



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA  
INDOAMÉRICA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS DE LA  
INFORMACIÓN Y LA COMUNICACIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**TEMA:**

---

**DISEÑO DE UNA LÍNEA DE SECADO DE MADERA EN LA EMPRESA  
MADERAS PACHACAMA**

---

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Industrial

**Autor(a)**

Pachacama Almagro Alfredo Iván

**Tutor(a)**

Ing. Blanca Liliana Topón Visarrea MSc.

QUITO – ECUADOR

2022

**AUTORIZACIÓN POR PARTE DEL AUTOR PARA LA CONSULTA,  
REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL, Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA  
DEL TRABAJO DE TÍTULACIÓN**

Yo, Alfredo Iván Pachacama Almagro, declaro ser autor del Trabajo de Titulación con el nombre “DISEÑO DE UNA LINEA DE SECADO DE MADERA EN LA EMPRESA MADERAS PACHACAMA”, como requisito para optar al grado de INGENIERO INDUSTRIAL y autorizo al Sistema de Bibliotecas de la Universidad Tecnológica Indoamérica, para que con fines netamente académicos divulgue esta obra a través del Repositorio Digital Institucional (RDI-UTI).

Los usuarios del RDI-UTI podrán consultar el contenido de este trabajo en las redes de información del país y del exterior, con las cuales la Universidad tenga convenios. La Universidad Tecnológica Indoamérica no se hace responsable por el plagio o copia del contenido parcial o total de este trabajo.

Del mismo modo, acepto que los Derechos de Autor, Morales y Patrimoniales, sobre esta obra, serán compartidos entre mi persona y la Universidad Tecnológica Indoamérica, y que no tramitaré la publicación de esta obra en ningún otro medio, sin autorización expresa de la misma. En caso de que exista el potencial de generación de beneficios económicos o patentes, producto de este trabajo, acepto que se deberán firmar convenios específicos adicionales, donde se acuerden los términos de adjudicación de dichos beneficios.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Quito, al mes de marzo de 2022, firmo conforme:

Autor: Alfredo Iván Pachacama Almagro



Firma: .....

Número de Cédula: 1720536869

Dirección: Pichincha, Quito, Amaguaña, Miranda

Correo Electrónico: ivan\_alf1191@hotmail.com

Teléfono: 0998874948

## APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación “DISEÑO DE UNA LINEA DE SECADO DE MADERA EN LA EMPRESA MADERAS PACHACAMA” presentado por Alfredo Iván Pachacama Almagro, para optar por el Título de Ingeniero Industrial,

### CERTIFICO

Que dicho trabajo de investigación ha sido revisado en todas sus partes y considero que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del Tribunal Examinador que se designe.

Quito, marzo de 2022


.....  
Ing. Blanca Liliana Topón Visarrea MSc.

C.I: 1721114187

## DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Quien suscribe, declaro que los contenidos y los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación, como requerimiento previo para la obtención del Título de Ingeniero Industrial, son absolutamente originales, auténticos y personales y de exclusiva responsabilidad legal y académica del autor

Quito, marzo de 2022



.....  
Alfredo Iván Pachacama Almagro  
C.I: 1720536869

## APROBACIÓN TRIBUNAL

El trabajo de Titulación, ha sido revisado, aprobado y autorizada su impresión y empastado, sobre el Tema: DISEÑO DE UNA LINEA DE SECADO DE MADERA EN LA EMPRESA MADERAS PACHACAMA, previo a la obtención del Título de Ingeniero Industrial, reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la sustentación del trabajo de titulación.

Quito, marzo de 2022

.....

Ing. Espejo Viñán Hernán Fabricio MSc.  
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

.....

Ing. Villacis Guerrero Jacqueline del Pilar MSc.  
VOCAL

.....

Ing. Remache Vinueza Byron Paúl MSc.  
VOCAL

## DEDICATORIA

A mis amados padres Sr. Iván y Sra. Fabiola que con su dedicación y cariño han sido los pilares fundamentales y mi principal ejemplo para salir adelante.

A mis queridos hermanos Evelyn y Estalin que con su apoyo y confianza me han motivado a cumplir mis metas.

A mi querida novia Silvana que con su apoyo incondicional me brinda inspiración y alegría para cumplir con mis objetivos.

## AGRADECIMIENTO

A Dios, por bendecirme con una linda familia y darme fortaleza para seguir adelante en todo momento.

A mis profesores, que son personas ejemplos de superación y que durante estos años han sido las principales gestoras de mi formación académica.

A mi querida familia que con su cariño y comprensión me han dado mucha fortaleza en mis momentos difíciles.

## INDICE DE CONTENIDOS

AUTORIZACIÓN .....	i
DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD .....	iii
APROBACIÓN TRIBUNAL .....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTO .....	vi
INDICE DE CONTENIDOS.....	vii
RESUMEN EJECUTIVO.....	xv
ABSTRACT .....	xvi

CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
Contenido de Húmedad .....	5
Antecedentes:.....	7
Justificación.....	8
Objetivo General: .....	10
Objetivos Específicos: .....	10
CAPÍTULO II.....	11
INGENIERÍA DEL PROYECTO .....	11
Diagnóstico de la situación actual de la empresa. ....	11
Descripción del proceso de fabricación de tablas de eucalipto: .....	11
Análisis de la distribución en planta actual .....	12
Diagnóstico del proceso de producción de tablas de eucalipto. ....	13
Obtención de materia prima – Tala. ....	14
Obtención de materia prima - Poda .....	15
Transporte.....	15
Aserrado y dimensionamiento de madera. ....	15
Secado natural de madera. ....	17
Descripción del proceso de secado natural de madera. ....	18
Análisis del proceso de secado de madera.....	23
Análisis Tiempo Vs CH.....	25
Área de estudio .....	27
Modelo Operativo.....	27
Descripción de Modelo Operativo.....	29
Análisis de situación Actual .....	29
Identificación de los Parámetros.....	29
Diseño de Secado al Horno .....	30
Estructura del proceso automatizado.....	31
Análisis de resultados .....	32
CAPITULO 3 .....	33
PROPUESTA Y RESULTADOS ESPERADOS.....	33

Desarrollo de la Propuesta.....	33
Análisis del proceso.....	33
Cálculo de los parámetros fundamentales del secador .....	33
Datos de la madera: .....	33
Madera Eucalipto.....	34
Características del Eucalipto Globulus.....	35
Densidad Básica .....	35
Contracción.....	35
Temperatura inicial del aire .....	36
Temperatura Final del aire.....	37
Humedad Relativa inicial y final. ....	38
Cálculo de contenido de humedad inicial y final (CH) .....	38
Entalpía inicial.....	39
Calor específico a presión constante .....	40
Humedad específica del aire.....	41
Presión parcial del aire seco .....	41
Presión de saturación .....	42
Vapor Saturado .....	42
Presión .....	42
Cálculo de humedad específica del aire .....	43
Cálculo de entalpía inicial .....	43
Entalpía final.....	44
Humedad específica del aire con temperatura final: .....	45
Presión parcial del aire seco para temperatura final: .....	45
Cálculo humedad específica del aire con temperatura final .....	45
Cálculo de entalpía final.....	46
Datos del aire:.....	46
Humedad total a extraer por m <sup>3</sup> de madera .....	47
Consumo Especifico de Calor .....	47
Calor total necesario para cada m <sup>3</sup> de madera (Q). ....	48
Tamaño y capacidad del secador solar .....	48
Volumen de la cámara .....	49

Cálculo de la energía útil del secador.....	51
Condiciones de Operación.....	51
Características el secador solar.....	51
Parámetros de la cinemática solar .....	52
Angulo horario de salida del sol.....	53
Determinación de la radiación solar extraterrestre sobre una superficie normal al sol ( $H_o'$ ).....	53
Cálculo de la radiación total diaria por unidad de área de una superficie horizontal ( $H'$ ) .....	54
Cálculo de radiación difusa diaria que cae sobre una superficie horizontal ( $H_d'$ ) .....	54
Determinación de la radiación solar total horaria por unidad de área que cae sobre una superficie horizontal.....	55
Determinación de la radiación difusa horaria por unidad de área que cae sobre una superficie horizontal ( $H_d$ ).....	57
Determinación del valor del ángulo de incidencia horario de la radiación solar directa sobre el calentador solar ( $\theta_t$ ).....	58
Determinación del ángulo Cenital .....	59
Cálculo de la relación de la radiación solar directa sobre una superficie inclinada y la radiación solar directa sobre una superficie horizontal ( $R_b$ ).....	60
Determinación de los valores de la radiación solar total horaria que cae sobre la superficie del secador solar ( $H_t$ ).....	62
Determinación del valor efectivo horario del producto Transmisividad – Absorbencia efectiva del calentador solar ( $\tau\alpha_e$ ).....	63
Energía absorbida .....	66
Cálculo de la energía absorbida por el secador solar en la unidad de área ( $S$ ), y en toda su superficie. ....	66
Pérdidas de energía específicas .....	67
Determinación del coeficiente de pérdida por el fondo ( $U_b$ ).....	69
Determinación del coeficiente de pérdidas laterales ( $U_e$ ).....	69
Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección ( $h$ ).....	71
Resistencia térmica por convección .....	72
Determinación del coeficiente total de pérdidas ( $U_I$ ).....	73
Cálculo del flujo de aire.....	73

Determinación del flujo de aire que puede calentar el secador en condiciones medias diarias (m). .....	73
Determinación del factor de remoción del calor (Fr). .....	75
Parámetros globales. Energía Ganada y Eficiencia. ....	75
Determinación de la Energía Total horaria ganada por el calentador solar (Qu). .....	75
Cálculo de la Eficiencia diaria del secador solar ( $\eta$ ). .....	76
Tiempo de secado .....	76
Selección de los ventiladores para el secado de la madera.....	77
Cantidad de humedad a evaporar diariamente por metros <sup>3</sup> de madera.....	78
Cantidad específica del aire.....	79
Cantidad de aire necesario cada día por m <sup>3</sup> de madera. ....	79
Cantidad de aire total para secar 6m <sup>3</sup> de madera.....	79
Caudal total de aire diario.....	80
Control automatizado de humedad y temperatura. ....	81
Lista de Componentes para Circuito .....	84
LCD 16 x 2 .....	84
Sensor de Temperatura y Humedad DHT11 .....	85
Hoja de Datos Técnicos Sensor DHT11 .....	86
Resistencia 330 Ohm .....	86
LED RED .....	87
Arduino Uno .....	87
Relé 5 V.....	88
Ventilador Boost.....	89
Programación de Arduino.....	90
Codificación en Software Arduino .....	90
Importación de codificación a Software Proteus .....	93
Descripción de funcionamiento de Circuito para Horno de Secado de Madera. 94	
Resultados Esperados .....	96
Análisis de Costos .....	97
Costos de Construcción Horno Solar.....	97
Costos de Automatización .....	98
Costo total de construcción y automatización de horno solar .....	99

Derecho Laboral Ecuador.....	99
Análisis Costo Beneficio .....	102
Análisis de costos secado al aire.....	103
Análisis de costos secado al horno .....	104
Cronograma de Actividades .....	104
Diagrama de Gantt.....	104
CAPITULO 4 .....	105
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	105
Conclusiones:.....	105
Recomendaciones .....	107
Bibliografía.....	108

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 .....	23
Tabla 2 .....	24
Tabla 3 .....	24
Tabla 4 .....	36
Tabla 5 .....	36
Tabla 6 .....	40
Tabla 7 .....	42
Tabla 8 .....	44
Tabla 9 .....	56
Tabla 10 .....	57
Tabla 11 .....	58
Tabla 12 .....	60
Tabla 13 .....	61
Tabla 14 .....	62
Tabla 15 .....	66
Tabla 16 .....	67
Tabla 17 .....	75
Tabla 18 .....	84
Tabla 19 .....	86
Tabla 20 .....	96
Tabla 21 .....	97
Tabla 22 .....	98
Tabla 23 .....	100
Tabla 24 .....	101
Tabla 25 .....	103
Tabla 26 .....	104
Tabla 27 .....	104
Tabla 28 .....	105
Tabla 29 .....	105
Tabla 30 .....	107

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.....	2
Figura 2.....	3
Figura 3.....	12
Figura 4.....	13
Figura 5.....	14
Figura 6.....	15
Figura 7.....	16
Figura 8.....	17
Figura 9.....	18
Figura 10.....	21
Figura 11.....	25
Figura 12.....	28
Figura 13.....	29
Figura 14.....	34
Figura 15.....	49
Figura 16.....	59
Figura 17.....	60
Figura 18.....	64
Figura 19.....	69
Figura 20.....	70
Figura 21.....	83
Figura 22.....	84
Figura 23.....	85
Figura 24.....	86
Figura 25.....	87
Figura 26.....	88
Figura 27.....	89
Figura 28.....	89
Figura 29.....	90
Figura 30.....	93
Figura 31.....	100

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA INDOAMÉRICA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS DE LA**  
**INFORMACIÓN Y LA COMUNICACIÓN**  
**CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**TEMA: DISEÑO DE UNA LINEA DE SECADO DE MADERA EN LA EMPRESA MADERAS PACHACAMA**

**AUTOR:** Alfredo Iván Pachacama Almagro

**TUTOR:** Msc. Liliana Topón

**RESUMEN EJECUTIVO**

En Ecuador, las pequeñas y medianas industrias madereras dedicadas a la fabricación de tablas, utilizan una forma de secado natural de la madera, lo que provoca un tiempo muy largo que puede variar de seis meses a dos años dependiendo del contenido de humedad, el tipo de madera y el espesor. En la empresa Maderas Pachacama, objeto de este estudio, también se utiliza el proceso de secado natural, el cual requiere de un tiempo de seis meses para obtener madera seca que pueda ser trabajada, lo que ocasiona retrasos en la entrega de los lotes de producción y pérdida de tiempo afectando la economía interna. En este trabajo se propone diseñar el proceso de secado de madera artificial por medio de un horno solar, para el dimensionamiento del horno se utilizó cálculos termodinámicos para identificar la temperatura inicial de la cámara correspondiente a 15 grados y una temperatura final correspondiente a 45 grados, la humedad relativa del 71% y la densidad de la madera de  $730 \text{ kg/m}^3$ , con estos datos se dimensionó el volumen de la cámara que será de  $42\text{m}^3$ , el área del colector que es de  $14\text{m}^2$ , un ventilador de 1400 RPM y un sistema automático para monitorear las condiciones dentro de la cámara a través de un sensor de humedad y temperatura DHT22, una pantalla LCD para visualizar los datos actuales y un controlador arduino UNO. El resultado de este diseño permitirá reducir el tiempo de secado de 6 meses a 2 meses, lo que representará para la empresa en un ahorro de tiempo de 66.67% y ganancias del 304% por mes.

**DESCRIPTORES:** Industria maderera, secado natural, colector solar, horno de secado

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA INDOAMÉRICA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS DE LA**  
**INFORMACIÓN Y COMUNICACIÓN**  
**CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**THEME: DESIGN OF A WOOD DRYING LINE IN THE COMPANY  
MADERAS PACHACAMA**

**AUTHOR:** Alfredo Iván Pachacama Almagro

**TUTOR:** Ing. Blanca Liliana Topón Visarrea MSc.

**ABSTRACT**

In Ecuador, the small and medium-sized wood industries dedicated to the manufacture of boards use a form of natural drying of the wood, which causes a very long time that can vary from six months to two years depending on the moisture content, the type of wood and the thickness. In the company Maderas Pachacama, object of this study, the natural drying process is also used, which requires a time of six months to obtain dry wood that can be worked, which causes delays in the delivery of production batches. and loss of time affecting the internal economy. In this work, it is proposed to design the process of drying artificial wood by means of a solar oven, for the dimensioning of the oven, thermodynamic calculations were used to identify the initial temperature of the chamber corresponding to 15 degrees and a final temperature corresponding to 45 degrees. the relative humidity of 71% and the density of the wood of  $730 \text{ kg/m}^3$ , with these data the volume of the chamber was dimensioned, which will be  $42\text{m}^3$ , the collector area which is  $14\text{m}^2$ , a fan of 1400 RPM and a system automatic to monitor the conditions inside the chamber through a DHT22 humidity and temperature sensor, an LCD screen to visualize the current data and an arduino UNO controller. The result of this design will reduce the drying time from 6 months to 2 months, which will represent a time saving of 66.67% and profits of 304% per month for the company.

**DESCRIPTORS:** Wood industry, natural drying, solar collector, drying oven.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

El proceso de secado en forma natural, es una actividad compleja debido al tiempo que se necesita para llegar al nivel adecuado de trabajabilidad, por lo que, el secado artificial constituye la única alternativa para poder cumplir con las exigencias del mercado internacional. La tendencia creciente de los precios a nivel mundial hace cada día más sostenible y justificable realizar el secado artificial de la madera. Existen especies que son refractarias al secado y deben secarse lentamente, tal como las del Eucaliptus, por ello cada vez se vuelve indispensable para la industria maderera mejorar los procesos de secado. (Rodgers, 2020)

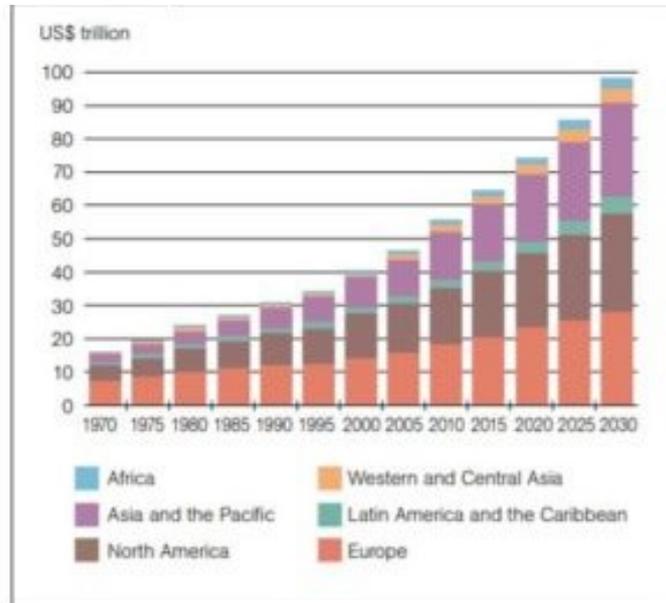
La producción a nivel mundial de madera aserrada creció un 2 por ciento en todo el mundo en 2018 y la producción tanto de madera aserrada como de tableros alcanzó un nivel récord. La producción y el comercio mundial de pulpa de madera también crecieron un 2 por ciento para alcanzar nuevos niveles en 2018 - 188 millones de toneladas y 66 millones de toneladas respectivamente. (Cesefor, 2020)

Los principales factores de una demanda creciente de la demanda de la madera tienen que ver con el aumento de población a 8,2 millones en 2030. El Producto Interno Bruto (PBI) a nivel mundial proyecta un crecimiento de US \$ 16 millones de dólares en 2005 a casi US \$ 100 mil millones para el 2030, además el rápido crecimiento de los países en desarrollo, particularmente en Asia. (Ipaulownia, 2020)

Se observa en la figura 1, el crecimiento de producción de madera.

### Figura 1

*Producto interno bruto mundial en demanda creciente*

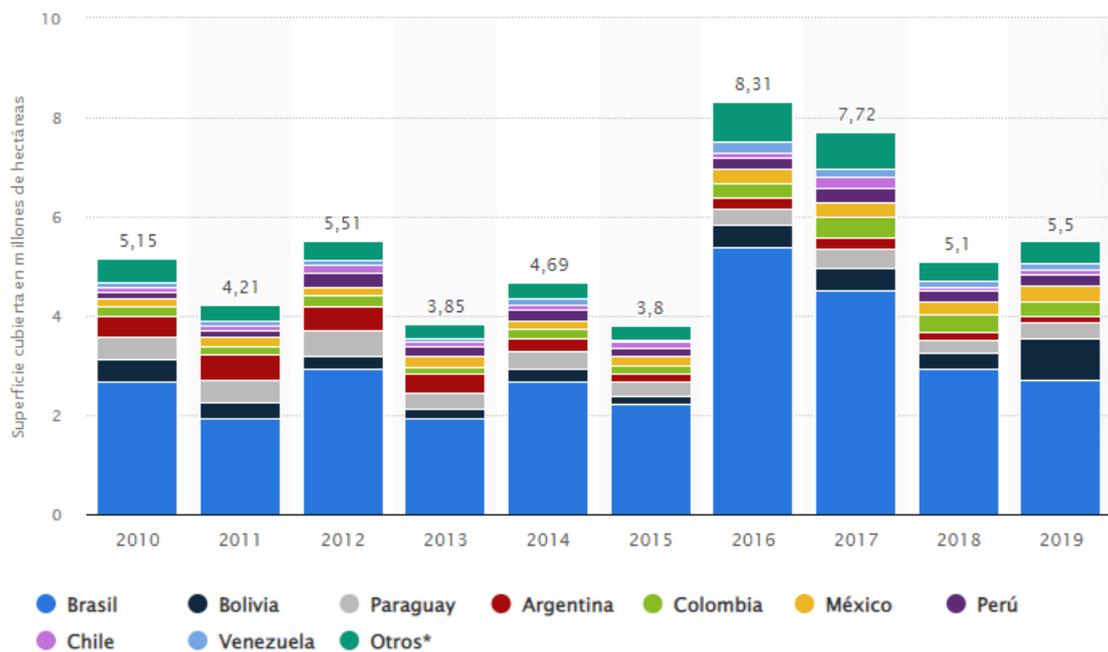


*Nota.* El gráfico presenta la demanda creciente de la demanda de la madera a nivel mundial. Adaptado de *Producto interno bruto mundial en demanda creciente*, iPaulowmia, 2020, <https://www.ipaulowmia.com/es/el-mercado-maderero/>

Brasil es el país latinoamericano que ha registrado la mayor pérdida de cobertura arbórea en la última década. Solo en 2019, se destruyeron alrededor de 2,7 millones de hectáreas cubiertas con árboles y vegetación plantada o natural en el país sudamericano. Ese mismo año, los bosques y selvas bolivianos vieron reducida su superficie en aproximadamente 850.000 hectáreas, la segunda mayor pérdida de cubierta forestal de la región. En total, se perdieron unos 53,8 millones de hectáreas de cobertura arbórea en América Latina y el Caribe entre 2010 y 2019. Este fenómeno puede deberse a causas naturales o a la producción forestal (Statista, 2021).

