pardo, C. D., & Tacury, C. A. (13 de Julio de 2009). Diseño, construccion y monitoreo de un sistema de secado de arroz por aire forzado con fuente de energia solar utilizando aceite termico en la piladora de arroz " Don Lucho" en el canton de Macara.

Pardo, C., & Tacury, C. (2009). Diseño, construcción y monitoreo de un sistema de secado de arroz por aire forzado con fuente de energia solar utilizando aceite térmico en la piladora de arroz “don lucho” en el Cantón Macará”.

Paredes, C. (Septiembre de 2012). Diseño de captador solar cilíndrico parabólico para aplicaciones rurales en paraguay.

Paredes, M. (2009). Proyecto de camara de secado para madera elaborada. Facultad de Ciencias de la Ingeniería, 51-52.

Perú Travel. (2017). Ucayali Ubicacion: Selva-Perú Travel.

Proinna. (2013). Horno deshumidificador.

Quintana, J. (Agosto de 2014). Secador solar de Madera.

Red Madera. (Enero de 2008). Secado de la Mdera Aserrada.

Rivera, C. (2014). Variación del contenido de humedad y cambio dimensional en diferentes alturas de fuste de *Guazuma crinita,* Mart. (Bolaina blanca). En la zona Tingo María.

Rodiguez, N., & Zambrano, D. A. (2010). Los subproductos del cafe: fuente de energia renovable. Caldas: Cenicafe.

Salas, G., Moya, R., & Cordova, F. (2008). Diseño y construcción de un secador solar para madera. Costa Rica: Kurú.

Senamhi. (2018). Analisis Metereologico.

Sibaja, E. (1985). Colectores Solares. Costa Rica: Tecnológica de Costa Rica.

Steinmann, D. (1989). Control of equilibrium moisture in a solar kiln. Wood Drying Symposium. IUFRO, 213-221.

Tamani, I. (2008). “Evaluación del comportamiento al secado artificial de la madera aserrada de cumala (Virola sp.) en la Empresa Tropical Lumber SAC y propuestas de mejoramiento. Iquitos –Perú”.

Tenazoa, G., & Mallqui, J. (2017). Caracterización de productos (Diésel, Turbo) derivados del tratamiento térmico de aceites lubricantes usados en iquitos. Facultad de Ingenieria quimica, 54.

Todoproductividad. (2012). Fabricacion artesenal de un secador de madera solar.

Torres, J. (2015). Divisi´on de Ciencias Naturales y Exactas,Campus Guanajuato, Sede Noria Alta.

Torres, S. (2009). Modelacion matematica del secado convecional de madera. Madera y bosques, 14.

Twidell, J., & Weir, A. (2006). Renewable energy resources. 2nd Edition. En Renewable energy resources. 2nd Edition. (pág. 610). Abingdon, Reino Unido: Taylor and Francis Group.

UE. (2010). Informe complementario sobre el estudio de viables para el aprovechamiento del biogas en extremadura, en el marco del proyecto de recuperacion transforteriza España- Portugal alterxa, para el apoyo al cambio climático a traves del fomento de las energias.

USDA. (Agosto de 1999). Guia para la evaluacion de calidad y salud del suelo. Obtenido de Guia para la evaluacion de calidad y salud del suelo

Vizcarra, S. (1998). Guía Para el Secado de la Madera en Hornos. Proyecto de Manejo Forestal Sostenible (BOLFOR). Santa Cruz.

ANEXOS

1. Presupuesto

Tabla 14. Presupuesto del proyecto

PRESUPUESTO					
N°	Materiales	Cantidad	Valor por Unidad (S/)	Préstamo al IIAP	**Valor Total (S/)**
1	Aluminio galvanizado PV4 0, 4 mm	20	70.00		1,400.00
2	Tubos cromados de 0,5cm	4	36.00		144.00
3	Pernos y tuercas	210	0.50		105.00
3	Pernos auto roscas 3pulg x 7mm	60	0.50		105.00
4	Placa de metal	1	50.00		50.00
5	Tubo silicona	3	10		30
6	Jebe (m)	8	8		64
7	Ventilas	3	70		210.00
8	Parrilla de metal para el apilado de Madera	4	70		280.00
9	Dispensador de agua caliente	31	8		248.00
10	Tubos de aluminio de 2.7 mm	2	70		140.00
11	Madera *Guazuma crinita,* Mart. (Bolaina blanca).				-
12	Cables de luz 2.5mm(m)	40	1.8		72.00
13	Tomacorriente	2	5		10.00
14	Cascarilla de arroz (kg)	20	5		100.00
15	Aserrín de madera (Kg)	20		X	
16	Pintura negra	2	25		50.00
17	Fierro recto	2	10		20.00
18	Llave de paso	1	2		2.00
19	Papel aluminio(rollo)	5	5		25.00
20	Máquina de soldar Inversor de la CC TIG soldador 200 S.			X	-
21	Casco Soldadura Soldador Máscara de molienda Negro.			X	-
22	Máquina perforadora de Metal BOSH			X	-
23	Bomba de función de agua & 2000-12000 L/H			X	-
24	Reloj.	1	5		5.00