**Figura 2**

*Países con la mayor superficie de cubierta forestal perdida.*



*Nota.* El gráfico presenta Países con la mayor superficie de cubierta forestal perdida en América Latina y el Caribe de 2010 a 2019. Adaptado de *Países con la mayor superficie de cubierta forestal perdida*, Statista, 2021, <https://es.statista.com/estadisticas/1222951/perdida-bosques-america-latina-pais/>

En el Ecuador, la industria dedicada a la extracción de madera y actividades afines se denomina silvicultura. Las cifras del Banco Central del Ecuador - BCE, indican un crecimiento a través de los años, ubicándose en el puesto 17 de 47 industrias a nivel nacional, con un aporte de \$1.364,5 millones de dólares en 2018 1,3% del Producto Interno Bruto (PIB) y, una tasa promedio de variación interanual de 7,5% entre 2009 y 2018. En el año 2018, el 67,1% del Valor Agregado Bruto (VAB) de esta industria lo generaron las provincias de Esmeraldas, Los Ríos, Cotopaxi, Pichincha y Chimborazo (Sánchez, Vayas, Mayorga, & Freire, 2021).

En el proceso de secado de madera, se deben analizar los aspectos que afectan directamente a la producción:

- El grado de humedad de la madera por lo general entre menos humedad mejor acabado, pero podríamos decir que si la madera se encuentra dentro de un margen del 12% de humedad dará un buen acabado (Valle, Maquinaria y Maderas, 2018).
- La madera al intentar secarla al aire, es imposible mantener el control y la estabilidad del secado en ella.
- El tiempo de secado de la madera en un horno de secado industrial en comparación al secado natural la cantidad de tiempo se va a reducir dramáticamente. Sin embargo, dependiendo de la especie y espesor de la tabla se obtendrá una reducción de tiempo entre un 60% a un 75%.
- Se presenta los siguientes comportamientos, no se torcerá, no se rajará, mayor rendimiento de las herramientas y una mejor calidad de corte en la madera (Valle, Maquinaria y Maderas, 2019).
- La madera al ser secada naturalmente alcanza hasta un contenido de humedad del 20 al 30% y sin decoloración (Akribis, 2021).
- A medida que disminuye el grado de agua de impregnación aumenta sus resistencias mecánicas, pero algunas propiedades como la tenacidad o la resistencia al choque disminuyen. Esta agua de constitución se mantiene en equilibrio con la humedad ambiente (Madera, 2020).

El proceso de secado en horno mantiene la temperatura, la humedad y la circulación del aire controladas dentro y alrededor de la madera, lo que suministra un producto de mayor calidad. El secado elimina cerca del 93% de la humedad de la madera, lo que hace que la madera sea de mejor calidad para crear muebles (Woods, 2020).

Para que la madera pueda ser considerada como un material óptimo para el uso, ésta debe contener un % de humedad próximo al equilibrio higroscópico, es decir que la humedad de la madera debe estar acorde a dos factores: la humedad y temperatura ambiente. Este porcentaje técnico y adecuado, se ha establecido de manera internacional, en el 12% CH (Company, 2021).

El contenido de humedad (CH) es la cantidad de agua que existe en una pieza de madera, expresada como un porcentaje del peso que tendría en condición totalmente anhidra; se presenta mediante la ecuación 1 ecuación X:

### **Contenido de Humedad**

$$CH (\%) = \frac{\textit{Peso del agua contenida}}{\textit{Peso de la madera anhidra}} * 100\% \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

Ph = Peso de la madera húmeda o peso inicial

Po = Peso de la madera anhidra

CH = Contenido de humedad de la madera, (%)

Sólo la madera relativamente seca se puede encolar, someter a acabado, moldurar y tratar con químicos, obteniendo buenos resultados. (Company, 2021). Es por ello, que

el proceso de secado es una actividad relevante para entregar un producto final de calidad y que no presente fallas por procedimientos de secado inadecuados

Para el secado artificial se puede utilizar energías renovables, tales como calentadores o colectores solares, que disponen de una tecnología moderna. Estos sistemas tienen varios usos, por ejemplo, se utilizan para calentar el agua de uso doméstico, para absorber energía solar de manera eficiente, alcanzando temperaturas que varían entre 60 y 90 grados centígrados (Villegas, 2017).

La empresa MADERAS PACHACAMA, está dedicada a la fabricación y venta de madera aserrada, compra, venta y explotación de bosques en la mayoría de la especie Eucalipto y transporte de madera. La empresa cuenta con un depósito de madera donde se realiza la transformación de la misma ubicada en la ciudad de Quito sector Conocoto, desde el año 2000.

La competitividad y el desarrollo industrial en las empresas madereras, han exigido a la empresa MADERAS PACHACAMA modernizar sus procesos e implementar nuevas líneas de producción, como es el caso de una línea de secado artificial, para poder ofrecer variedad de productos y satisfacer las necesidades de los clientes.

Actualmente la empresa Maderas Pachacama realiza el secado de forma natural, el cual requiere de mucho tiempo debido a la humedad presente en la madera.

La empresa ha visto la necesidad de mejorar el área de producción, con el diseño de una línea de secado de madera, ya que de esta manera se aprovechará el material

almacenado, acelerando el proceso, para ofrecer nuevos productos como la fabricación de tableros y pallets.

**Antecedentes:**

Las políticas de estado y requerimientos para proceder con el aprovechamiento de madera han ido cambiando constantemente, siendo cada vez, más controladas en el tema ambiental, debido a esto, hoy en día, para realizar la tala de bosques se debe gestionar el permiso de aprovechamiento de madera, el cual es otorgado por el Ministerio del Ambiente. Esta entidad pública realiza rigurosas inspecciones en la zona, determinando si el bosque esta apto para la explotación y no generar mayor impacto ambiental. Dentro de los productos que comercializa la empresa tiene material para la construcción en madera rustica y semipreparada.

La empresa dispone actualmente de 7 trabajadores, de los cuales 5 laboran en el área de producción y 2 laboran en el área administrativa.

Los procesos que maneja la empresa son la explotación de los bosques, transporte de madera, aserrado de tablas, secado natural, canteo y cepillado de tablas. Estos procesos no han sido estandarizados, y los tiempos de procesamiento son elevados.

Existe falta de material seco para la venta y para realizar la fabricación de tableros utilizados en encofrado, pallets, fabricación de muebles y demás artículos. Por lo que es necesario realizar el diseño de una línea de secado de madera para obtener variedad de productos y ofrecer mayor stock a los clientes.

Se han implementado máquinas para realizar el acabado de madera como cepilladora, canteadora y sierra de banco, pero no se ha implementado más maquinaria para los diferentes procesos de acabado de madera, debido al bajo stock de madera seca resultado de los altos tiempos de secado natural.

### **Justificación**

El diseño de una línea de secado de madera en la empresa Maderas Pachacama es **importante** para su desarrollo, ya que permite ser una empresa competitiva, aumentar la productividad y disponer de gran variedad de productos.

Al implementar una línea de secado de madera, genera un **impacto** positivo, ya que de esta manera satisface las necesidades de muchos clientes que necesitan diferentes tipos de madera seca, mejora la calidad y bienestar dentro de la empresa. Esta propuesta tiene como finalidad aumentar la producción generando nuevos puestos de trabajo internos, creando productos que cumplan con los requerimientos exigidos en el mercado.

El diseño de una línea de secado de madera es **útil**, ya que asegura que el proceso de secado va a ser controlado. El diseño de un horno de secado permitirá cumplir con los parámetros de humidificación, buscando el crecimiento de oferta de productos en MADERAS PACHACAMA, con la finalidad de incrementar las ventas y los ingresos de dicha empresa.

Los **beneficiarios** de la presente propuesta es todo el personal de la empresa maderera y sus clientes, ya que al no existir el proceso de secado artificial los operadores desconocen de esta actividad y no se puede ofertar estos productos a los consumidores teniendo ventas bajas.

La propuesta es **factible**, ya que la empresa cuenta con materia prima disponible con la necesidad de un secado artificial además cuenta con el espacio físico para la estructura del horno, el personal de la empresa tiene conocimientos previos de secado natural lo que es importante para el pre secado y conocimientos de construcción de estructura y manejo de tecnología lo que permitirá alcanzar el objetivo principal del Diseño de un Horno Solar con control automático mejorando así los ingresos de la empresa y una mejor posición en el mercado actual.

**Objetivo General:**

Diseñar una línea de secado de madera mediante herramientas de ingeniería y automatización para reducir el tiempo de procesamiento en la fabricación de tablas en la empresa Maderas Pachacama.

**Objetivos Específicos:**

- Diagnosticar la situación actual mediante datos históricos del proceso de secado de madera para identificar el tiempo de procesamiento actual.
- Diseñar la estructura del horno de secado de madera con dimensiones ideales para su correcto desempeño, mediante cálculos termodinámicos y de transferencia de calor, para su posterior automatización.
- Diseñar una propuesta de automatización para el horno de secado de madera mediante elementos de control, sensores y actuadores para mejorar el tiempo de ciclo del proceso.

## **CAPÍTULO II**

### **INGENIERÍA DEL PROYECTO**

#### **Diagnóstico de la situación actual de la empresa.**

##### **Descripción del proceso de fabricación de tablas de eucalipto:**

El proceso de fabricación de tablas de eucalipto empieza con la obtención de la materia prima, la cual se extrae principalmente en los bosques de la zona del Valle de los Chillos, posterior a esto es transportada en forma de trozas y apilada en la máquina de aserradero para ser transformada y dimensionada en subproductos, en este caso, tablas de eucalipto. Se realizan diferentes lotes de productos con dimensiones y acabados según requerimientos de los clientes. Una vez finalizado el proceso de producción de tablas de eucalipto, se procede al secado de la madera en forma natural. Se realiza un apilamiento en forma de torres, se contabiliza el número de unidades que van a conformar las torres y se calcula el cubillaje de madera a secarse.

En resumen, la fabricación de tablas de eucalipto consta de los siguientes pasos:

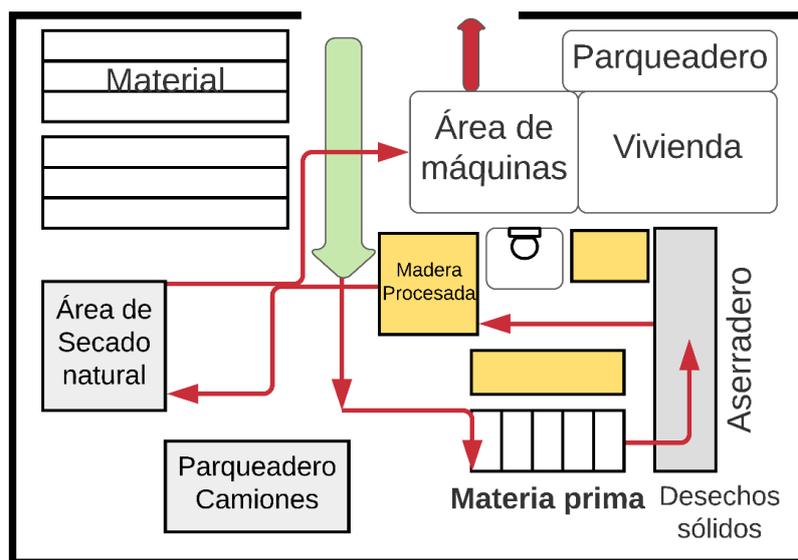
1. Obtención de materia prima en forma de trozas en plantación forestal.
2. Transporte de trozas desde las plantaciones forestales hacia área de recepción de MP en empresa Maderas Pachacama
3. Apilamiento para Secado Natural.
4. Opcional, de ser el caso se realizan acabados (cepillado, canteado, machimbrado, etc.), de acuerdo a requerimiento de clientes.

## 5. Comercialización de tablas.

En la figura 3, se muestra distribución actual de planta en la empresa Maderas Pachacama, donde se muestran los diferentes espacios destinados a cada actividad.

**Figura 3**

*Distribución de Planta Actual para Fabricación de Tablas*



### **Análisis de la distribución en planta actual**

En la actualidad la empresa cuenta con el proceso de fabricación de tablas, para realizar esta actividad, la empresa dispone de un ingreso principal, el cual es utilizado para recepción de materia prima y también para entrega de producto terminado. Actualmente es el único ingreso para todas las actividades.

El área de aserrado cuenta con la maquina principal de aserradero, en este lugar se realizan los subproductos de madera, principalmente las tablas de eucalipto, las cuales

pasan al proceso de secado natural, o al área de máquinas, donde se realizan diferentes tipos de dimensionamientos y acabados según requerimientos del cliente.

La empresa también cuenta con un área denominada como “material”, donde se almacena los productos para la venta, además dispone de un parqueadero para clientes, el área de desechos sólidos, los cuales son reusados en otra empresa para la fabricación de aglomerados.

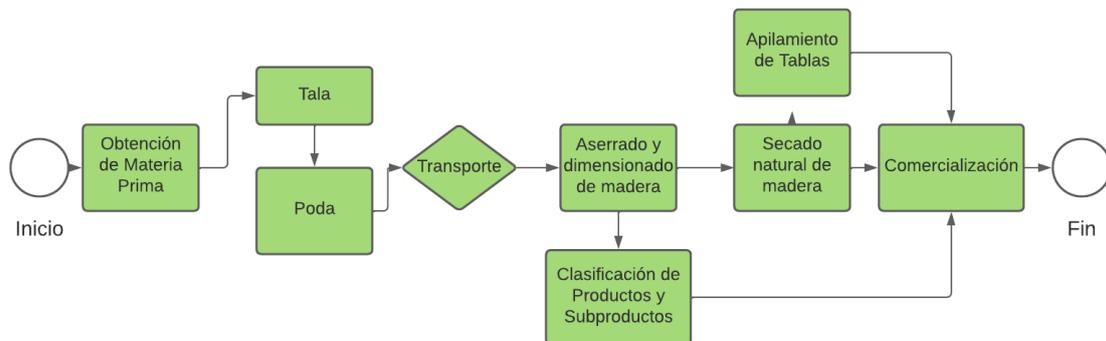
### Diagnóstico del proceso de producción de tablas de eucalipto.

#### Diagrama de flujo

El diagrama de flujo es una forma de representar gráficamente un algoritmo o un proceso de alguna naturaleza, a través de una serie de pasos estructurados y vinculados que permiten su revisión como un todo. En la figura 4 se observa el diagrama de flujo del proceso de producción de tablas de eucalipto.

**Figura 4**

*Diagrama de Flujo Fabricación de Tablas de Eucalipto*



## Obtención de materia prima – Tala.

Se refiere al proceso de explotación forestal. Previamente a este proceso se realiza los permisos y generación de licencias de aprovechamiento por parte de las entidades encargadas. El predio de la plantación no debe tener prohibición de ajamamiento o hipotecado. . Posterior a esto se ingresa la documentación en el Ministerio del Ambiente para que el ingeniero ambiental realice la inspección presencial y pueda determinar si es factible la explotación de la plantación y además calcula el cubicaje de la madera a cortarse como se puede observar en la figura 5, para luego gestionar y aprobar la licencia de aprovechamiento.

### Figura 5.

#### *Licencia de Aprovechamiento Forestal*

LICENCIA DE APROVECHAMIENTO FORESTAL	
	
CÓDIGO DE LA LICENCIA: 70099T50028 TIPO DE LICENCIA: LICENCIA TOTAL	
<p>El Ministerio de Agricultura y Ganadería confiere la presente Licencia de Aprovechamiento Forestal al señor(a): <b>CONSEJO GUBERNATIVO DE LOS HERMANOS DE LAS ESCUELAS CRISTIANAS</b> para que, en sujeción al respectivo <b>PROGRAMA DE CORTA EN PLANTACIONES FORESTALES COMERCIALES No. PAFPL14304070099</b>, aprobado por esta Oficina Técnica proceda al aprovechamiento de 573.32 metros cúbicos de madera en <b>1.04979 Hectáreas</b> en el predio ubicado en el sitio <b>DEAN ALTO</b>, parroquia <b>CONOCOTO</b>, cantón <b>QUITO</b> provincia <b>PICHINCHA</b></p>	
<b>VOLUMEN DE MADERA A SER APROVECHADO:</b>	
NOMBRE COMÚN	VOLUMEN A APROVECHARSE POR ESPECIE
EUCALIPTO ( <i>Eucalyptus globulus</i> )	573.32
<b>TOTAL:</b>	<b>573.32</b>
<p>A más de lo expuesto, el beneficiario se compromete a:</p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. Cumplir con todo lo estipulado en la codificación de la Ley Forestal y normas vinculadas con el aprovechamiento de Plantaciones Forestales con Fines Comerciales.</li><li>2. Ceñirse estrictamente al programa aprobado.</li><li>3. Someterse a las inspecciones periódicas por parte del Ministerio de Agricultura y Ganadería y / o sus delegados, con el fin de verificar el cumplimiento del programa aprobado.</li></ol> <p>La presente licencia tiene un plazo de duración de 280 días desde la fecha de su expedición y se la concede a todo riesgo del interesado, dejando a salvo derechos de terceros.</p> <p>MAG - Quito, a 2021-06-29 13:36:19</p>	

*Nota.* Licencia de Aprovechamiento Forestal. Adaptada de Ministerio de Agricultura y Ganadería 2021.

### **Obtención de materia prima - Poda**

Una vez que los árboles se han extraído de la plantación se eliminan sus ramas dejando el tronco liso y uniforme, dividen el tronco en trozos de una longitud determinada en función del producto que se quiera obtener.

### **Transporte**

Se lleva los troncos o trozas a su lugar de destino donde serán almacenados o aserrados. Se utiliza maquinaria especializada en el transporte de materia forestal.

### **Aserrado y dimensionamiento de madera.**

En esta área se da la dimensión correspondiente a las tablas por medio de una maquina llamada aserradero o sierra circular, la cual tiene un diámetro de 1.2 metros con 32 dientes de corte ayudado por un coche metálico transportador. Este equipo produce madera aserrada a partir de madera en rollo y obtiene una serie de subproductos, como pueden ser tablas, tablones, alfajías a partir del descortezado que se utiliza como leña y la generación de desechos sólidos como el aserrín.

Aquí se realiza la recepción y almacenaje de materia prima en forma de trozas para su posterior aserrado tal y como se puede observar en a la figura 7.

### **Figura 6**

*Materia Prima (trozas de eucalipto)*



Las trozas las cuales vienen de diferente diámetro, pero de una longitud constante de 2.5 metros son embarcadas en el coche del aserradero para dar la dimensión deseada.

El corte de trozas empieza retirando la corteza de un lado, luego girando la troza para retirar la corteza del otro lado, de esta manera queda un banco de 15cm de ancho. Se procede a cortar las tablas dando una dimensión de 25mm de espesor, tal y como se puede apreciar en la figura 7. Este proceso por lo general cuenta con dos operadores, el primero maneja los mandos principales de embarque, dimensionamiento, avance de corte, velocidad de corte en la sierra circular controlando el trabajo general de la maquinaria.

### **Figura 7**

*Aserrado de Tablas*



El segundo operador es quien recibe la madera procesada a la salida del aserradero, él se encarga de distribuir la madera según su dimensión como se puede observar en la figura 8.

### **Figura 8**

*Apilamiento de madera subproductos*



### **Secado natural de madera.**

El secado natural se refiere a la disminución de humedad de los productos o materiales en condiciones naturales, que estén expuestos a la radiación solar directa. En

este proceso están presentes factores como la humedad del aire y la velocidad del viento y la energía solar directa o indirecta.

Las desventajas del proceso actual de secado de madera son: Elevados tiempos de secado, (de 4 a 6 meses y a veces más para poder lograr un secado eficiente, dependiendo del tipo de madera), además se producen rajaduras y el secado no es uniforme.

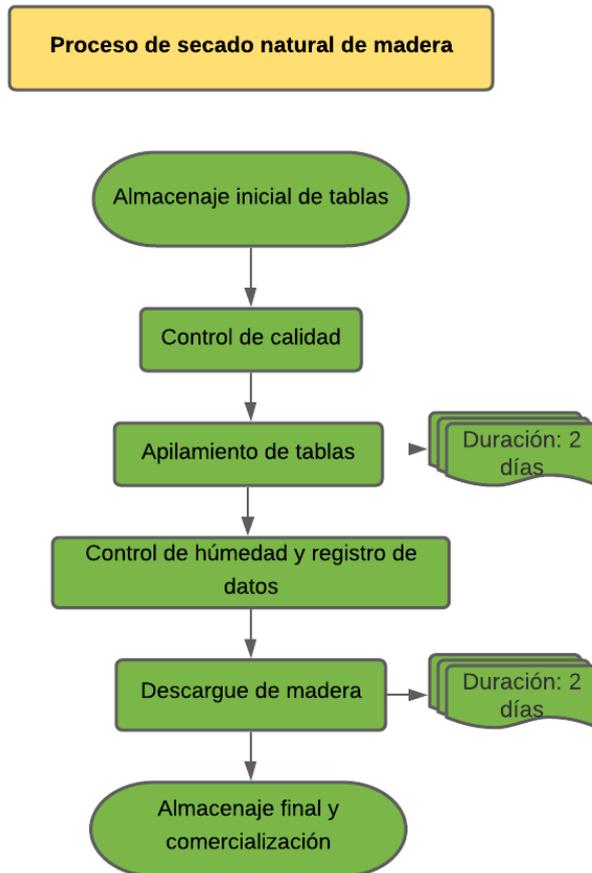
En la empresa se considera un tiempo de secado de seis meses con un lote de 500 unidades, por ende, al año se obtienen 1000 tablas procesadas en el secado natural.

#### **Descripción del proceso de secado natural de madera.**

En la figura 9, se muestra el diagrama de flujo del proceso de secado natural de madera.

#### **Figura 9**

*Diagrama de Flujo Proceso de Secado Natural de Madera*



A continuación, se explican estas etapas:

1. Almacenaje inicial de tablas

Las tablas que son destinadas al secado natural son arrinconadas en el sitio, evitando el contacto directo con el suelo, de preferencia se coloca bases de madera cuadrada que separan las tablas de la humedad que se concentra en el suelo debido a las lluvias.

2. Control de calidad

El proceso de control de calidad se lo realiza de forma visual. El cual consiste en observar cada unidad de tabla que no tengan rajaduras en las puntas o tengan imperfecciones en las superficies como sobremedidas o agujeros, además que

tengan las medidas estándar (2500cm x 15cm x 2.5cm). También se contabiliza cuantas tablas van a intervenir en el proceso.

### 3. Apilamiento de tablas

A continuación, se apilan a mano las tablas en forma de torre de edificio, esta torre ocupa un espacio de (2.5 x 2.5) metros de área cuadrada, con una altura de 3 metros o hasta 6 dependiendo de las bases que se coloquen para separar la torre del suelo y también de los separadores entre las filas de las tablas. Por lo general las bases se las hace de 0.5 metros de altura. En esta operación intervienen hasta 3 trabajadores y el tiempo de apilamiento lleva hasta 2 días laborales.

### 4. Control de humedad y registro de datos

El contenido de humedad inicial cuando la madera de eucalipto es extraída de las plantaciones varía entre el 80% y 90%, estos resultados se obtienen al instante utilizando balanzas digitales especializadas con secadores de muestras en pequeñas cantidades en gramos, como es el caso en la empresa Novopan del Ecuador. La forma de medir el contenido de humedad en la Empresa Maderas Pachacama es mediante el Cálculo de Contenido de humedad y con la ayuda de una balanza al cabo de 30 días mínimo ya que el proceso de secado es natural a diferencia de las balanzas digitales que dan resultados al instante, los resultados son registrados en tablas para mantener un control con datos históricos.

### 5. Descargue de madera

En esta actividad se desarma la torre de tablas que están expuestas al aire libre, este proceso se lo debe realizar con precaución ya que se está trabajando en altura

y se debe cuidar que las tablas no caigan fuertemente y reciban impactos ya que pueden rajarse o romperse.

#### 6. Almacenaje final y comercialización

Las tablas que alcanzaron una determinada humedad en el lapso de seis meses son almacenadas bajo techo para evitar el contacto directo con el sol y la lluvia de aquí se la procesa y se le da acabados para mueblería o se realiza la comercialización directa dependiendo las necesidades del cliente.

Para llegar a la humedad ideal se necesitaría más tiempo de secado mínimo hasta de un año con resultados de hasta 18% de CH, lo cual no es conveniente. En la empresa Maderas Pachacama las tablas que son secadas naturalmente se las comercializa o se las trabaja con la humedad que alcancen en el lapso de seis meses.

Para la toma de datos del primer mes se considera una humedad del 80%, dato obtenido como referencia en balanzas digitales en la empresa Novopan del Ecuador.

Los datos han sido adquiridos mensualmente midiendo el peso de la tabla, con una balanza mensualmente.

Según la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1160:1983 Maderas, Determinación del contenido de humedad, con el procedimiento del apartado 5 Método de secado en espuma, hacemos uso de los instrumentos de balanzas y estufas eléctricas, y con el cálculo del apartado 5.3 determinamos el contenido de humedad (INEN, 2012).

#### **Figura 10**

*Método de Secado NTE INEN 1160:1983*

## 5. METODO DE SECADO EN ESPUMA

### 5.1 Instrumental.

**5.1.1** Balanza, que permita determinar la masa con una exactitud hasta de 0,1 g.

**5.1.2** Estufa eléctrica. Provista de termo-regulador, que permita operar a una temperatura de  $103 \pm 3^\circ\text{C}$ .

**5.1.3** Desecador de laboratorio. Provisto de sustancia higroscópica adecuada.

**5.2 Procedimiento.** Pesar las muestras y colocarlas en la estufa, aplicar un calentamiento gradual hasta alcanzar los  $103 \pm 3^\circ\text{C}$ ; las muestras a esta temperatura deben permanecer por lo menos 20 horas; luego de sacarlas de la estufa, enfriarlas en el desecador y pesarlas hasta obtener la constante de masa.

**5.3 Cálculos.** El contenido de humedad se obtiene mediante la ecuación siguiente:

$$\text{CH} = \frac{\text{P} - \text{Psh}}{\text{Psh}} \times 100$$

Siendo:

CH = contenido de humedad, en porcentaje.

P = masa original de la muestra, en gramos.

Psh = masa de la muestra anhidra, en gramos.

*Nota.* Apartado 5, Maderas Determinación del Contenido de Humedad haciendo uso de la formula CH. Adaptade de NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 1160:1983. <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/1160.pdf>

La forma de determinar el contenido de humedad dentro la empresa se la realiza de la siguiente manera; al terminar el primer mes de secado se toma una tabla al azar ya que todas provienen de plantaciones en el Valle de los Chillos y la humedad es similar ya que son recién aserradas y pertenecen a un mismo lote de producción. A la muestra escogida se le aplica el cálculo de Contenido de humedad (CH) tomando en cuenta el peso inicial al comienzo del secado natural.

El peso inicial de una tabla de eucalipto es de 11.33 kg, y el peso de la madera seca en determinado tiempo es 8.4 kg datos que se reemplazaran en la ecuación 1.

Donde:

Ph = Peso de la madera húmeda o peso inicial 11.33 (kg)

Po = Peso de la madera anhidra 8.4 (kg)

CH = Contenido de humedad de la madera, (%)

$$CH = \frac{11.33 - 8.4}{8.4} * 100\%$$

$$CH = 34\%$$

Es así como se determina el Contenido de humedad en cada una de las muestras las cuales van a ser tomadas mes a mes por el lapso de un semestre, registrando en tablas de datos para mantener el debido control.

#### **Análisis del proceso de secado de madera.**

En la tabla 1, se presenta la toma de datos de 500 unidades de tablas, durante 6 meses de secado natural de tablas de eucalipto con sus dimensiones estándar 250 x 15 x 2,5 (cm), en el primer semestre del 2020, en los resultados se puede evidenciar que no llegan a la humedad ideal del 12% de CH lo cual se lo puede obtener solamente con procesos de secado artificial.

**Tabla 1**

*Registro de Secado de Madera Semestre I 2020*

# Mes	Fecha	% CH
1	2/1/2020	80
2	2/2/2020	34
3	2/3/2020	30
4	2/4/2020	25

5	2/5/2020	22
6	2/6/2020	20

Nota. Datos de Contenido de Húmedad, Semestre I del año 2020.

En la tabla 2 se presenta el registro de contenido de humedad del segundo semestre del año 2020, primer dato de contenido de humedad se considera el 80% de CH tal y cual como se lo hizo en la tabla 1, para los datos de los siguientes meses se realiza nuevamente el cálculo de contenido de humedad mediante la fórmula considerando el peso de la tabla que va disminuyendo de acuerdo al tiempo de secado al cabo de seis meses se obtiene un contenido de humedad del 19% debido a que en esta época del año hay menos presencia de lluvias.

### **Tabla 2**

*Registro de secado de madera Semestre II 2020*

# Mes	Fecha	% CH
1	3/7/2020	80
2	2/8/2020	30
3	2/9/2020	28
4	2/10/2020	24
5	2/11/2020	22
6	2/12/2020	19

Nota. Datos de Contenido de Húmedad, Semestre II del año 2020.

En la tabla 3, se realizan los registros de datos de humedad cada mes, en el primer semestre del año 2021. En el sexto mes se obtiene una CH de 20%.

### **Tabla 3**

### *Registro de secado de madera Semestre I 2021*

# Mes	Fecha	% CH
1	3/1/2021	80
2	2/2/2021	38
3	2/3/2021	35
4	2/4/2021	28
5	2/5/2021	25
6	2/6/2021	20

Nota. Datos de Contenido de Húmedad, Semestre I del año 2021.

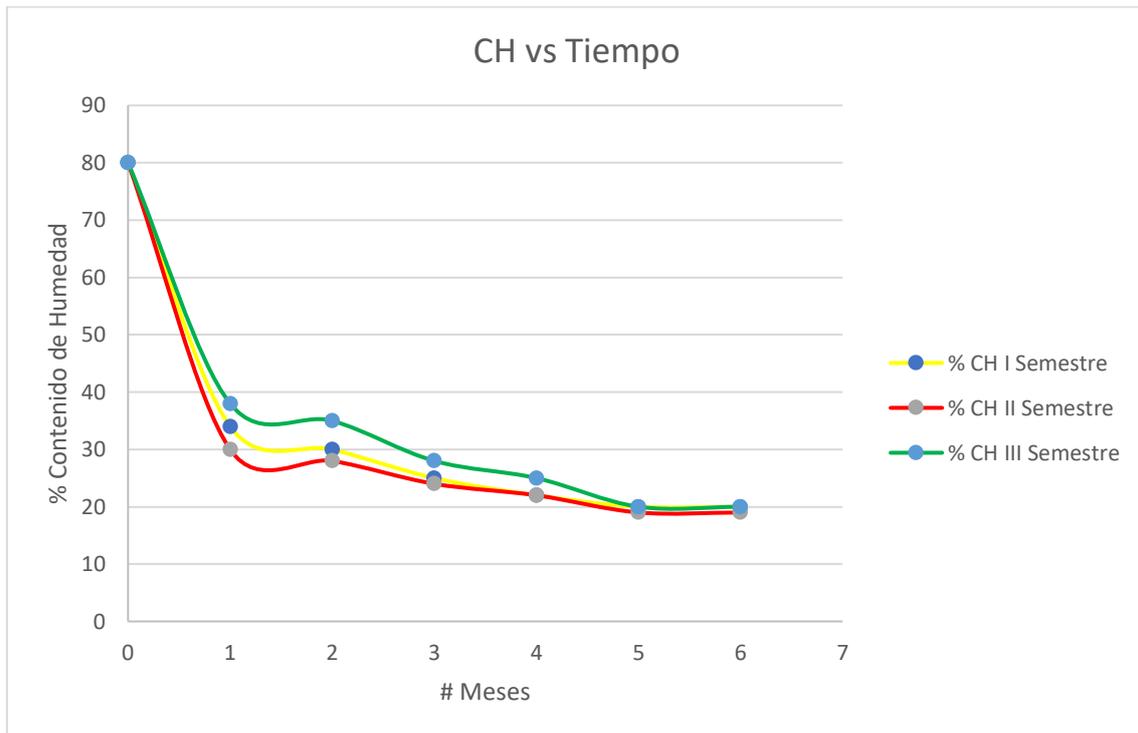
En la Empresa Maderas Pachacama se considera que la madera esta lista para trabajar en el lapso de seis meses, ya que de tener más tiempo las tablas expuestas al secado natural no se pueden cumplir con los pedidos de los clientes, el promedio de CH que alcanza el secado natural al cabo de seis meses es de 19% en las tablas de eucalipto. El contenido de humedad interno en la madera va a depender directamente de las condiciones climáticas es de tal manera que no se puede controlar esta variante y no se puede alcanzar un porcentaje óptimo de CH a diferencia de hornos artificiales de secado de madera.

#### **Análisis Tiempo Vs CH.**

A continuación, se muestra en la figura 10, el análisis de la pendiente de disminución del Contenido de humedad, de esta manera se puede identificar los diferentes semestres y hacer una comparación de los mismos.

#### **Figura 11**

*Pendiente CH vs Tiempo*



*Nota.* Gráfico de pendiente de disminución de humedad, I semestre color amarillo, II semestre color rojo, III semestre color verde.

En la figura 10, se puede apreciar la pendiente de disminución de Contenido de Humedad con respecto al eje Y. En el eje X tenemos los seis meses de secado natural. El primer semestre el cual está representado por la pendiente de color amarillo en el primer mes de secado desciende la humedad hasta el 34%, mientras que el segundo semestre que está representado por la pendiente de color rojo al primer mes de secado baja la humedad hasta el 30% y el tercer semestre el cual está representado por la pendiente de color verde al primer mes de secado baja al 38% de contenido de humedad. En conclusión, el semestre que más baja el contenido de humedad después del pre secado es el segundo debido a que coincide con los meses de junio y julio donde existe mayor corriente de viento y radiación solar debido a la época de verano, al final de las pendientes al cabo de seis meses la humedad baja hasta el 19 y 20%.

## **Área de estudio**

**Dominio:** Tecnología y sociedad

**Línea de investigación:** Gestión sostenible de productos

Diseño concurrente, integra los métodos, herramientas y procesos de manera holística para la resolución de problemas industriales.

**Campo:** Ingeniería Industrial

**Área:** Diseño, optimización de proceso de secado de madera.

**Aspectos:** Uso de energías renovables, cálculo de transferencia de calor y termodinámicos, mejora de tiempos en el proceso.

**Objeto de estudio:** Empresa Maderas Pachacama, ubicada en el Valle de los Chillos Sector Conocoto

**Periodo de análisis:** enero 2020 – junio 2021, de donde se tomó los datos de contenido de humedad de la madera.

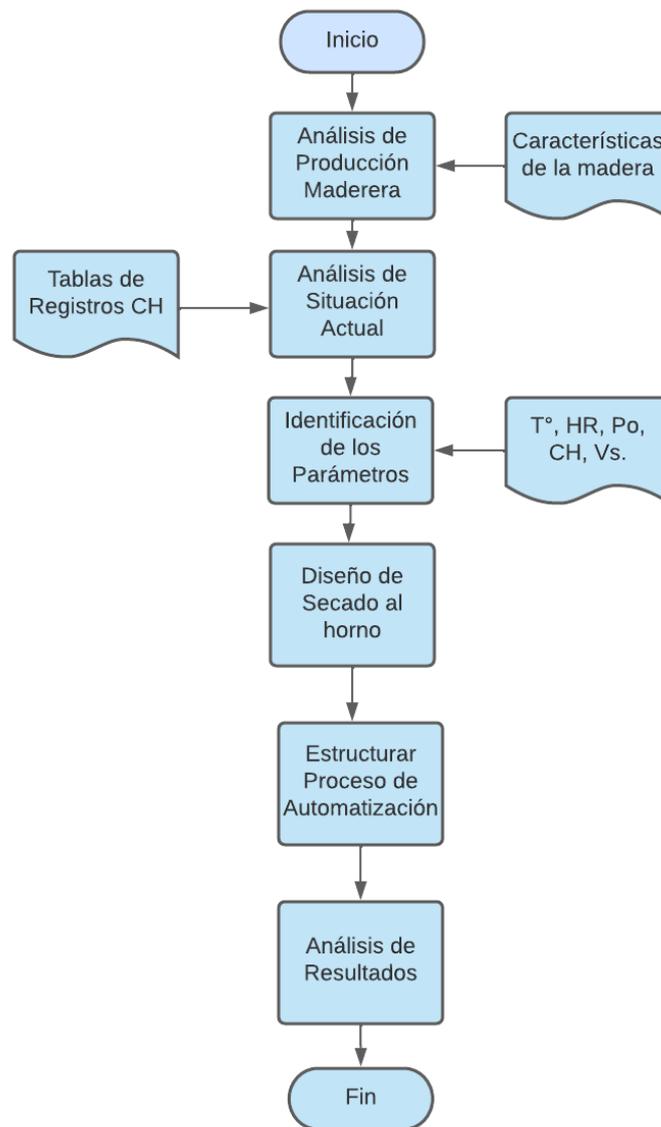
## **Modelo Operativo**

En el proceso de secado de madera, el objetivo principal es la evaporación del agua de la parte externa e interna de la madera, mejorar la tenacidad los aspectos físicos y mecánicos para luego de ser procesada de esta manera tenga mejor calidad. En este tipo de hornos solares el agua de la superficie se evapora en el día mientras que en la noche el agua del interior de la madera pasa a la superficie. De tal manera que se alcanza un equilibrio de humedad relativa durante las 24 horas, lo que asegura la buena calidad en el

proceso de secado y este termina cuando se alcanza la humedad requerida según el uso que se le dará a la madera.

### Figura 12

Diagrama de Flujo para Proceso de Modelo operativo



*Nota.* El modelo operativo empieza con el análisis de producción de madera.

### **Descripción de Modelo Operativo**

En el capítulo 1, se pudo observar la influencia que tiene la producción de la madera en el ámbito económico y laboral a nivel mundial, se conoció la forma tradicional y artificial que se usa para secar la madera, determinando así los beneficios de un secado artificial y sus ventajas de esta manera se da el motivo para el desarrollo de esta investigación.

### **Análisis de situación Actual**

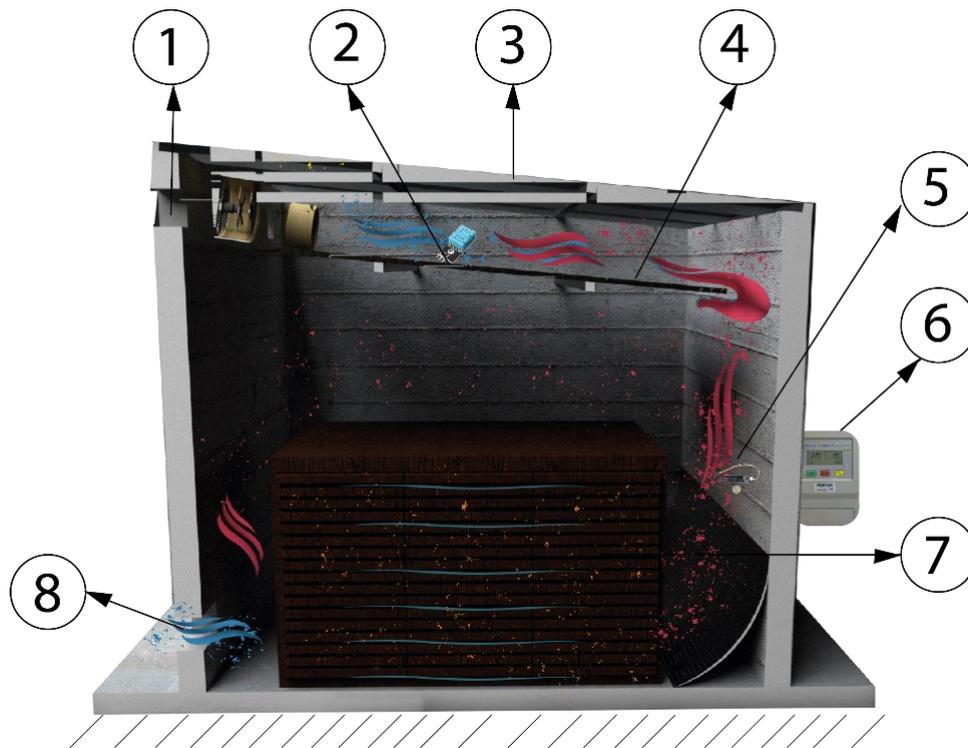
En el capítulo 2, se analiza la situación actual del proceso dentro de la organización identificando el proceso que se utiliza para el secado de madera, también se analiza el tiempo que se requiere para su respectivo desarrollo utilizando tablas de registro de contenido de humedad, se realiza diagramas de CH vs Tiempo para conocer las pendientes de disminución de humedad y determinar la humedad que puede alcanzar en determinado tiempo.

### **Identificación de los Parámetros**

Se analiza los diferentes parámetros que influyen en el diseño de un horno solar como son; Temperatura, Humedad Relativa, Densidad de la madera, Radiación Solar, Velocidad del viento entre otros, con estas variables se realiza el cálculo termodinámico en el capítulo 3, para diseñar y dimensionar el horno solar.

### **Figura 13**

*Esquema de un Horno Solar*



Donde:

1. Ventilador
2. Sensor de Temperatura
3. Techo de vidrio
4. Placa metálica de absorción solar
5. Sensor de humedad
6. Caja de control automático
7. Madera a secarse
8. Ventilación de escape de aire

### **Diseño de Secado al Horno**

Luego del pre secado de la madera que tiene una duración de 30 días, esta se coloca dentro del horno, instalada en sentido de la dirección que corre el aire.

Se procede a cerrar herméticamente, en el transcurso del día la temperatura va a variar consecutivamente lo cual da paso al funcionamiento de los ventiladores.