PRESUPUESTO

N°	Materiales	Cantidad	Valor por Unidad (S/)	Préstamo al IIAP	**Valor Total (S/)**
25	Ventiladores	2	50		100.00
26	Balanza de 20 kg	1	50		50.00
27	Termómetro bulbo húmedo			X	-
28	Transmisor temperatura TT-C31.			X	-
29	Termómetro de contacto para exterior			X	-
30	Anemómetro Extech. (VETO LTDA)			X	-
31	Calorímetro			X	-
32	Calculadora científica.			X	-
33	Computadora personal y accesorios			X	-
34	Machete			X	-
35	Serrucho			X	-
36	Corta fierro			X	-
37	Martillo			X	-
38	Desarmador			X	-
39	Wincha métrica de 5 m de longitud.			X	-
40	Aceite residual de motores (Lt)	10	5		50.00
41	Agua			X	-
42	Motocicleta			X	-
43	Combustible(galones)	20	10		200.00
44	Motocarro			X	-
45	Útiles de escritorio y papelería en general.	1	100		100.00
46	Formato de toma de datos	1	10		10.00
47	mano de obra	1	500		500.00
	Total				**S/ 3,871.00**

2. Radiación solar.

2.1. Propiedades de la radiación solar directa.

Tabla 15. Radiación solar directa durante los meses de septiembre, octubre y noviembre del 2019

Meses	Declinación solar	Angulo salida del sol	Excentricidad	Radiación extraterrestre wh/m^2.dia	Índice de claridad	fracción difusa	Irradiación difusa horizontal w/m^2	corrección radiación directa
Sep.	1,99	-89.25	0.99	0.99	67.98	0.2318	2095.01	1.34
Oct.	-9.85	-93.7	1.01	1.01	54.46	0.3846	2003.38	1.49
Nov.	-19.05	-97.37	1.02	1.02	55.72	0.3704	2071.21	1.27

2.2. Radiación solar directa horizontal y radiación directa en un plano inclinado.

Tabla 16. Radiación solar directa sobre un plano horizontal e inclinado durante los meses de septiembre, octubre y noviembre del 2019

Meses	Radiación directa horizontal (W/m^2)	Radiación directa plano inclinado (W/m^2)
Septiembre	1233.79	1653.27
Octubre	874.92	1304.5
Noviembre	977.29	1241.16

3. Energía solar incidente sobre el concentrador térmico cilíndrico parabólico (CCP)

Tabla 17. Radiación solar incidente sobre el concentrador térmico cilíndrico parabólico (CCP)

Angulo de Incidencia			irradiación efectiva (wh/m2			Distancia entre superficie y receptor	Área perdida			Área total (m^2)	Superficie reducida		Qsol (w)		
Sep	Oct	Nov	Sep.	Oct	Nov	0.45	Sep	Oct	Nov		Sep	Oct	Nov	Sep	Oct	Nov
0.95	0.76	0.93	879.746	499.084	676.943		0.44	0.38	0.43	2.718	2.278	2.338	2.288	1158.31	842.85	929.34

4. Energía térmica útil suministrada por el concentrador térmico cilíndrico (CCP).

Tabla 18. Energía térmica útil suministrada por el concentrador térmico cilíndrico (CCP)

Caudal másico de aceite proporcionado	Numero de Reynolds	Número de Prandlt	Número de Nussel	Coeficiente de película h	Qutil (W/h)
0.496 kg/s	74.57	31308.75	52.8	47.81	708.07

5. Panel fotográfico



Figura 49. ***Construcción del piso***



Figura 50. ***Fabricación de paredes techo y puerta***



Figura 51. ***Construcción del CCP***



Figura 52. ***Construcción del concentrador térmico plano***



Figura 53. ***Armado de la cámara de secado***



Figura 54. ***Instalación de los concentradores***



Figura 55. ***Instalación de la bomba y sistema de recirculación***



Figura 56 . ***Tableado de la madera Guazuma crinita***



Figura 57. ***Emparrillado de las tablillas dentro de la cámara***



Figura 58. ***Monitoreo de la humedad de la madera***



Figura 59. ***Monitoreo de temperatura***



Figura 60. ***Control de reducción de humedad de la madera***