El trabajo del secador consiste en extraer el aire caliente que se genera en el colector, con la ayuda de los dos ventiladores para introducirlo a la cámara de secado, en donde se dirige hacia las piezas de madera colocadas en su interior, forzándolo a pasar a través de ellas.

Las ventilas de la secadora controlan la circulación del aire en el interior de la cámara; cuando se mantienen cerradas existe una recirculación interior debido a que el aire caliente pasa del colector hacia la madera y de la madera hacia el colector calentándose reiteradamente. Si se mantienen abiertas, el aire caliente pasará del colector a la madera y después saldrá directamente por ventilas, introduciendo así aire del medio ambiente hacia el colector.

### **Estructura del proceso automatizado**

Con la ayuda del dispositivo electrónico arduino de podrá programar las partes que requieren automatización. Los ventiladores que se accionan automáticamente gracias a la activación de un sensor de temperatura que se programara y emitirá una señal cuando la temperatura llegue a los 45 °C, y se desactiven cuando la temperatura disminuya. Las ventilas que son parte muy importante de la estructura del horno se abren automáticamente gracias a un sensor de humedad el cual opera entre el 65% y el 75% es decir si la humedad relativa es >75% las ventilas se abrirán automáticamente hasta que la humedad baje y mientras se mantenga en el rango de 65-75 o menos las ventilas permanecerán cerradas.

### **Análisis de resultados**

Mediante el cálculo termodinámico se podrá determinar los días necesarios para el secado de la madera en este caso el Eucalipto ya que la que más se comercializa en la empresa, y se determinará si el tiempo disminuye alcanzando la humedad requerida para que la madera pueda ser trabajada.

## **CAPITULO 3**

### **PROPUESTA Y RESULTADOS ESPERADOS**

#### **Desarrollo de la Propuesta**

En la empresa Maderas Pachacama, mediante la utilización de cálculos de transferencia de calor y termodinámicos se realizará el diseño para un horno de secado solar, el cual mejorará sustancialmente el proceso de secado de madera, optimizando el proceso de fabricación de tablas de eucalipto.

#### **Análisis del proceso**

La fabricación de tablas de eucalipto tiene varias actividades; la actividad más delicada corresponde a la del secado de madera natural ya que depende directamente de las condiciones climáticas, el tiempo de secado natural es muy prolongado y es el proceso donde se debe mejorar el tiempo mediante un diseño óptimo de secado artificial.

#### **Cálculo de los parámetros fundamentales del secador**

Para el cálculo de los parámetros fundamentales del proceso de secado de madera se ha seleccionado el eucalipto, por ser el tipo de madera más común que se comercializa en la empresa. Todos los cálculos se han hecho en base a un  $1\text{ m}^3$  de madera, lo que permite posteriormente diseñar un secador de cualquier capacidad. Densidad del eucalipto  $0.73\text{ gr/cm}^3$  (Forestal, 2013).

#### **Datos de la madera:**

- Tipo de madera: Eucalipto
- Densidad:  $Po = 730\text{ kg / m}^3 = 0.73\text{ g/cm}^3$

•Volumen de la madera a secar:  $V_m = 6 \text{ m}^3$

### **Madera Eucalipto**

El eucalipto blanco, eucalipto común o eucalipto azul llamado científicamente (*Eucalyptus globulus*), es una especie de arbórea originaria de sureste de Australia, esta especie prefiere suelos ligeramente ácidos y zonas frescas y húmedas. (NaturalistEC, 2021).

El valle de los Chillos es una zona fresca y húmeda, donde se encuentra el Eucalipto Globulus en la mayoría de plantaciones, la empresa Maderas Pachacama utiliza la materia prima de eucalipto para la fabricación de tablas. En la figura 13 se observa la especie de madera a movilizarse en uno de los sectores del Valle de Los Chillos en una guía de circulación emitida por el Ministerio de Ambiente.

### **Figura 14**

*Guía de movilización para madera de Eucalipto Globulus*



**M66M513522114**

Programa: PAFPL14304070099

Licencia: 70099T50028

**Origen**

**Propietario**

Nombres y Apellidos: CONSEJO GUBERNATIVO DE LOS HERMANOS DE LAS ESCUELAS CRISTIANAS  
Razón Social: CONSEJO GUBERNATIVO DE LOS HERMANOS DE LAS ESCUELAS CRISTIANAS  
R.U.C.: 1790170349001

**Ejecutor**

Nombres y Apellidos: PACHACAMA QUINGA JOSE IVAN  
Razón Social: PACHACAMA QUINGA JOSE IVAN  
R.U.C.: 1709772055

**Ubicación**

Provincia: PICHINCHA  
Cantón: QUITO  
Parroquia: CONOCOTO  
Sitio: DEAN ALTO

**Destino**

**Industria Forestal**

Nombre Sucursal: - Sucursal - 1  
Razón Social: PACHACAMA QUINGA JOSE IVAN  
R.U.C.: 1709772055001  
Dirección: VIA A AMAGUANA y - A DOS CUADRAS DE LA GASOLINERA PETROCOMERCIAL

Teléfono:  
Provincia: PICHINCHA  
Cantón: QUITO  
Parroquia: CONOCOTO

**Datos Vehículo:**

Color Vehículo: ROJO  
Placa Vehículo: PXR0856  
Marca de Vehículo: CHEVROLET / GENERAL MOTORS / OMNIBUS BB / BOTAR  
Tipo de Vehículo: Camión

Válida desde: 2022-03-10 12:30:00 hasta: 2022-03-11 12:30:00 tiempo en horas: 24

**DETALLE DE PRODUCTOS INGRESADOS**

N.	PRODUCTO	COD. ESPECIE	NOMBRE COMUN	LARGO	DIAMETRO/ ESPESOR	ANCHO	UNIDADES	VOLUMEN APROVECHADO	VOLUMEN MOVILIZADO
1	Troza Rolliza	28089	EUCALIPTO (Eucalyptus globulus)	2.50	0.40	0	4	1.26	1.26
2	Troza Rolliza	28089	EUCALIPTO (Eucalyptus globulus)	2.50	0.30	0	4	0.71	0.71
3	Troza Rolliza	28089	EUCALIPTO (Eucalyptus globulus)	2.50	0.20	0	5	0.39	0.39
4	Troza Rolliza	28089	EUCALIPTO (Eucalyptus globulus)	2.50	0.50	0	2	0.98	0.98
5	Troza Rolliza	28089	EUCALIPTO (Eucalyptus globulus)	2.50	0.35	0	2	0.48	0.48
								<b>TOTAL MOVILIZADO</b>	<b>3.82</b>

Declaro que los datos en esta guía se apegan a la verdad y en caso contrario, asumo las responsabilidades legales conforme a los artículos 78 y 94 de la Codificación de la Ley Forestal y Conservación de Áreas Naturales y Vida Silvestre.

*Nota.* Guía de movilización de madera Eucalipto Globulus con origen de plantación en el Valle de los Chillos. Adaptada de Ministerio de Agricultura y Ganadería (2022). <https://spf.agricultura.gob.ec/>

**Características del Eucalipto Globulus**

**Densidad Básica**

La densidad básica de la madera es el cociente entre el peso anhidro de una muestra de madera y su volumen verde o saturado (Espina, 2006).

**Contracción**

Es la propiedad que posee la madera, de disminuir las dimensiones radial, longitudinal, tangencial y su volumen a medida que pierde la humedad que contiene (INEN, 2012).

**Tabla 4***Propiedades Físicas del Eucalipto*

	Verde	Seco al aire	Básica
Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	1.16	0.73	0.55
Contracción normal %	Tangencial	Radial	Volumétrica
	10.8	4.4	15.2

Nota. Ficha Técnica No. 10 Eucalipto. Adaptada de Ecuador Forestal.  
<https://ecuadorforestal.org/>

**Temperatura inicial del aire**

El aire que está presente en el ambiente es una mezcla de aire seco y vapor de agua, la cantidad de vapor que se encuentra en el aire es pequeña y juega un papel significativo en las propiedades del aire atmosférico (Coyago & Criollo, 2013).

Es importante conocer los datos de temperatura inicial y final del aire ya que se analiza la temperatura promedio del ambiente que es la temperatura inicial y la temperatura final es la que se encuentra dentro del horno. La temperatura inicial que se considera para este cálculo es la temperatura promedio en la Zona del Valle de los Chillos ver tabla 6. Información tomada de la base de datos de la página Quito Ambiente (Ambiente, 2022). Datos obtenidos en el período 2020 y el primer semestre de 2021, esta temperatura depende directamente de las condiciones climáticas ya que hay días soleados y días nublados donde la temperatura disminuye.

**Tabla 5.***Historial de datos de Temperatura °C*

Año 2020	Trimestre	°C
----------	-----------	----

	Trimestre 1	16,73
	Trimestre 2	16,54
	Trimestre 3	16,05
	Trimestre 4	15,95
Año 2021	Trimestre	°C
	Trimestre 1	15,86
	Trimestre 2	15,85
	Promedio	16,16

*Nota.* Temperatura promedio en el Valle de los Chillos en el período 2020 y primer semestre de 2021. Adaptado de Secretaría de Ambiente 2022, (<http://www.quitoambiente.gob.ec/>)

La temperatura inicial que se considera para el cálculo será de 15°C ya que el promedio de la temperatura en el Valle de Los Chillos se aproxima a este dato preciso que encuentra en el anexo 1.

### **Temperatura Final del aire**

Para determinar la temperatura final del aire se considera la temperatura con la que da inicio el secado.

El eucalipto es una de las maderas de secado difícil se aproxima al 20% de contenido de humedad en 75 días con el secado al aire. En secado al horno, seca sin problemas de defectos mediante el horario suave (Forestal, 2013).

En el anexo 3, se encuentra la tabla de Programa Suave (S): para maderas latifoliadas de secado difícil según Horarios de Secado Practicados por el Pacto Andino en Maderas Regionales.

En la primera columna se encuentra diferentes contenidos de humedad de la madera %, en este caso el contenido de humedad inicial es de 33% y se aproxima al 30% de la tabla, su temperatura en termómetro seco que es la temperatura con la que se inicia el secado es decir temperatura final es de 45 °C.

### **Humedad Relativa inicial y final.**

Es preciso conocer cuál es la humedad límite de la madera para cada temperatura y estado higrométrico del aire ambiente de la zona donde se empleará dicha madera, secarla más sería un sobreesfuerzo y aumentaría el costo del proceso sin beneficio.

El promedio de Humedad Relativa en el Valle de los Chillos es 73% en el período 2020 y primer semestre de 2021 (Ambiente, 2022).

Se determina la Humedad Relativa Ambiente y Contenido de Humedad de Equilibrio de la Madera para Diferentes Temperatura ver anexo1. La Humedad Relativa que se aproxima al 73% en la tabla es de 71% y se considera como humedad relativa inicial y final ya que esta variable permanece constante en el ambiente al principio y final del proceso de secado, estos datos serán necesarios para desarrollar los cálculos termodinámicos.

### **Cálculo de contenido de humedad inicial y final (CH)**

Haciendo uso de la ecuación 1. El nivel de humedad de la madera se calcula como un porcentaje del peso del agua que contiene, respecto al peso del material seco.

La madera en el secado natural alcanza hasta un contenido de humedad del 20 al 30% y sin decoloración. A partir de este porcentaje el secado artificial puede evitar los daños en la madera causados por el secado incontrolado al aire libre y mejorar la calidad

de la materia prima. La principal ventaja del pre secado es la menor tasa de degradación de la madera (Akribis, 2021).

La humedad inicial promedio del pre secado es de 80% esta humedad es determinada por una balanza digital, estos datos fueron tomados en la empresa Maderas Pachacama mediante varias muestras de madera recién aserrada de varias plantaciones ubicadas en el sector del Valle de los Chillos.

En este caso la humedad promedio es de 33%, después de un mes del pre secado según las tablas de registro en el capítulo 2 y se aproxima al 30% de CH establecido en la tabla del anexo3 y será tomado en cuenta para los cálculos. Y como humedad final se considera el 13% este dato se ubica de acuerdo a la temperatura inicial de 15 °C y a la humedad relativa del 71% según la tabla de Humedad de Equilibrio para diferentes Temperaturas ver Anexo 1.

- Contenido de Humedad Inicial:  $w_o = 30\%$
- Contenido de Humedad Final:  $w_f = 13\%$

### **Entalpía inicial**

La cantidad de energía que un sistema termodinámico intercambia con su medio ambiente en condiciones de presión constante se llama entalpía, la cantidad de energía que el sistema absorbe o libera a su medio ambiente en procesos en los que la presión no varía (Coluccio, 2021).

$$h = C_p T + w * h_g \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

Cp: Calor específico a presión constante

T: Temperatura °K

w: humedad específica del aire

hg: vapor saturado

### Calor específico a presión constante

El calor específico es la cantidad de calor que se requiere para que una unidad de una sustancia incremente su temperatura en una unidad de grado Celsius (Coluccio, 2021).

En el anexo 4 se encuentra el calor específico del aire a varias temperaturas en grados Kelvin por lo cual se transformó los 15 °Celsius a Kelvin.

$$T(K) = T(^{\circ}C) + 273.15 \quad (\text{Ec. 3})$$

$$^{\circ}K = 15 + 273.15$$

$$^{\circ}K = 288.15$$

En la tabla del anexo 4 se puede apreciar diferentes calores específicos a diferentes temperaturas en °K. Adaptada de Cengel octava edición, Tabla A-2.

Para conocer el calor específico exacto se procede a interpolar entre 250 y 300 °K con los datos de la Tabla 10.

$$y = y_0 + \frac{Y_1 - Y_0}{X_1 - X_0}(X - X_0) \quad (\text{Ec. 4})$$

### Interpolación

#### Tabla 6

*Tabla con datos para interpolación de temperatura inicial*

Temperatura °K	Cp KJ/Kg.°K
----------------	-------------

X	Y
250	1,003
288.15	
300	1,005

Reemplazamos los datos de la Tabla 10, en la Ec. 4.

$$Y = 1.003 + \frac{1.005 - 1.003}{300 - 250} (288.15 - 250)$$

$$Y = 1.004 \frac{KJ}{Kg. ^\circ K}$$

#### Humedad específica del aire

$$w = \frac{0.622 P_v}{P - P_v} \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

$P_v$ : Presión

$P$ : Presión parcial

#### Presión parcial del aire seco

$$P_v = \phi P_g \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

$\phi$ : humedad relativa

$P_g$ : Presión de saturación

### **Presión de saturación**

El dato de presión de saturación se obtiene de la tabla de Agua saturada a una temperatura de 15 °C, 1.7057 kPa, ver anexo 5.

### **Vapor Saturado**

El dato de vapor saturado se obtiene del anexo 5, en la columna de entalpía de vapor saturado a 15 °C, 2528.3 hg.

Con el dato de presión saturada de agua a 15 °C, multiplicamos por el 71% de la humedad relativa del ambiente y se obtiene la presión parcial del aire seco.

$$Pv = (0.71) (1.7057)$$

$$Pv = 1.2110 \text{ kPa}$$

### **Presión**

Para determinar la presión en el Valle de los Chillos se descargó los datos históricos de la página de Quito Ambiente donde se encontró datos de presión barométrica o presión atmosférica en diferentes sectores. El promedio de presión atmosférica del año 2020, y el primer semestre del 2021 es 759.59 milibares que equivale a 75.95 kPa (Ambiente, 2022).

### **Tabla 7**

*Datos históricos de presión atmosférica en el Valle de los Chillos*

Año 2020	Trimestres	Milibares
	Trimestre 1	759,73
	Trimestre 2	760,34
	Trimestre 3	759,66

Año 2021	Trimestres	Milibares
	Trimestre 4	759,39
	Trimestre 1	759,09
	Trimestre 2	759,99
	Promedio	759.70

Nota. El promedio de presión atmosférica esta dado en milibares 759.70 mb.

### Cálculo de humedad específica del aire

Reemplazamos los datos en la Ec. 5, tomando en cuenta que el dato de presión se transforma de milibares a Kilopascales donde un 1 milibar = 0.1 Kilopascales.

$$w = \frac{0.622 * 1.2110 \text{ kPa}}{75.970 \text{ kPa} - 1.2110 \text{ kPa}}$$

$$w = 0.0100$$

### Cálculo de entalpía inicial

Con los datos obtenidos reemplazamos en la Ec. 2

Entalpia inicial

Datos:

$$Cp: 1.004 \frac{KJ}{Kg.^{\circ}C}$$

To: 15 °C

w: 0.0100

hg: 2528.3KJ/Kg (Vapor saturado)

$$h = Cp To + whg$$

$$h = 1.004 \frac{KJ}{Kg.^{\circ}C} (15^{\circ}C) + 0.0100 (2528.3KJ/Kg)$$

$$h = 40.343 \text{ KJ/Kg}$$

### Entalpia final

Para calcular la entalpia final hacemos uso de la Ec. 2

$$h = Cp.Tf + w.hg$$

Datos:

Se transforma los grados Celsius de la temperatura final 45 °C a grados Kelvin usando la Ec. 3

$$^{\circ}K = 45 + 273.15$$

$$^{\circ}K = 318.15$$

Con los datos de la tabla del anexo 4 donde se encuentran calores especificos a diferentes temperaturas y tomando como referencia la temperatura obtenida de 318.15 °K, se encuentra entre 300 y 350 °K, por lo tanto se realizo nuevamente la interpolación lineal usando la Ec. 4

### Tabla 8

*Tabla con datos para interpolación de temperatura final*

Temperatura °K	Cp KJ/Kg.°K
X	Y
300	1,005
318.15	
350	1,008

$$Y = 1.005 + \frac{1.008 - 1.005}{350 - 300} (318.15 - 300)$$

$$Y = 1.006 \frac{KJ}{Kg \cdot ^\circ K}$$

### **Humedad específica del aire con temperatura final:**

Haciendo uso de la Ec. 5, calculamos la humedad específica del aire con temperatura final.

### **Presión parcial del aire seco para temperatura final:**

Haciendo uso de la Ec. 6, calculamos la presión parcial para la temperatura final. Ver datos de Presión saturada (9.5953 kPa) y Vapor saturado (2582.4) en anexo 5.

Con el dato de presión saturada de agua a 45 °C que es la temperatura final, se multiplica por el 71% de la humedad relativa final, para obtener la presión parcial del aire seco. Reemplazamos los datos en la Ec. 6

$$P_v = (0.71) (9.5953)$$

$$P_v = 6.81 \text{ kPa}$$

La presión es constante y se mantiene en 75.97 kPa tanto para la humedad específica inicial y final.

### **Cálculo humedad específica del aire con temperatura final**

Los datos obtenidos reemplazamos en la Ec. 5

$$w = \frac{0.622 * 6.81 \text{ kPa}}{75.97 \text{ kPa} - 6.81 \text{ kPa}}$$

$$w = 0.0612$$

### Cálculo de entalpía final

Entalpía final

Datos:

$$C_p: 1.006 \frac{KJ}{Kg \cdot ^\circ K}$$

$$T_o: 45 \text{ } ^\circ C$$

$$w = 0.0612$$

$$h_g: 2582.4 \text{ } KJ/Kg$$

Los datos obtenidos con temperatura final reemplazamos los datos en la Ec. 2

$$h = C_p \cdot T_o + w \cdot h_g$$

$$h = 1.006 \frac{KJ}{Kg \cdot ^\circ C} (45 \text{ } ^\circ C) + 0.0612 (2582.4 KJ/Kg)$$

$$h = 203.31 \text{ } KJ/Kg$$

### Datos del aire:

Con el desarrollo de las ecuaciones anteriores se obtiene los datos del aire.

- Temperatura inicial del aire:  $t_o = 15 \text{ } ^\circ C$
- Temperatura final del aire:  $t_f = 45 \text{ } ^\circ C$
- Humedad relativa inicial:  $n_o = 71 \text{ } \%$
- Humedad relativa final:  $n_f = 71 \text{ } \%$
- Entalpía Inicial:  $I_o = 40.34 \text{ } kJ / kg. \text{ de aire seco}$
- Entalpía Final:  $I_f = 203.31 \text{ } kJ / kg. \text{ de aire seco}$
- Contenido de humedad inicial:  $X_o = 0.0100 \text{ } kg. \text{ de humedad} / kg. \text{ De aire seco.}$   
(Humedad específica inicial del aire)
- Contenido de humedad Final:  $X_f = 0.0612 \text{ } kg. \text{ de humedad} / kg. \text{ de aire seco.}$

(Humedad específica final del aire)

### Humedad total a extraer por m<sup>3</sup> de madera

$$W_t = P_o \cdot V_m \frac{W_o - W_f}{100 - W_f} \quad (\text{Ec. 7})$$

Po: Densidad de la madera Eucalipto (730 kg/m<sup>3</sup>)

Vm: Volumen de la madera 6m<sup>3</sup>

Wo: Contenido de humedad inicial (30%)

Wf: Contenido de humedad final (13%)

$$W_t = 730 \text{ Kg} \cdot 1 \text{ m}^3 \frac{30 - 13}{100 - 13}$$

Wt = 142.64 kg de humedad / metro<sup>3</sup> de madera

### Consumo Especifico de Calor

$$q = \frac{I_f - I_o}{X_f - X_o} \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde:

Entalpía Inicial:  $I_o = 40.34 \text{ kJ / kg. de aire seco}$  (Dato que se obtuvo con la Ec. 2 con temperatura inicial)

Entalpía Final:  $I_f = 203.31 \text{ kJ / kg. de aire seco}$  (Dato que se obtuvo con la Ec. 2 con temperatura final)

Contenido de humedad inicial:  $X_o = 0,0100 \text{ kg. de humedad / kg. de aire seco.}$  (Dato que se obtuvo con la E. 5 con temperatura inicial)

Contenido de humedad Final:  $X_f = 0,0612 \text{ kg. de humedad / kg. de aire seco.}$  (Dato que se obtuvo con la E. 5 con temperatura final)

Reemplazamos los datos en la Ec. 8

$$q = \frac{(203.31 - 40.34) \text{ kJ / kgde aire seco}}{(0.0612 - 0.0100) \text{ kg de húmedad / kgde aire seco}}$$
$$q = 3183 \text{ kJ / kg de húmedad}$$

**Calor total necesario para cada  $\text{m}^3$  de madera (Q).**

$$Q = q \cdot W_t \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde:

q: Consumo específico de calor

Wt: Humedad total a extraer por  $\text{m}^3$  de madera

$$Q = (3183 \text{ kJ / kg de húmedad}) \cdot (142.64 \text{ kg de humedad / metro}^3 \text{ de madera})$$

$$Q = 454023.12 \text{ kJ / metro}^3 \text{ de madera}$$

### **Tamaño y capacidad del secador solar**

Al momento de diseñar un secador solar, se considera que el tamaño óptimo de la cámara está en función del volumen de madera a secarse, no es conveniente construir hornos con capacidades superiores a  $15 \text{ m}^3$ , pues cuanto más grande sea la cámara menos eficiente es el secado (Kurú, 2008).

El ancho de la secadora debe garantizar una uniformidad en la circulación del aire a través de la pila de madera, se recomienda que las secadoras no superen los 5 m de ancho y largo (Kurú, 2008).

Un horno solar que tenga (3.5 m de ancho x 3.5 m de largo) con una altura máxima de 3 m permite apilar una carga de madera de 6.6 m<sup>3</sup> (Kurú, 2008).

### **Figura 15**

#### *Horno de Secado Solar*



*Nota.* Secadora solar con capacidad máxima de 6 m<sup>3</sup>. Adaptada de DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR SOLAR PARA MADERA. Kurú: Revista Forestal (Costa Rica) 5 (14), 2008.

#### **Volumen de la cámara**

Con estos datos y con los criterios expuestos en tópicos anteriores, se procede a determinar la forma y dimensiones de la instalación. Para lograr el correcto movimiento

del aire y un secado uniforme se selecciona una relación entre el volumen de la cámara ( $V_c$ ) y el volumen de la madera ( $V_m$ ) igual a 7 (Carrión, 2004).

$$\frac{V_c}{V_m} = 7 \quad (\text{Ec. 10})$$

Para la instalación se requiere una capacidad de secado de  $6 \text{ m}^3$  de madera, por tanto, los parámetros fundamentales de la cámara de secado son:

El volumen del cámara calculado por la relación anterior es:

$$V_c = V_m \cdot 7$$

$$V_c = 6 \text{ m}^3 \cdot 7$$

$$V_c = 42 \text{ m}^3$$

Por facilidad en construcción y operación se selecciona la forma de la cámara de sección rectangular teniendo así los parámetros del secador.

Volumen:  $V_c = 42 \text{ m}^3$

Ancho:  $A_n = 3.5 \text{ m}$

Alto:  $H_c = 3 \text{ m}$

Largo:  $L_c = 4 \text{ m}$

Capacidad:  $C = 6 \text{ m}^3$  de madera

Para lograr una mejor distribución de la energía solar en el interior de secador durante el día, se sitúa el eje longitudinal de la cámara en dirección Norte – Sur. Con estos valores el área de captación del secador será de  $14 \text{ m}^2$ : ancho x largo ( $3.5 \times 4$ ) m.

### **Cálculo de la energía útil del secador**

Para el diseño o selección de un secador solar es necesario conocer las condiciones de operación a la que estará sometido el equipo, en nuestro caso se exponen las condiciones del Valle de los Chillos Quito – Ecuador.

### **Condiciones de Operación**

Latitud:  $-0.26^\circ$  (America, 2022)

Mes y día escogido para el cálculo: 20 (i) (día promedio de radiación solar)

Velocidad media del viento (V): 1.2 m/s (Ambiente, 2022).

Temperatura ambiental:  $15^\circ\text{C}$

### **Características del secador solar**

Plato de absorción de acero

Número de cubiertas de vidrio (N): 1

Área del secador solar ( $A_c$ ):  $14\text{ m}^2$

Área lateral ( $A_1$ ):  $12\text{ m}^2$

Espesor de la lámina de vidrio (L):  $5\text{mm} = 0.005\text{m}$

Coefficiente de absorción del vidrio ( $K_a$ ):  $2.5\text{ m}^{-1}$

Absorbencia del plato:  $\alpha = 0.95$

Espesor de la plancha del plato de absorción (d):  $2\text{mm} = 0.002\text{m}$

Temperatura de entrada del fluido:  $15^\circ\text{C}$

Incremento de temperatura del fluido:  $45^\circ\text{C}$

Espesor de aislante de los laterales:

$L_b = 70\text{mm}$  (poliuretano)

$L_a = L_c = 80 \text{ mm}$  (ladrillo)

Temperatura media del plato de absorción:  $T_p = 90^\circ\text{C}$

Inclinación del colector:  $S = 10^\circ$  ( $S = \text{Latitud} + 10^\circ$ ) ( $S = 0.26 + 10^\circ$ ;  $S = 10.26^\circ$ ; redondeo =  $10^\circ$ ) Criterio utilizado por varios autores (Carrión, 2004).

### Parámetros de la cinemática solar

#### Determinación de la declinación solar para el día medio del mes de Junio ( $\delta$ ) y energía incidente.

Para este estudio se considera conveniente trabajar con el día 20 del mes de junio de 2021 por ser este mes el de más baja radiación entre 2020 y el primer semestre del 2021 (Universo, 2021). Se trabaja con el día de menos radiación solar para que los resultados de tiempo de secado sean más exactos con respecto a la efectividad de la radiación solar que es la principal fuente de energía de este sistema.

$$n = 151 + i \quad (\text{Ec. 11})$$

Entonces:

$$n = 151 + 20$$

$$n = 171$$

Siendo n: el día medio del mes de junio ( $n = 171$ )

$$\delta = 23.45 * \text{sen} \left( 360 \left( \frac{284+n}{365} \right) \right) \quad (\text{Ec. 12})$$

$$\delta = 23.45 * \text{sen} \left( 360 \left( \frac{284 + 171}{365} \right) \right)$$

$$\delta = 23.44^\circ$$

### Angulo horario de salida del sol

El Angulo Horario de Salida del Sol se calcula según la ecuación tomada del Libro Duffie.

$$Ws = \cos^{-1}(-tg\phi * tg\delta) \quad (\text{Ec. 13})$$

$$Ws = \cos^{-1}(-tg(-0.26) * tg(23.44))$$

$$Ws = \cos^{-1}(0.001940255182)$$

$$Ws = 89.88^\circ$$

### Determinación de la radiación solar extraterrestre sobre una superficie normal al sol (Ho').

Este valor se puede escoger de tablas para cada día del año, o se determina según Duffie.

$$Ho' = \frac{24 * 3600 * Isc}{\pi} \left( 1 + 0.033 \cos \left( \frac{360 * (n)}{365} \right) \right) * (\cos\phi * \cos\delta * \sin Ws + \left( \frac{\pi * Ws}{180} \right) \sin\phi * \sin\delta) \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde:

Isc: es la Constante Solar y tiene un valor de 1367 W/m<sup>2</sup> (Carrión, 2004).

Reemplazamos y tenemos:

$$Ho' = \frac{24 * 3600 * 1367}{\pi} \left( 1 + 0.033 \cos \left( \frac{360 * (171)}{365} \right) \right) * (\cos(-0.26) * \cos(23.44) * \sin(89.88) + \left( \frac{\pi * (89.88)}{180} \right) \sin(-0.26) * \sin(23.44))$$

$$H_o' = 37595198.69(1 + 0.033\cos(168.6575)) * (0.9999 * 0.9174 * 0.9999 + (1.5687) * (-0.0045) * (0.3977))$$

$$H_o' = 37595198.69(1 + (-0.0323)) * (0.9999 * 0.9174 * 0.9999 + (1.5687) * (-0.0045) * (0.3977))$$

$$H_o' = 33.20 \text{ MJ}/m^2h$$

### **Cálculo de la radiación total diaria por unidad de área de una superficie**

**horizontal (H')**

$$KT = \frac{H'}{H_o'} \quad (\text{Ec. 15})$$

Despejamos H':

$$H' = KT * H_o'$$

Siendo KT: Coeficiente de nubosidad = 0.383

$$H' = 0.383 * (33.20)$$

$$H' = 12.71 \times 10^3 \text{ KJ}/m^2h$$

### **Cálculo de radiación difusa diaria que cae sobre una superficie horizontal**

**(Hd')**

$$Hd' = f(KT) * H' \quad (\text{Ec. 16})$$

f(KT): viene dada por la siguiente expresión.

$$F(KT) = 1,3903 - 4,0273 * (KT) + 5.5315 * (KT)^2 - 3,1080 * (KT)^3$$

para valores de  $0.3 < KT < 0.7$

de lo cual tenemos:

$$f(KT) = 1,3903 - 4,0273 * (0.383) + 5.5315 * (0.383)^2 - 3,1080 * (0.383)^3$$

$$f(KT) = 0.484$$

entonces:

$$Hd' = 0.484 * 12.71 * 10^3 \text{ KJ/m}^2\text{h}$$

$$Hd' = 6.15 * 10^3 \text{ KJ/m}^2\text{h}$$

**Determinación de la radiación solar total horaria por unidad de área que cae sobre una superficie horizontal.**

$$H = K * H' \quad (\text{Ec. 17})$$

Siendo:

K, la relación entre la radiación solar horaria y la radiación solar total diaria y se calcula por la siguiente expresión tomada de libro de Duffie.

$$K = \left(\frac{\pi}{24}\right)(a + b * \cos W) \left[ \frac{(\cos W - \cos Ws)}{\text{sen} Ws - \left(\frac{(\pi * Ws)}{180}\right) * \cos Ws} \right] \quad (\text{Ec. 18})$$

$$a = 0.409 + 0.5016 \text{ sen } (Ws - 60) \quad (\text{Ec. 19})$$

$$a = 0.409 + 0.5016 \text{ sen } (89.88 - 60)$$

$$a = 0.658$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \text{ sen } (Ws - 60) \quad (\text{Ec. 20})$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \text{ sen } (89.88 - 60)$$

$$b = 0.423$$

W es el ángulo horario que toma valor 0 para el mediodía solar y varía 15° cada hora. Los datos de a y b se reemplazan en la ecuación 18 y los resultados se registran según cada horario del día en la tabla 11.

**Tabla 9**

*Radiación solar total horaria por unidad de área*

Horas del día	W	Radianes	K	H (KJ/m <sup>2</sup> h)
6 -7 17-18	75	1,3089	0,026	311,9
7 - 8 16 - 17	60	1,0471	0,056	688,5
8 - 9 15 - 16	45	0,7853	0,088	1076,4
9 - 10 14 - 15	30	0,5235	0,116	1414,5
10 - 11 13 - 14	15	0,2617	0,135	1645,0
11 - 12 12 - 13	0	0	0,142	1726,8

*Nota:* Los valores de la columna W se transforman a Radianes para poder realizar el respectivo cálculo en Excel. Se reemplazan los datos de la ecuación 19 y 20 en la ecuación 18 y se hallan los valores de K para cada hora del día y se calcula la Radiación solar total horaria por unidad de área sobre una superficie horizontal (H).

**Determinación de la radiación difusa horaria por unidad de área que cae sobre una superficie horizontal (Hd).**

La ecuación de la relación entre la difusa horaria y radiación difusa diaria sobre una superficie horizontal como función de la longitud del día. De esta ecuación se obtienen los valores de Kd.

$$Hd = Kd * Hd' \quad (\text{Ec. 21})$$

Los valores de Kd fueron encontrados por la siguiente ecuación:

$$Kd = \left(\frac{\pi}{24}\right) * \left(\frac{(\cos W - \cos Ws)}{\text{sen}Ws - \left(\frac{\pi * Ws}{180}\right) * \cos Ws}\right) \quad (\text{Ec. 22})$$

**Tabla 10**

*Radiación difusa horaria por unidad de área*

Horas del día	W	Radianes	Kd	Hd (KJ/m <sup>2</sup> h)
6 - 7	75	1,3089	0,034	208,7
17-18				
7 - 8	60	1,0471	0,065	404,8
16 - 17				
8 - 9	45	0,7853	0,093	573,1
15 - 16				
9 - 10	30	0,5235	0,113	702,3
14 - 15				
10 - 11	15	0,2617	0,127	783,5
13 - 14				
11 - 12	0	0	0,131	811,2
12 - 13				

*Nota.* Con los valores horarios de Kd obtenidos con la ecuación 22 se calculan los valores de Hd.

**Determinación del valor del ángulo de incidencia horario de la radiación solar directa sobre el calentador solar ( $\theta_t$ ).**

Para un máximo rendimiento anual, se recomienda darle a esta superficie una inclinación igual a la latitud del lugar.

Donde el ángulo de incidencia de la radiación solar sobre el calentador solar, viene dado por:

Para el hemisferio sur tenemos:

$$\cos\theta_t = [\cos(\phi + S) * \cos\delta * \cos W + (\sin(\phi + S) * \sin\delta)] \quad (\text{Ec. 23})$$

$$\theta_t = \arccos[\cos(\phi + S) * \cos\delta * \cos W + (\sin(\phi + S) * \sin\delta)] \quad (\text{Ec. 24})$$

Donde:

$S = 10^\circ$  (ángulo de inclinación de la superficie captadora)

$\phi = -0.26^\circ$  (Latitud del Valle de los Chillos)

$S = 23.44^\circ$  (Declinación solar)

$W =$  ángulo horario que toma valor 0 para el mediodía solar y varía  $15^\circ$  cada hora

Para calcular  $\cos \theta_t$  y  $\theta_t$ , reemplazamos los datos en la Ec. 23 y Ec. 24

**Tabla 11**

*Angulo de incidencia horario*

Horas del día	W	Radianes (W)	Cos $\theta_t$	$\theta_t$
6 -7 17-18	75	1,3089	0,301	72,5
7 - 8 16 - 17	60	1,0471	0,519	58,7

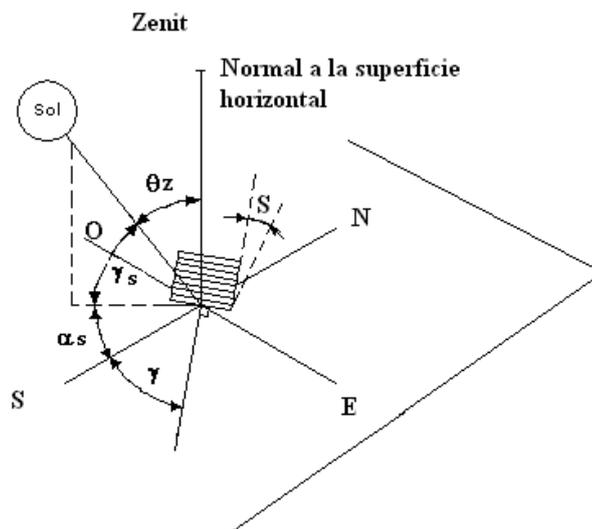
8 - 9	45	0,7853	0,707	45,0
15 - 16				
9 - 10	30	0,5235	0,851	31,7
14 - 15				
10 - 11	15	0,2617	0,942	19,7
13 - 14				
11 - 12	0	0	0,972	13,5
12 - 13				

Nota. Los resultados de la columna  $\theta t$  son el resultado de la inversa de la columna  $\theta t$ .

### Determinación del ángulo Cenital

**Figura 16**

*Angulo Cenital*



**Nota.** Adaptada de Cálculo y Diseño de Hornos Solares para el Secado de Madera para la Ciudad de Loja. Wilman Carrión 2004

Estos valores se calculan a partir de la expresión teniendo en cuenta que la cubierta

está orientada al norte entonces el acimut  $\gamma = 0^\circ$ , por lo que el Ángulo cenital se calcula según la siguiente fórmula (Carrión, 2004).

$$\cos\theta_z = \cos\phi * \cos\delta * \cos W + \sin\delta * \sin\phi \quad (\text{Ec. 25})$$

**Tabla 12**

*Valores ángulo cenital*

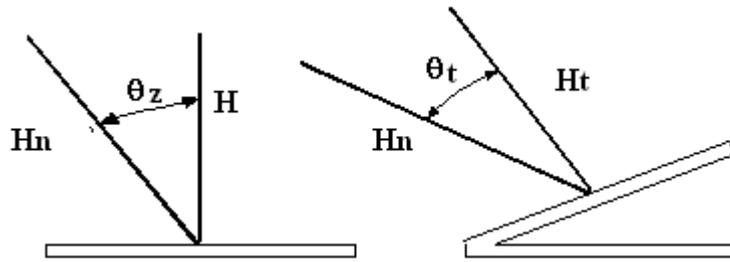
Horas del día	W	Radianes (W)	Cos $\theta_z$	$\theta_z$
6 - 7 17-18	75	1,3089	0,235	76,4
7 - 8 16 - 17	60	1,0471	0,456	62,8
8 - 9 15 - 16	45	0,7853	0,646	49,7
9 - 10 14 - 15	30	0,5235	0,792	37,6
10 - 11 13 - 14	15	0,2617	0,884	27,9
11 - 12 12 - 13	0	0	0,915	23,8

*Nota:* Los valores de  $\theta$ , son el resultado de la cosecante de Cos  $\theta_z$ .

**Cálculo de la relación de la radiación solar directa sobre una superficie inclinada y la radiación solar directa sobre una superficie horizontal (Rb).**

**Figura 17**

*Radiación directa en superficies horizontal e inclinada*



*Nota.* Este coeficiente nos da la relación entre la radiación que incide sobre una superficie inclinada y la que incide sobre una superficie horizontal como se observa en la figura. Adaptada de *Calculo y Diseño de Hornos Solares para el Secado de Madera para la Ciudad de Loja.*

Viene dada por la expresión:

$$Rb = \frac{Ht}{H} = \frac{Hn * \cos\theta_t}{Hn * \cos\theta_z} \quad (\text{Ec. 26})$$

$$Rb = \frac{\cos\theta_t}{\cos\theta_z} \quad (\text{Ec. 27})$$

**Tabla 13**

*Valores Rb para cada hora del día*

Horas del día	W	Radianes (W)	Cos $\theta_z$	Cos $\theta_t$	Rb
6 -7 17-18	75	1,309	0,301	0,235	1,280
7 - 8 16 - 17	60	1,047	0,519	0,456	1,137
8 - 9 15 - 16	45	0,785	0,706	0,646	1,093
9 - 10 14 - 15	30	0,524	0,850	0,792	1,073
10 - 11 13 - 14	15	0,262	0,940	0,884	1,064
11 - 12 12 - 13	0	0,000	0,971	0,915	1,061

*Nota.* De la ecuación 27 se determina el valor de  $R_b$  para cada hora.

**Determinación de los valores de la radiación solar total horaria que cae sobre la superficie del secador solar ( $H_t$ ).**

La Radiación Solar Total Horaria se calcula según Carrión 2004 por la siguiente expresión.

$$H_t = (H - H_d) * R_b + H_d \left( \frac{1 + \cos S}{2} \right) + H * P_t \left( \frac{1 - \cos S}{2} \right) \quad (\text{Ec. 28})$$

A la superficie de captación del secador llega radiación solar por tres conceptos distintos:

- La energía producida por la radiación directa.

$$(H - H_d) * R_b$$

- La energía producto de la radiación difusa.

$$H_d \left( \frac{1 + \cos S}{2} \right)$$

Y la energía que llega al colector después que los rayos del sol son reflejados por el suelo siendo  $p_t$  el Albedo o reflexividad de la tierra ( $p_t = 0.2$ )

$$H * P_t \left( \frac{1 - \cos S}{2} \right)$$

**Tabla 14**

*Valores de radiación solar total horaria*

Horas del día	H	H <sub>d</sub>	R <sub>b</sub>	H <sub>t</sub>	H <sub>t</sub> (kJ/h) para A=14m <sup>2</sup>
6 -7 17-18	311,9	208,7	1,280	339,67	4755,32

7 - 8	688,5	404,8	1,137	725,34	10154,78
16 - 17					
8 - 9	1076,4	573,1	1,093	1120,28	15683,91
15 - 16					
9 - 10	1414,5	702,3	1,073	1463,26	20485,68
14 - 15					
10 - 11	1645,0	783,5	1,064	1696,62	23752,74
13 - 14					
11 - 12	1726,8	811,2	1,061	1779,35	24910,95
12 - 13					

*Nota:* El resultado de  $H_t$  es multiplicado por el área de captación que es el largo por el ancho del colector ( $3.5 \times 4$ )  $m = 14 m^2$ , el valor de  $S = 10$  que es la inclinación del colector y se reemplaza en la ecuación 28.

**Determinación del valor efectivo horario del producto Transmisividad –  
Absorbencia efectiva del calentador solar ( $\tau\alpha$ )e.**

El producto  $(\tau\alpha)e$  es un factor muy importante a tener en cuenta en la eficiencia de un secador, esto depende:

- De las características del material de la cubierta (su reflexibilidad y su factor de absorción y extinción).
- Del espesor de las placas transparentes usadas.
- Del número de placas transparentes utilizadas.
- De las características de la superficie del plato de absorción.

El producto Transmisividad – Absorbencia efectiva del secador solar se puede determinar por la ecuación:

$$(\tau \alpha)e = (\tau \alpha) + 0,27(1 - \tau) \quad (\text{Ec. 29})$$

Para calcular  $(\tau\alpha)e$ , hay que tener en cuenta además que:

$\alpha$  : Coeficiente de absorción del plato de absorción.

$\tau$  : Coeficiente de Transmisividad total de la cubierta de vidrio.

$Ka = 2,5m^{-1}$  (Coeficiente de absorción del vidrio)

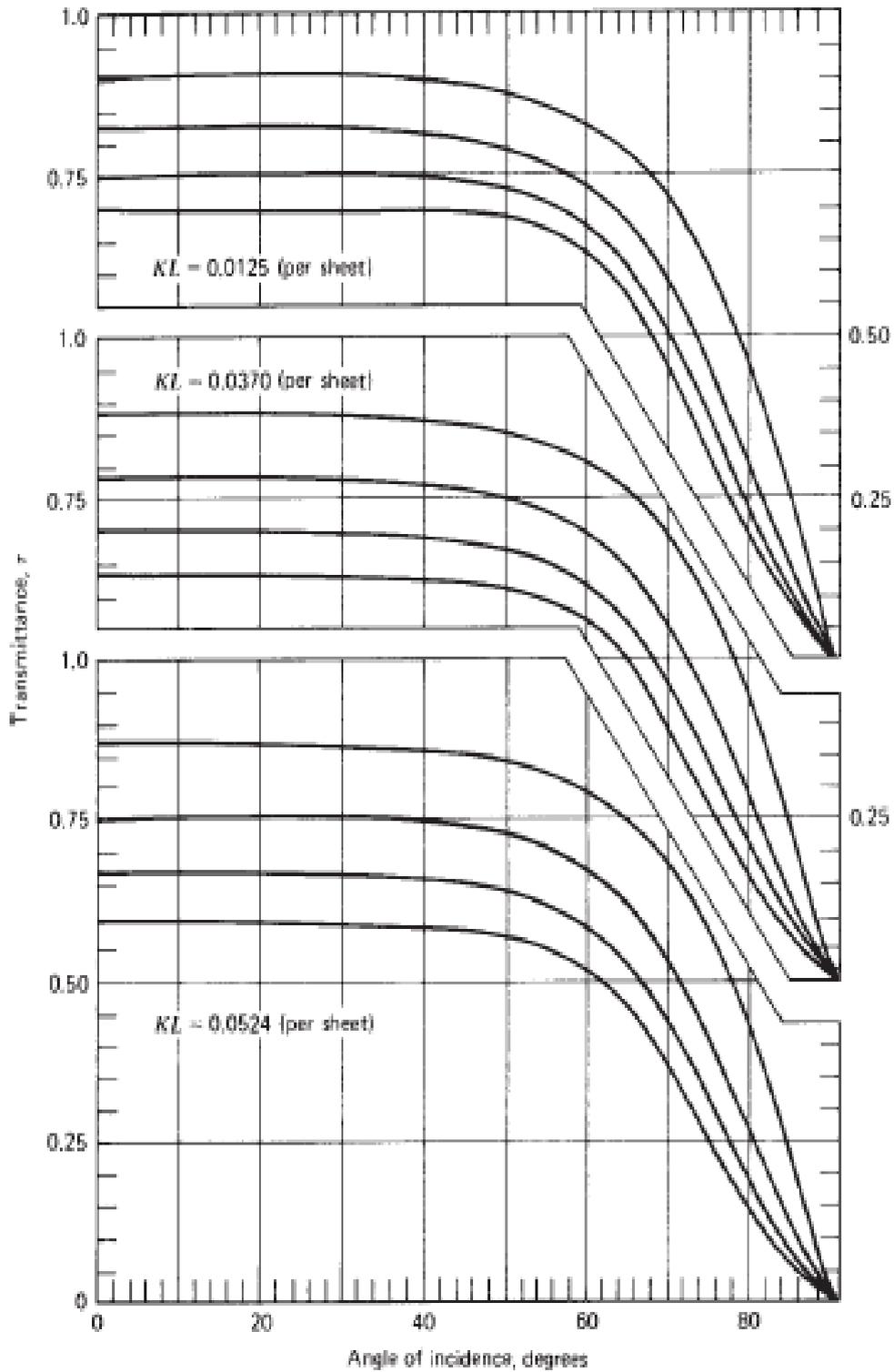
$L = 5 \cdot 10^{-3}m$  (espesor del vidrio)

$\alpha = 0,95$  (Para pintura negro mate)

$K \cdot L = 0,0125$  se utiliza una cubierta.

### **Figura 18**

*Transmitancia (considerando absorción y reflexión) de uno, dos, tres y cuatro cubiertas para tres tipos de vidrio.*



*Nota.* Valores de transmitancia con diferentes ángulos de incidencia. Adaptada de Solar Engineering of Thermal Processes. Duffie 2013.

**Tabla 15**

*Valores de  $(\tau\alpha)_e$  utilizando el método gráfico*

Horas del día	$\theta t$	$(\tau\alpha)_e$
6 - 7	72,5	0,54
17-18		
7 - 8	58,7	0,740
16 - 17		
8 - 9	45,0	0,810
15 - 16		
9 - 10	31,7	0,828
14 - 15		
10 - 11	19,7	0,830
13 - 14		
11 - 12	13,5	0,840
12 - 13		

*Nota:* Los valores son dados con los resultados de  $\theta t$  en la tabla 17, y el valor de  $(\tau\alpha)_e$ , se dan según la gráfica en la figura 16 en la capa de  $K \cdot L = 0,0125$  por hoja.

### **Energía absorbida**

#### **Cálculo de la energía absorbida por el secador solar en la unidad de área**

**(S), y en toda su superficie.**

Este valor de la radiación total absorbida (S), por el secador, depende:

- De la radiación que llega al mismo.
- De ciertas propiedades de los materiales y características de la placa absorbidora (absorbancia, emisividad y transmisividad, etc.).

$$S = Ht * (\tau\alpha)_e * (1 - a) * (1 - b) \quad \text{(Ec. 30)}$$

Donde:

$(\tau\alpha)_e$  es el valor efectivo del producto transmisividad –absorbancia.

$(1-a)$  es el factor del efecto del polvo sobre el colector.

(1-b) es el factor del efecto de sombra sobre el plato de absorción.

Siendo a y b coeficientes que tienen en cuenta la suciedad y efecto de sombra de los laterales de la cubierta del secador, respectivamente y pueden tener los siguientes valores los cuales reemplazamos en la Ec. 31.

$$a = 0,02$$

$$b = 0,03$$

y tenemos:

$$S = Ht * (\tau\alpha)e * (0.9506)$$

**Tabla 16**

*Valores de energía absorbida*

Horas del día	S (kJ/m2h)	S (kJ/h)
6 - 7	174,36	2450,49
7 - 8	510,24	7147,92
8 - 9	862,60	12086,26
9 - 10	1151,73	16138,78
10 - 11	1338,63	18758,59
11 - 12	1420,82	19910,56
12 - 13		

*Nota:* Los valores de S(kJ/h) son dados del resultado de la columna S (kJ/m2h) multiplicada por 21 que es el área de recepción del colector.

### **Pérdidas de energía específicas**

El coeficiente de pérdidas de mayor importancia es el  $U_t$ . Este puede evaluarse de forma directa por medio de la fórmula de Klein, tomada del Duffie.

$$Ut = \left\{ \frac{N}{\frac{C}{T_{pm}} \left[ \frac{(T_{pm} - T_a)^e}{(N + f)} \right] + \frac{1}{hw}} \right\}^{-1} + \frac{\sigma * (T_{pm} + T_a)(T_{pm}^2 + T_a^2)}{(E_p + 0.00591N * hw)^{-1} + \frac{2N + f - 1 + 0.133 * E_p}{E_g} - N} \quad (\text{Ec. 31})$$

Donde:

$S = 10^\circ$  (ángulo de inclinación de la cubierta)

$W = 1.2$  m/s (velocidad del viento)

$E_g = 0.88$  (emitancia del vidrio)

$E_p = 0.95$  (emitancia de la placa absorbadora)

$N = 1$  (Número de cubiertas)

$T_{pm} = 90^\circ\text{C} = 363,15$  K (Temperatura de la cámara)

$T_a = 15^\circ\text{C} = 288,15$  K (Temperatura del aire ambiente)

$C = 6$  m<sup>3</sup>

$\sigma$ : Constante de Boltzmann

$\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$  W m<sup>-2</sup> K<sup>-4</sup>

$\sigma = 0,000000204$  kJ/m<sup>-2</sup> K<sup>-4</sup> h

$f = -0.497$  coeficiente

$hw$ : Coeficiente de transferencia de calor por convección del viento

$$hw = 5.7 + 3.8 * W \quad (\text{Ec. 32})$$

$$hw = 5.7 + 3.8 * 1.2 \text{ m/s}$$

$$hw = 10.26 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$hw = 36.93 \text{ kJ/m}^2\text{K}$$

$$e = 0.430 \left( 1 - \frac{100}{T_{pm}} \right) \quad (\text{Ec. 33})$$

$$e = 0.430 \left( 1 - \frac{100}{363,15} \right)$$

$$e = 0.312$$

Con todos estos valores remplazados en la (Ec. 31) de perdidas por cubierta

tenemos que:

$$Ut = \{0.1410\} + \frac{(2.04 \times 10^{-7})(652.1)(215370.025)}{(0.7975) + \frac{0.6293}{0.88} - 1}$$

$$Ut = \{0.4329\} + \frac{28.55}{0.5701}$$

$$Ut = 50.51 \text{ KJ/m}^2 \text{ hK}$$

#### **Determinación del coeficiente de pérdida por el fondo (Ub).**

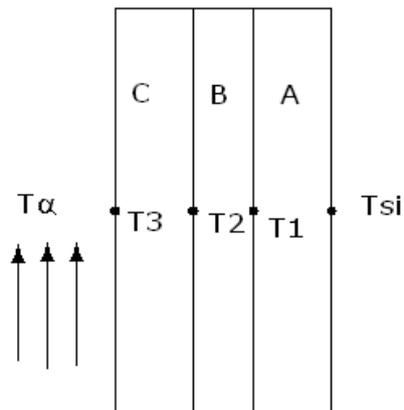
Las perdidas por el fondo en este caso se desprecian ya que las perdidas por conducción desde el fondo del secador hacia la tierra son mínimas asumiendo un valor de

$$Ub = 0$$

#### **Determinación del coeficiente de pérdidas laterales (Ue).**

#### **Figura 19**

*Esquema de la sección transversal de la pared del horno*



Donde:

Los materiales A y C corresponden a una pared de ladrillo con revestimiento de cemento y tenemos:

$K_a = K_c = 0,72 \text{ W/m K}$  (coeficiente de conductividad térmica del ladrillo)

$L_a = L_c = 0,08 \text{ m}$  (espesor de cada pared de Ladrillo)

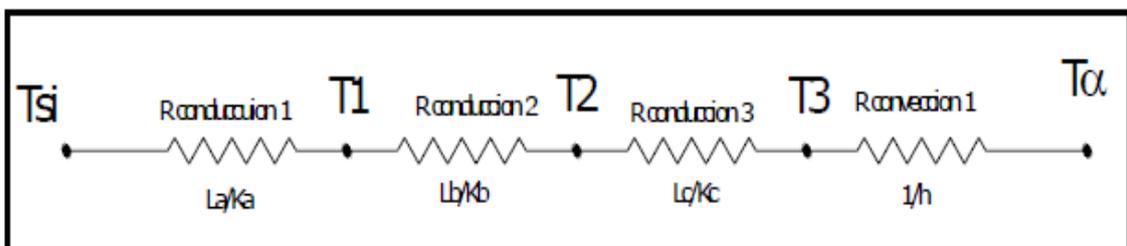
El material B corresponde a una pared de poliuretano:

$K_b = 0,0372 \text{ W/m K}$  (coeficiente de conductividad térmica del poliuretano)

$L_b = 0,07 \text{ m}$  (espesor del aislante lateral de Poliuretano)

**Figura 20**

*Circuito de resistencias*



$$RT = \frac{L_a}{K_a} + \frac{L_b}{K_b} + \frac{L_c}{K_c} + \frac{1}{h} \quad (\text{Ec. 34})$$

Donde:

$\frac{1}{h}$  : Resistencia térmica por convección

$\frac{La}{Ka}$  y  $\frac{Lc}{Kc}$  : Resistencias térmicas por conducción a través del ladrillo

$\frac{Lb}{Kb}$  : Resistencia térmica del Poliuretano

$$RT = \frac{0.08m}{0.72W/mK} + \frac{0.07m}{0.0372W/mK} + \frac{0.08m}{0.72W/mK} + \frac{1}{3.39 W/m^2K}$$

$$RT = 2.39 m^2K/W$$

### **Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección (h)**

Para calcular este coeficiente de transferencia empezamos calculando el número de Reynolds:

$$Re = \frac{V * L}{\nu} \quad (\text{Ec. 35})$$

Donde:

$V = 1.2 m / s$  (velocidad del fluido (aire))

$\nu = 14,85 \times 10^{-6} m^2 / s$  (coeficiente cinemático de viscosidad del fluido)

$L = 3m$  (longitud característica vertical para cada una de las paredes laterales del secador)

Reemplazamos los datos en la Ec.35

$$Re = \frac{1.2 m/s * 3m}{14,85 \times 10^{-6} m^2 / s}$$

$$Re = 242424$$

Con el valor del Reynolds y para valores de Prandtl mayores que 0,6 se escoge la ecuación del Nusselt (Nu).

$$Nu = 0.664 * Re^{1/2} * Pr^{1/3} \quad (\text{Ec. 36})$$

Donde:

Pr = 0,71 (número de Prandtl)

$$Nu = 0.664 * 242424^{0.5} * 0.71^{0.33}$$

$$Nu = 291.99$$

#### Resistencia térmica por convección

$$h = \frac{Nu * Kf}{L} \quad (\text{Ec. 37})$$

Donde:

Kf = 25,38x10<sup>-3</sup> W/mK (coeficiente de conductividad térmica del fluido)

$$h = \frac{291.99 * 25,38 \times 10^{-3} \text{ W/mK}}{3m}$$

$$h = 2.47 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$Ue = \frac{1}{Rt} \quad (\text{Ec. 38})$$

$$Ue = \frac{1}{2.39 \text{ m}^2\text{K/W}}$$

$$Ue = 0.41 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$Ue = 1.47 \text{ KJ/m}^2\text{hK}$$

La determinación de los valores de las pérdidas se relaciona con las que se tienen en la práctica, donde las perdidas por cubierta son las mayores y las perdidas por el piso y laterales las menores.

### **Determinación del coeficiente total de pérdidas (U).**

Uno de los factores que más influyen en la eficiencia del colector es el coeficiente total de pérdidas UL, el cálculo de este coeficiente se realiza por medio de un proceso iterativo, basado en la teoría de la transferencia de calor por conducción, convección y radiación.

Este coeficiente total de pérdida está determinado por la suma de tres coeficientes:

- Ut coeficiente de pérdida por la cubierta.
- Ub coeficiente de pérdidas por fondo
- Ue coeficiente reducido de pérdidas laterales.

$$U_l = U_t + U_e + U_b \quad (\text{Ec. 39})$$

Donde:

$$U_t = 50.51 \text{ KJ/m}^2 \text{ hK}$$

$$U_e = 1.47 \text{ KJ/m}^2 \text{ hK}$$

$$U_b = 0 \text{ kJ/m}^2 \text{ h K}$$

Reemplazamos en la Ec. 40

$$U_l = (50.51 + 1.47 + 0) \text{ KJ/m}^2 \text{ hK}$$

$$U_l = 51.98 \text{ KJ/m}^2 \text{ hK}$$

### **Cálculo del flujo de aire**

**Determinación del flujo de aire que puede calentar el secador en condiciones medias diarias (m).**

Sabiendo que:

$$U_l = 51.98 \text{ kJ/m}^2 \text{ hK}$$

$$C_p = 1,0079 \text{ kJ/Kg K (calor específico del aire)}$$

$$T_f = 45 \text{ °C} = 318.15 \text{ °K}$$

$$T_a = 15 \text{ °C} = 288.15 \text{ °K}$$

$$T_{ma} = 41.36 \text{ °C} = 314.51 \text{ °K (Variación de } T_f)$$

$$S = 76492.59 \text{ kJ/m}^2 \text{ h K}$$

$$F' = 1 \text{ (factor de eficiencia del colector)}$$

$$\text{Área del secador solar (Ac): } 14 \text{ m}^2: (4 \times 3.5)$$

Entonces:

$$U = \frac{S - U_l * (T_f - T_a)}{[S - U_l * (T_f - T_a) - (U_l * F' * (T_f - T_a))]} \quad (\text{Ec. 40})$$

$$U = \frac{76492.59 - 51.98 * (318.15 - 288.15)}{[76492.59 - 51.98 * (318.15 - 288.15) - (51.98 * 1 * (318.15 - 288.15))]}$$

$$U = \frac{74933.19}{[73373.79]}$$

$$U = 1.021$$

$$\ln U = 0.020$$

$$m = \frac{U_l * F' * A_c}{C_p * \ln U} \quad (\text{Ec. 41})$$

$$m = \frac{51.98 * 1 * 14}{1,0079 * (0.0246)}$$

$$m = 2935 \text{ kg/h}$$

$m = 2935$  kg / h de aire pueden recircularse como término medio y expulsarse en forma regulada para garantizar el secado en el día (durante las horas diurnas).

**Determinación del factor de remoción del calor (Fr).**

$$Fr = \left\{ \left[ \frac{m * Cp}{Ac * UL} \right] * \left[ 1 - e^{-\left( \frac{UL * F' * Ac}{m * Cp} \right)} \right] \right\} \quad (\text{Ec. 42})$$

$$Fr = \left\{ \left[ \frac{2935 * 1,0079}{14 * 51.98} \right] * \left[ 1 - e^{-\left( \frac{51.98 * 1 * 14}{2935 * 1.0079} \right)} \right] \right\}$$

$$Fr = 0.886$$

**Parámetros globales. Energía Ganada y Eficiencia.**

**Determinación de la Energía Total horaria ganada por el calentador solar**

(Qu).

$$Qu = Ac * Fr * [S - UL * (Tf - Tma)] \quad (\text{Ec. 43})$$

Y los valores de S fueron tomados de la tabla 25 en donde se muestran los valores horarios de S por m<sup>2</sup> y totales obteniendo así:

**Tabla 17**

*Valores del calor Útil*

Horas del día	S (kJ/m2h)	Qu (KJ/h)
6 -7	174,36	0
17-18		
7 - 8	510,24	3955,12
16 - 17		

8 - 9	862,60	8296,20
15 - 16		
9 - 10	1151,73	11858,28
14 - 15		
10 - 11	1338,63	14160,89
13 - 14		
11 - 12	1420,82	15173,47
12 - 13		

### Cálculo de la Eficiencia diaria del secador solar ( $\eta$ ).

La eficiencia diaria se calcula como la relación entre la energía total ganada por el secador y la energía total de la radiación solar incidente y toma la forma siguiente:

$$\eta_{\text{dia}} = \frac{\Sigma Q_u}{Ac \Sigma H T} \quad (\text{Ec. 44})$$

$$\eta_{\text{dia}} = \frac{53443.96}{14 * 7124,53}$$

$$\eta_{\text{dia}} = 0.53$$

### Tiempo de secado

El tiempo medio de secado con aire caliente depende fundamentalmente del espesor de las tablas, del contenido de humedad inicial y del tipo de madera. Considerando los aspectos anteriores, para el eucalipto se selecciona un tiempo de secado:

$$T = \frac{Q_n}{2 \Sigma Q_u} \quad (\text{Ec. 45})$$

Donde:

$Q_n$ : Energía necesaria para los  $6\text{m}^3$

$$Q_n = Q * V_m \quad (\text{Ec. 46})$$

$Q_n = 454023.12 \text{ kJ/m}^3$  de madera (Calor total necesario resultado de la ecuación 9)

$V_m = \text{Volumen de la madera (6m}^3\text{)}$

Estos valores reemplazamos en la Ec. 46.

$$Q_n = 454023.12 \text{ kJ/m}^3 * 6\text{m}^3$$

$$Q_n = 2724138.72 \text{ KJ}$$

Los valores obtenidos reemplazamos en la ecuación 45.

$$T = \frac{2724138.72 \text{ KJ}}{2 * 53443.96 \text{ KJ/día}}$$

$$T = 25.48 \text{ días} \cong 25 \text{ días}$$

### **Selección de los ventiladores para el secado de la madera.**

Los ventiladores para mover flujos de aire, que se usan en varios procesos de secado, en este caso el secado a bajas temperaturas. Los costos de instalación mantenimiento y funcionamiento de estos dispositivos se tornan cada día son más elevados. Es indispensable elegir y aplicar el mejor equipo para el movimiento de aire, teniendo en cuenta el ahorro de costos y selección de factores técnicos.

Los ventiladores son máquinas de rotación capaces de mover determinadas masas de aire, también se define como una máquina que transmite energía para generar la presión necesaria con la que se debe mantener un flujo continuo de aire (S&P, 2016).

Los ventiladores se clasifican en dos categorías generales:

- a) Ventiladores Axiales
- b) Ventiladores Centrífugos

Ventiladores Axiales: Llamados también helicoidales porque el flujo a la salida tiene una trayectoria con forma helicoidal. Estos ventiladores son diseñados para mover grandes caudales a bajas presiones.

Ventiladores Centrífugos: Generalmente adecuados para aplicaciones en las que se requiere un caudal relativamente bajo y una elevada presión.

Para poder seleccionar el tipo de ventilador es necesario conocer los siguientes aspectos técnicos.

- a) Cantidad de humedad a evaporar
- b) Cantidad específica de aire
- c) Cantidad de aire necesaria

Para evitar un secado muy rápido debe evitarse velocidades de aire excesivas, ya que esto conlleva a un secado solamente exterior de la capa de la madera mientras que el interior permanece húmedo y con ello se produce rajaduras, grietas y deformaciones indeseadas en la madera.

**Cantidad de humedad a evaporar diariamente por metros<sup>3</sup> de madera.**

$$W1 = \frac{Wt}{T} \quad (\text{Ec. 47})$$

Usando los valores de Wt de la Ec. 7 y T de la Ec. 45, reemplazamos.

$$W1 = \frac{142.64}{25.48}$$

$$W1 = 5.59 \text{ kg de humedad / metro}^3 \text{ de madera}$$

**Cantidad específica del aire.**

$$l = \frac{1}{Xf - Xo} \quad (\text{Ec. 48})$$

Donde:

Xo: Humedad inicial específica del aire dada en la Ec. 5

Xf: Humedad final específica del aire dada con la Ec. 5 con temperatura final.

$$l = \frac{1}{(0,0612 - 0,0100) \text{ kg. de humedad / kg. de aire seco.}}$$

$$l = 19.53 \text{ kg. de aire seco/kg. de humedad}$$

**Cantidad de aire necesario cada día por m<sup>3</sup> de madera.**

$$L = l * Wl \quad (\text{Ec. 49})$$

Donde:

l: Cantidad específica del aire.

Wl: Cantidad de humedad a evaporar diariamente por metros<sup>3</sup> de madera

$$L = 19.53 * 5.59$$

$$L = 109.17 \text{ kg de aire / m}^3 \text{ de madera}$$

**Cantidad de aire total para secar 6m<sup>3</sup> de madera**

$$Lt = L * Vm \quad (\text{Ec. 50})$$

$$Lt = (109.17 \text{ kg de aire / m}^3 \text{ de madera}) * (6\text{m}^3)$$

$$Lt = 655.02 \text{ Kg de aire/día}$$

### Caudal total de aire diario

$$Qa = \frac{Lt}{P} \quad (\text{Ec. 51})$$

Donde:

Lt: Cantidad de aire total para secar 6m<sup>3</sup> de madera Ec. 51

P: Densidad del aire

$$Qa = \frac{655.02 \text{ Kg de aire}}{1.22 \text{ Kg/m}^3}$$

$$Qa = 536.90 \text{ m}^3 \text{ de aire}$$

Se van a utilizar dos ventiladores el caudal total de aire se divide para dos y tenemos:

$$Qav = 268.45 \text{ m}^3 \text{ de aire/min}$$

La velocidad del flujo de aire debe estar entre 0.8 a 0.12 m/s, la cual debe pasar en un tiempo mayor que el que se ha estimado en un minuto y medio según Griñan (2001).

$$Qan = 178.96 \text{ m}^3 \text{ de aire/min}$$

Con este caudal seleccionamos dos ventiladores para garantizar la circulación del aire caliente el cual circulara a través de la madera apilada dentro de la cámara de secado.

Ver hoja de especificaciones técnicas en anexo 2.

Marca: BOOST

Modelo: BST600

Diámetro del ventilador: 500 mm

Flujo de salida:  $5700 \text{ m}^3/\text{h} = 95 \text{ m}^3/\text{min}$  (Es el que más se aproxima al flujo que se necesita)

Rpm: 1400

Voltaje: 110 V

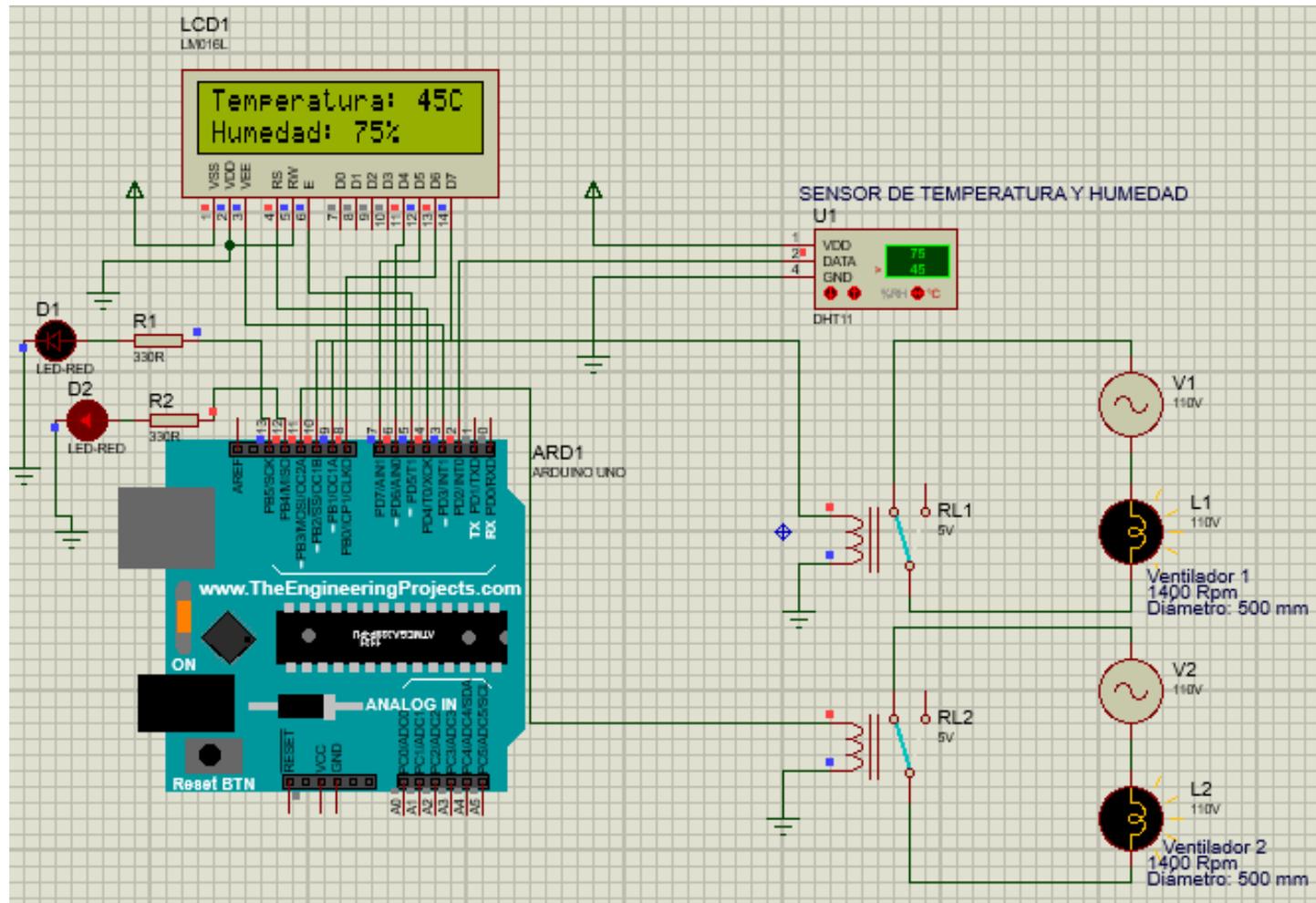
Potencia de entrada en Wats: 370

### **Control automatizado de humedad y temperatura.**

Para llevar el control automatizado del horno de secado, se cuenta con un medidor de temperatura y de humedad relativa, este dispositivo nos permite controlar los rangos de temperatura y humedad de esta manera permitirá llevar un registro de las condiciones que se presentan en el interior del secador durante la permanencia del proceso.

Figura 21

Simulación en Software Proteus



### **Lista de Componentes para Circuito**

En la siguiente tabla se puede apreciar la lista de componentes que intervienen en el circuito de automatización.

**Tabla 18**

*Lista de Componentes para Circuito*

<b>Descripción</b>	<b>Código</b>	<b>Cant.</b>
LCD 1 16 x 2	LMO16L	1
Sensor de Temperatura y Humedad	DHT11	1
Resistencia 330 Ohms	R1; R2	1
LED RED	D1; D2	2
Arduino Uno	ARD1	1
Relé 5V	RL1; RL2	2
Ventilador Boost 1400 RPM	L1; L2	2
Fuente de energía 110V	V1; V2	2

### **LCD 16 x 2**

Es un dispositivo con pantalla de cristal líquido que cuenta con dos filas, de dieciséis caracteres cada una, las cuales muestran información generalmente alfanumérica.

**Figura 22**

*Pantalla LCD 16x2*



*Nota:* Las pantallas de cristal líquido LCD 16x2 (display LCD 2x16). Adaptada de la página web TECmikro.

### **Sensor de Temperatura y Humedad DHT11**

Se utilizará este tipo de sensor ya que los resultados del cálculo termodinámico indican que la temperatura a la que se van accionar los ventiladores es de 45 °C y la humedad relativa que debe permanecer dentro de la cámara de secado es de 70%, este tipo de dispositivo electrónico tiene un rango de funcionamiento de humedad 20-90% HR; temperatura 0 ~ 50 Celsius.

### **Figura 23**

*Sensor DHT11*



**DHT22**

- 1: VCC
- 2: SDA
- 3: NC
- 4: GND



## Hoja de Datos Técnicos Sensor DHT11

**Tabla 19**

*Hoja de Datos Técnicos Sensor DHT11*

Ítem	Descripción
Modelo	DHT11
Fuente de alimentación	3.3-5V DC
Señal de salida	Señal digital a través de bus único
Elemento sensor	Condensador de polímero
Rango de funcionamiento	humedad 20-90% HR; temperatura 0 ~ 50 Celsius
Precisión	humedad + -2% HR (Máx. +- 5% HR); temperatura < +- 2Celsius
Resolución o sensibilidad	humedad 1% HR; temperatura 1 Celsius
Repetibilidad	humedad 1% HR; temperatura 1 Celsius
Período de detección Promedio	6s
Intercambiabilidad	totalmente intercambiable
Dimensiones	tamaño pequeño 12 * 15 * 5.5 mm

*Nota:* Hoja de Datos Técnicos Sensor DHT11 donde se puede apreciar los rangos de funcionamiento los cuales son apropiados para el control de temperatura y humedad dentro de la cámara de secado. Adaptada de la página web Código Electrónica.

### **Resistencia 330 Ohm**

Las resistencias son los dispositivos más utilizados en electrónica. Son utilizados en gran cantidad de proyectos, ya sea para limitar la corriente en un LED, como divisor de voltaje, para disipar potencia en circuitos eléctricos (Componentes, 2021).

**Figura 24**

*Resistencia 330 Ohm*



### **LED RED**

Los LED, son diodos que tienen una propiedad especial que les permite encenderse cuando se le da suficiente corriente al voltaje correcto. Estos LED rojos de 5 mm de diámetro son ideales para cualquier proyecto en el que necesite indicadores LED por cualquier motivo (depuración, notificación, control de frecuencia, etc.).

### **Figura 25**

*LED rojo 5mm*



### **Arduino Uno**

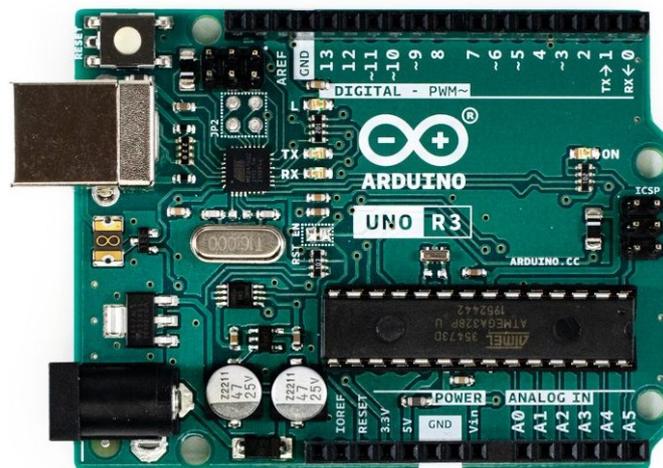
Es una placa de desarrollo programable que permite de forma práctica y sencilla introducirte al mundo de la electrónica y programación en Arduino IDE. Tiene 14 pines de entrada / salida digital (de los cuales 6 se pueden usar como salidas PWM), 6 entradas

analógicas, un resonador cerámico de 16 MHz. Es utilizada para realizar todo tipo de prototipos, ya que puede ser programable para cumplir diferentes tareas o procesos que se le definan. ya sea recopilar información de sensores digitales y analógicos además de poder controlar diferentes dispositivos como leds, motores, actuadores y más (ELECTRONICS, 2021).

Se selecciono este dispositivo electrónico ya que tiene un software libre que no necesita licencia, y cuenta con la cantidad de pines necesarios para el circuito de control automático de secado de madera, además de los benéficos de fácil programación, también por su gran stock en el mercado y su economía accesible para proyectos académicos.

### Figura 26

*Arduino Uno Rev3*



### Relé 5 V.

El Relé 5V DC es un interruptor cuyo control camina por cuenta de un circuito eléctrico, a través de una bobina y un electroimán este incide sobre diversos contactos

para la apertura o el cierre de otros circuitos, que funcionan de manera independiente (ELECTRONICS, 2021).

### **Figura 27**

*Relevador 5V DC*



*Nota:* Relevador 5V DC, pueden controlar de manera aislada voltajes y corrientes alternos o directos, relativamente altos.

### **Ventilador Boost**

El ventilador de escape BOOST es ampliamente utilizado en industria de ventilación y refrigeración. Uno de sus usos es en talleres de fábrica.

### **Figura 28**

*Ventilador Boost 500 mm.*

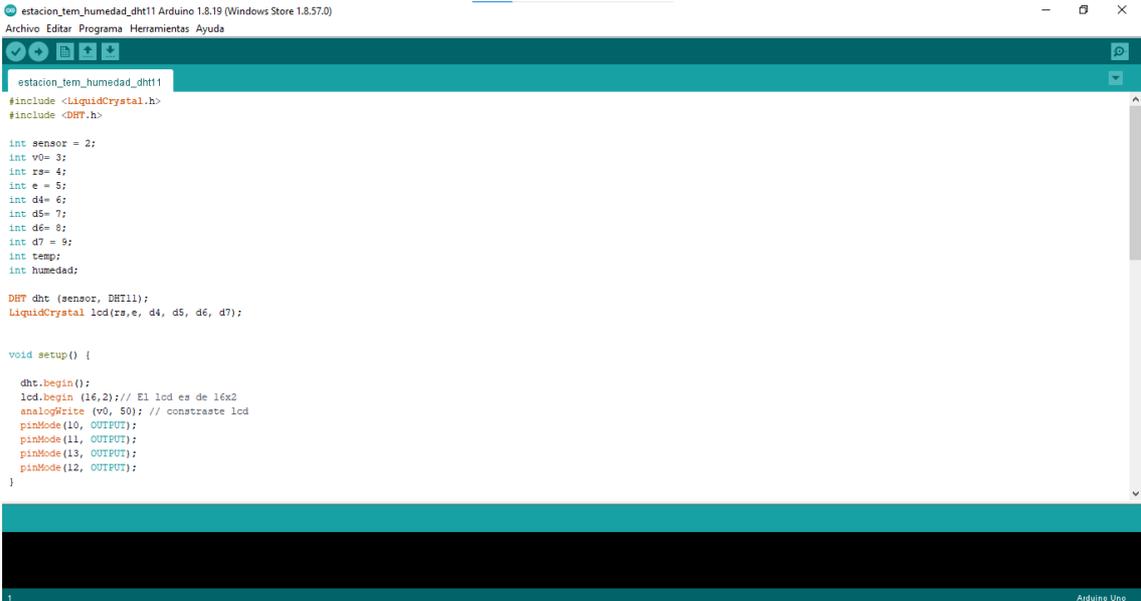


## Programación de Arduino

El software Arduino de código abierto (IDE) proporciona de manera fácil y sencilla la escritura de código y la carga en la placa. Este software se puede utilizar con cualquier placa Arduino (ARDUINO, 2022).

### Figura 29

#### Programación en Software Arduino



```
estacion_tem_humedad_dht11 Arduino 1.8.19 (Windows Store 1.8.57.0)
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

estacion_tem_humedad_dht11
#include <LiquidCrystal.h>
#include <DHT.h>

int sensor = 2;
int v0= 3;
int rs= 4;
int e = 5;
int d4= 6;
int d5= 7;
int d6= 8;
int d7 = 9;
int temp;
int humedad;

DHT dht (sensor, DHT11);
LiquidCrystal lcd(rs,e, d4, d5, d6, d7);

void setup() {

  dht.begin();
  lcd.begin (16,2);// El lcd es de 16x2
  analogWrite (v0, 50); // contraste lcd
  pinMode(10, OUTPUT);
  pinMode(11, OUTPUT);
  pinMode(13, OUTPUT);
  pinMode(12, OUTPUT);
}

}

Arduino Uno
```

#### Codificación en Software Arduino

```
#include <LiquidCrystal.h>
```

```
#include <DHT.h>
```

```
int sensor = 2;
```

```
int v0= 3;
```

```
int rs= 4;
```

```
int e = 5;
```

```
int d4= 6;
```

```
int d5= 7;
```

```

int d6= 8;
int d7 = 9;
int temp;
int humedad;

DHT dht (sensor, DHT11);
LiquidCrystal lcd(rs,e, d4, d5, d6, d7);

void setup() {

    dht.begin();
    lcd.begin (16,2);// El lcd es de 16x2
    analogWrite (v0, 50); // constraste lcd
    pinMode(10, OUTPUT);
    pinMode(11, OUTPUT);
    pinMode(13, OUTPUT);
    pinMode(12, OUTPUT);
}

void loop() {

    temp =dht.readTemperature();
    humedad =dht.readHumidity();

    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Temperatura: ");
    lcd.print(temp);

```

```
lcd.print("C");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("Humedad: ");
lcd.print(humedad);
lcd.print("%");

delay (500);
if(temp>=30){
    digitalWrite(10, HIGH);
    digitalWrite(11, HIGH);
}
else{
    digitalWrite(10, LOW);
    digitalWrite(11, LOW);
}
if(humedad<=65){
    digitalWrite(13, HIGH);

}
else{
    digitalWrite(13, LOW);

}
if(humedad>=75){
    digitalWrite(12, HIGH);

}
else{
```

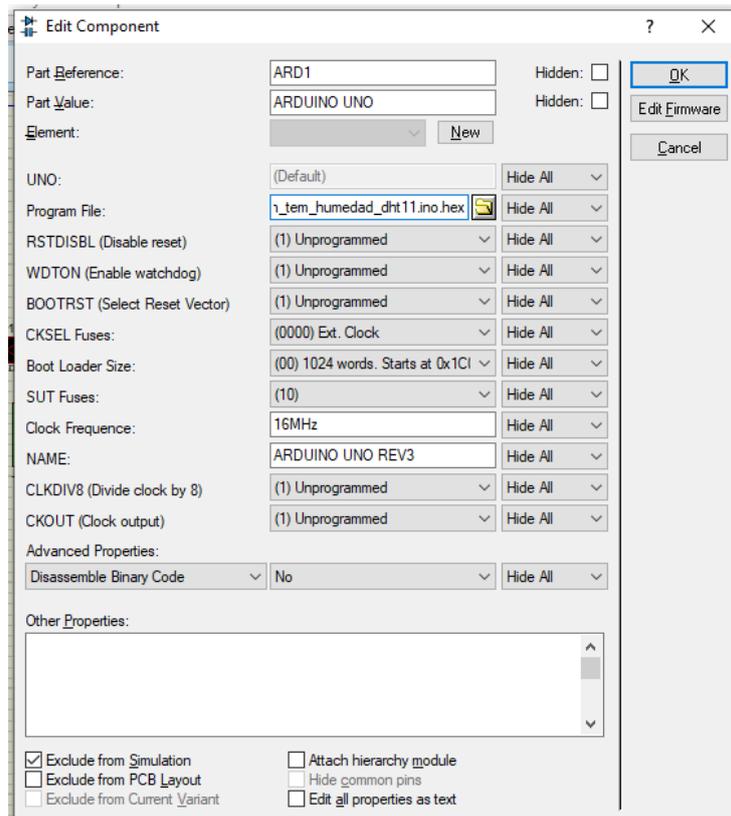
```
digitalWrite(12, LOW);  
  
}  
}
```

### **Importación de codificación a Software Proteus**

Una vez ingresada la codificación respectiva para el funcionamiento de la placa arduino, compilamos la codificación para obtener el archivo “hex” y copiamos la dirección para pegarla en la información de la placa Arduino, y de esta manera se puede verificar hacer correr la simulación y verificar el funcionamiento del circuito en el Software Proteus.

### **Figura 30**

*Importación de codificación a placa Arduino*



*Nota:* En la opción Program file se pega la dirección hex obtenida del software Arduino.

### **Descripción de funcionamiento de Circuito para Horno de Secado de Madera.**

Una vez importada la programación del software Arduino al Software Proteus, se hace correr la simulación para verificar el funcionamiento del Circuito como se puede observar en la figura 19.

La placa de Arduino, el Sensor DHT11 y la pantalla LCD, son sus componentes principales. El sensor DHT11 consta de 3 puntos, donde: el primero es para subir de nivel, el segundo para bajar de nivel y el tercero para cambiar la opción de humedad a temperatura y viceversa, estos datos son mostrados en la pantalla LCD. Mientras la temperatura se encuentra bajo los 45 °C, los ventiladores L1 y L2 no se activarán, y si la temperatura es => 45 °C, la programación en la placa Arduino activara automáticamente

las bobinas de 5 V; activando así los contactores RL1 y RL2 cerrando de esta manera la conexión de la fuente de energía de 110 V con los contactos de los ventiladores para que empiecen a funcionar y permanezcan activados mientras la temperatura no baje de 45 °C.

De la misma manera el Sensor DHT11, da las lecturas de humedad y son transmitidas a la pantalla LCD, mientras la humedad relativa se encuentre en el rango de 65 a 75, la placa arduino no enviara ninguna señal, y si la humedad baja del 65% el pin 13 de la placa arduino envía la señal que pasa por la resistencia de 330 ohm, a un led de color rojo la cual será una señal de alerta para que las ventilas sean cerradas y así nuevamente la humedad aumente hasta el rango especificado. Y si la humedad sobrepasa el 75% de igual manera gracias a la programación que se encuentra en el arduino el pin 13 enviara una señal que pasa por una resistencia de 330 ohm, y activara un led rojo que será una señal de alerta que significa que la humedad es muy alta y se deben abrir las ventilas para que la humedad disminuya y permanezca en el rango establecido.

El funcionamiento del circuito y la automatización del secado de madera en el horno será permanente las 24 horas del día, durante todo el proceso de secado y la activación de ventiladores y ventilas dependerá directamente de las condiciones de temperatura y humedad que emita el sensor, por lo general los ventiladores se activaran en la mañana cuando se alcance los 45 °C y se desactivaran automáticamente por la tarde cuando esta temperatura disminuya bajo los 45 °C. Mientras que las señales de alerta de los rangos de humedad se activarán constantemente ya que en la noche las ventilas quedan cerradas y la humedad aumenta, por la mañana se debe verificar la pantalla LCD para verificar si la cámara se encuentra con la humedad apropiada de lo contrario se debe abrir las ventilas hasta que la humedad relativa se establezca en el rango configurado.

## Resultados Esperados

En la tabla 20 se observa los resultados de tiempo de secado de madera en el horno solar, tomando en cuenta que para el cálculo termodinámico se considera el mes y el día con menos radiación solar entre el año 2020 y primer semestre de 2021 para que el tiempo de secado sea más exacto con respecto a la radiación solar, ya que los datos atmosféricos son variables en diferentes épocas del año, en el cálculo se considera una variación en la temperatura final para determinar la Energía Total horaria ganada por el calentador solar, se puede observar que la humedad menor alcanzada al cabo de 30 días es de 30%, mediante el cálculo termodinámico se determina que el tiempo de secado en el horno solar con las condiciones climáticas del Valle de Los Chillos es de 25 días para alcanzar una humedad del 12%. El diseño de la línea de secado empieza desde el pre secado al aire para bajar la humedad al 30% este proceso toma 30 días, a esto se le suma los 25 días del secado al horno dando como resultado 55 días de todo el proceso.

**Tabla 20**

*Registro de tiempo estimado de secado de madera en horno solar.*

# Meses	% CH	Duración de proceso (días)
1	30	30
2	12	25
Total:		55

Nota. El primer mes dura 30 días de secado natural, el segundo mes se refiere al secado en horno con una duración de 25 días.

Mediante el análisis de registro en tablas podremos determinar el nuevo tiempo que se obtiene en el proceso del secado artificial de madera con un sistema de automatización que controla los parámetros de temperatura y humedad.

El tiempo estándar establecido por la empresa para el secado de madera de forma natural era aproximadamente de seis meses. En la tabla 20 se observa que el nuevo tiempo de duración para el proceso de secado de madera mediante un horno solar se ajusta a 55 días, gracias al secado artificial tomando en cuenta los resultados de los cálculos termodinámicos que determina el tiempo apropiado para obtener un contenido de humedad ideal para que la madera pueda ser trabajada, contribuyendo así a mejorar el sistema productivo de la Empresa Maderas Pachacama.

## **Análisis de Costos**

### **Costos de Construcción Horno Solar**

En la tabla 30 se observa a detalle los costos de los componentes que intervienen en la construcción de un Horno Solar incluyendo mano de obra, de construcción ver en anexos las proformas de varios materiales.

**Tabla 21**

*Costos de Construcción para Horno Solar*

CANT.	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO	TOTAL
3200	Ladrillos	0,20	640,00
1	Cimiento para base de horno	120,00	120,00
15	Metro cuadrado de vidrio templado incoloro, de 8 mm de espesor	36,29	544,35
2	Cartucho de silicona sintética incolora de 310 ml	4,81	9,62

5	Tubo rectangular 30 x 40 x 3 (mm)	45,45	227,25
5	Tool lizo 3mm	114,49	572,45
1	Puerta metálica abatible horizontal de 2 piezas	520,00	520,00
4	Plancha de Policarbonato 6mm (6m de largo X 2,10m ancho)	138,05	552,20
1	Herramientas menores	100,00	100,00
2	Mano de Obra Albañilería, Cristalería, Estructura Metálica	450,00	900,00
Total, Costos			4185,87

*Nota:* Se observa que en la mano de obra para la construcción del horno solar tendrá un costo de \$900,00 donde intervienen 2 operadores, el tiempo de construcción es de 15 días y cada operador gana \$30 diarios. Ver anexo 3 proforma de varios materiales.

### **Costos de Automatización**

Para la implementación en un proceso productivo hay que tomar en cuenta los dispositivos electrónicos ya que son muy importantes para controlar las diferentes variables y su costo es vital para hacer una buena elección, la tabla 31 muestra los valores referenciales del costo de los materiales e instrumentos para la implementación del sistema automático para el horno solar.

**Tabla 22**

#### *Lista de Costos de Materiales de Sistema Automático*

Cant.	Descripción	Precio Unitario	Precio Total
1	LCD 16 x 2	3,80	3,80
1	Sensor de Temperatura y Humedad DHT11	3,49	3,49
1	Resistencia 330 Ohms	1,00	1,00

2	LED RED	1,00	2,00
1	Arduino Uno	29,99	29,99
2	Relé 5V	2,74	5,48
2	Ventilador Boost 1400 RPM	169,00	338,00
1	Cableado	80,00	80,00
1	Herramientas menores	100,00	100,00
1	Ingeniería de automatización	300,00	300,00
1	Ingeniería de implementación	400,00	400,00
Total, Costos			1263,76

Realizado el análisis de costos de construcción del Horno Solar y costos de materiales para la implementación del sistema automático podemos señalar el costo total.

#### **Costo total de construcción y automatización de horno solar**

$$\begin{aligned}
 \text{Costo total} &= \text{Costo de Construcción} && \text{(Ec. 52)} \\
 &+ \text{Costo de automatixzacion} \\
 \text{Costo total} &= \$4185,87 + \$1263,76 = \$5449,63
 \end{aligned}$$

#### **Derecho Laboral Ecuador**

A continuación, se indica el sueldo de los artesanos calificados según el código de trabajo.

Quedan exonerados del pago de la participación en las utilidades los artesanos respecto de sus operarios y aprendices.

Quedan exonerados del pago de la decimotercera y decimocuarta remuneración respecto de sus operarios y aprendices (Ecuador, 2020).

El Código del Trabajo y la Ley de Defensa del Artesano excluyen a este grupo laboral de tomar algunos beneficios laborales como: décima tercera y cuarta remuneración, porcentaje de utilidades y fondos de reserva (Carrasco, 2020).

En la figura 31 se observa los sueldos y salarios mínimos de diferentes actividades artesanales con relación a la silvicultura y extracción de madera con actividades similares.

**Figura 31**

*Sueldos y Salarios Mínimos Sectoriales 2022*

RAMA DE ACTIVIDAD ECONÓMICA:		5.- SILVICULTURA, EXTRACCIÓN DE MADERA Y ACTIVIDADES DE TIPO SERVICIO CONEXAS		
CARGO / ACTIVIDAD	ESTRUCTURA OCUPACIONAL	COMENTARIOS / DETALLES DEL CARGO O ACTIVIDAD	CÓDIGO IESS	SALARIO MÍNIMO SECTORIAL 2022
JEFE FORESTAL	B1	ÁREA DE MANEJO FORESTAL	0101020010006	437,52
JEFE DE OPERACIÓN	B2	ÁREA DE APROVECHAMIENTO	0101020010008	436,25
JEFE MANTENIMIENTO	C1	ÁREA DE MANTENIMIENTO	0101020010011	433,71
OPERADOR DE MÁQUINA	C1	ÁREA DE APROVECHAMIENTO	0101020010012	433,71
JEFE DE CAMPO	C2	ÁREA DE MANEJO FORESTAL	0101020010013	432,44
VIVERISTA AGROFORESTAL	C2	ÁREA DE MANEJO FORESTAL	0101020010015	432,44
OPERADOR DE MOTOSIERRA	C2	ÁREA DE APROVECHAMIENTO	0101020010016	432,44
JEFE DE CAMPAMENTO	E1	ÁREA DE APROVECHAMIENTO	0101020010023	427,34
AUXILIAR DE MANTENIMIENTO	E2	ÁREA DE MANTENIMIENTO	0101020010024	426,49
TRABAJADOR DEL AGRO	E2	ÁREA DE MANEJO FORESTAL	0101020010025	426,49
MATERO	E2	ÁREA DE MANEJO FORESTAL	0101020010026	426,49
AUXILIAR DE OPERADOR	E2	ÁREA DE APROVECHAMIENTO	0101020010027	426,49

*Nota.* El sueldo de operador de maquina en el área de aprovechamiento forestal es de \$ 433.71. Adaptada de Ministerio de Trabajo. Salarios Mínimos Sectoriales 2022. [https://www.trabajo.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2022/01/3.-SMS-2022-\\_Rev-\\_21\\_dic\\_-FINAL.pdf](https://www.trabajo.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2022/01/3.-SMS-2022-_Rev-_21_dic_-FINAL.pdf)

**Tabla 23**

*Costo Mano de Obra de Operarios*

RUBRO\EMPLEADO	Operario
Salario Mínimo Vital (2022)	425,0

Sueldo	433.71
IESS Patronal (11.15%)	89.34
13	0,0
14	0,0
FR (Fondos de Reserva)	0.0
Vacaciones	18.07
Desahucio	9.04
TRANSPORTE	0,0
Total, Mensual	550.16
Incremento	26.85%
Personal	2,0
<hr/>	
Total	1100.32
<hr/>	

Nota. El Costo de Mano de Obra mensual para los artesanos que se dedican a la extracción de madera con actividades de tipo servicio conexas es de \$ 433.71 más beneficios de ley dando un resultado de \$ 550.16

**Tabla 24**

*Costos de Operación en el Proceso de Secado de madera al horno que parte desde el pre secado.*

Cant.	Descripción	Valor Unitario	Costo Total
66	Hora de trabajo Operador Principal	3.43	226.38
16	Hora de trabajo Operador Secundario	3.43	54.88
1	Consumo de energía (25 días)	20	20
Total, Costos			\$ 301.26

Nota. El valor unitario de hora de operario es el resultado del Costo de Mano de Obra más beneficios de ley (\$550.16), mensual dividido para las 160 horas laborales al mes.

En la tabla 24 se observa la cantidad de horas trabajadas del operador principal donde 8 horas laborales son para armar y desarmar la parrilla de tablas del pre secado, otro día de 8 para embarcar y desembarcar las tablas del horno. Para la inspección diaria en la mañana, la tarde y la toma de muestra será de dos horas que se multiplica por 25 días de secado al horno dando 50 horas, dando como resultado 66 horas de trabajo del operador principal.

Mientras que el segundo operario trabaja acorde con el operario principal en las funciones de embarque y desembarque dando como resultado 16 horas de trabajo.

El consumo mensual de energía es de \$20 ya que los implemento que más consumen energía son los ventiladores el KWH en el ecuador es de \$0.10 estos aparatos consumen 370 watts por hora, usamos 2 ventiladores y se tendrá un consumo de 740 watts por hora, esto multiplicamos por 8 horas diarias promedio de funcionamiento diario y multiplicado por 25 días de operación de horno da un resultado de 148000 watts de consumo transformamos a Kilowatts y multiplicamos por el precio del watts y tendremos un consumo de \$14.80 a los 25 días de consumo esto lo redondeamos a \$15,00 de consumo más otros implementos de circuito eléctrico que se considera un gasto de \$ 5.00 dando un consumo de \$20.00 en el proceso de secado al horno.

### **Análisis Costo Beneficio**

El tiempo necesario para secar las tablas de eucalipto mediante el horno solar es de 55 días incluyendo el pre secado que es muy importante, en el capítulo 2 se observó que la empresa tenía un tiempo estándar de secado de 6 meses (180 días), alcanzando un contenido de humedad del 20% por lo que se observa una reducción considerable en el

factor tiempo, de estos datos obtendremos la reducción porcentual en el tiempo de proceso.

### **Análisis de costos secado al aire**

Para el armado y desarmado de parilla en el secado al aire, se requiere de dos operarios con 8 horas laborales cada uno, sumando 16 horas de trabajo.

El costo de uso de espacio es el costo de arriendo en metros cuadrados. El arriendo de todo el terreno de 1000 m<sup>2</sup> es de \$500, el espacio que se ocupa para el horno es de 25 m<sup>2</sup>, y se multiplica por \$0.50 dando un resultado de \$12.50, esto se multiplica por 6 meses dando un resultado de \$75.00.

**Tabla 25**

*Costos en el secado al aire*

Cant.	Descripción	Valor Unitario	Valor Total
16	Horas de trabajo	3.43	54.88
6	Costo de espacio en m <sup>2</sup> en meses	12.50	75
500	Tabla fresca	1.50	750
Total			879.88

La venta de la tabla seca al aire genera \$1500.00 a esto se le resta los costos de horas de trabajo y costo de espacio de terreno que y costo de madera fresca que nos da \$879.00, dando un resultado de \$620.12 que es la ganancia generada en ese tiempo.

### **Análisis de costos secado al horno**

En este análisis interviene el costo de depreciación que se calcula con el costo total del horno \$5449,63 se estima una depreciación a 10 años dando como resultado \$544.96 por año, se le divide para 12 meses que tiene el año, dando un resultado de \$45.41, de depreciación por mes. En este caso el proceso de secado al horno dura aproximadamente 1 mes.

**Tabla 26**

*Costos en el secado al horno*

Cant.	Descripción	Valor Unitario	Valor Total
1	Costo de operación	301.26	301.26
2	Costo de espacio en m <sup>2</sup> en meses secado natural	12.50	25
500	Tabla fresca	1.50	750
1	Costo de depreciación	45.41	45.41
Total			1121.67

El costo de la tabla seca en horno es de \$3.50 generando una venta de \$1750.00, en 55 días de proceso es decir la ganancia que se generaba en 180 días se la podría generar en menos tiempo.

**Tabla 27**

*Tabla comparativa de costos en Secado al aire y Secado al horno*

Tipo de secado	Costos	Valor \$	Meses
Secado al aire	Costo de operación	54.88	6

	Costo de espacio en m <sup>2</sup> en meses secado natural	75	
	Tabla fresca	750	
Total		879.88	
Secado al horno	Costo de operación	301.26	
	Costo de operación	25	
	Costo de espacio en m <sup>2</sup> en meses secado natural	750	2
	Tabla fresca	45.41	
Total		1121.67	

Se observa mayor costo de proceso en el secado al horno, pero reduce el tiempo de secado de 6 a 2 meses. Es decir, el tiempo se reduce en 66.67%.

### Tabla 28

Tabla comparativa de ganancia de *Secado al aire* y *Secado al horno*

Tipo de secado	Precio total de Venta	Costos de Proceso	Ganancia total	Tiempo meses
Secado al aire	1500	879.88	620.12	6
Secado al horno	1750	1121.67	628.33	2

Se observa que se tiene mayor ganancia en el secado al horno, pero con tiempos diferentes. Para conocer la ganancia porcentual por mes se divide las ganancias de cada tipo de secado para el número de meses utilizados en el proceso. Para el secado al aire tenemos una ganancia promedio de \$103.35 por mes, para el secado al horno tenemos una ganancia de \$314.16 por mes, es decir 304% más.

## Cronograma de Actividades

### Diagrama de Gantt

Actividades		Diseño de una Línea de Secado de Madera en la Empresa Maderas Pachacama																											
		Fecha																											
		4/4/2022	7/4/2022	10/4/2022	13/4/2022	16/4/2022	19/4/2022	22/4/2022	25/4/2022	28/4/2022	1/5/2022	4/5/2022	7/5/2022	10/5/2022	13/5/2022	16/5/2022	19/5/2022	22/5/2022	25/5/2022	28/5/2022	31/5/2022	3/6/2022	6/6/2022	7/6/2022	8/6/2022	9/6/2022	10/6/2022	11/6/2022	12/6/2022
Inicio																													
FASE 1. APROBACIÓN DEL PROYECTO																													
	Act. 1 Socialización de factibilidad del proyecto a propietarios de la empresa																												
	Act. 2 Aprobación del Proyecto																												
FASE 2. INGENIERÍA																													
	Act. 1 Ingeniería de detalle (Parte eléctrica)																												
	Act. 2 Parte Mecánica (Planos del proyecto)																												
FASE 3. CONSTRUCCIÓN																													
	Act. 1 Construcción de Estructura																												
	Act. 2 Puesta en Marcha																												
	Act. 3 Pruebas de Funcionamiento																												
Fin																													

## CAPITULO 4

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### Conclusiones:

- En el capítulo 2 se analizó la situación actual de la empresa, mediante las tablas de registros históricos 1, 2 y 3 de contenido de humedad, identificando el tiempo de proceso de secado de 6 meses para 500 tablas de Eucalipto ( $6 \text{ m}^3$ ). Además, en la figura 10 se analiza la pendiente descendente de contenido de Humedad en los tres semestres de análisis de secado al aire, llegando a un promedio de 20% de Contenido de humedad.
- Mediante los respectivos Cálculos Termodinámicos y transferencia de calor se pudo determinar el diseño para la estructura del horno de secado de madera con sus respectivas dimensiones, con la ecuación 10 se pudo determinar el volumen de la cámara que de  $42 \text{ m}^3$  y se distribuye de la siguiente manera: ancho 3.5 m, largo 4m y alto 3m. Se determino el área de captación que resulta de la multiplicación del ancho por el largo ( $3.5 \times 4$ ) m, dando un área de  $14\text{m}^2$ .

A continuación, se muestra los datos obtenidos de las diferentes variables que influyen en el cálculo termodinámico.

#### Tabla 29

Tabla de datos obtenidos de las diferentes variables.

Variable	Resultado
Contenido de Humedad inicial	30%
Contenido de Humedad final	12%
Temperatura inicial	15 °C
Temperatura final	45 °C
Humedad relativa inicial	71%
Humedad relativa final	71%
Angulo de inclinación del colector	10°
Entalpía Inicial	$I_o = 40.34 \text{ kJ / kg. de aire seco}$
Entalpía Final	$I_f = 203.31 \text{ kJ /kg. de aire seco}$
Humedad especifica inicial del aire	$X_o = 0.0100 \text{ kg. de humedad / kg. De aire seco}$
Contenido de humedad Final	$X_f = 0.0612 \text{ kg. de humedad / kg. de aire seco}$
Humedad total a extraer por m <sup>3</sup> de madera	$W_t = 142.64 \text{ kg de humedad / metro}^3 \text{ de madera}$
Consumo Especifico de Calor	$q=3183 \text{ kJ / kg de húmedad}$
Energía necesaria para los 6m <sup>3</sup>	$Q_n=2724138.72 \text{ KJ}$
Tiempo de secado	25 días

- Se diseño el circuito de control automático para el horno de secado de madera, con el fin de monitorear las variables temperatura y humedad dentro de la cámara, para poder adquirir estos valores se selecciono el sensor DHT22, además, se utiliza un LCD para visualizar los datos en tiempo real, el software se programo en el entorno arduino y se realizó una simulación del sistema en el software Proteus. Los elementos seleccionados con sus características se los puede visualizar en la tabla 3. El resultado del sistema completo permitirá reducir el

tiempo de secado de madera en un 66.67%, obteniendo un ahorro económico de 304%.

### Tabla 30

*Tabla de componentes electrónicos y actuadores utilizados en la automatización del proceso de secado de madera.*

Dispositivos y actuadores	Características
Arduino 1	Rev3
LCD 1	16 x 2
Sensor de Temperatura y Humedad	humedad 20-90% HR; temperatura 0 ~
Resistencia	330 Ohms
LED RED	luz indicadora
Relé	5V
Ventilador Boost	1400 RPM 500mm diámetro

### Recomendaciones

- La empresa Maderas Pachacama es una empresa en crecimiento dentro de la producción maderera, es por ello que debe contar con un proceso de secado de madera artificial, se recomienda mantener instrumentos y maquinaria de medición de humedad moderna para generar mayor exactitud en la toma de muestras y su posterior registro el cual debe ser digitalizado para tener historiales archivados y analizar posteriormente el tiempo de secado.
- Dentro de la línea de secado de madera en horno solar las dimensiones obtenidas y características de los diferentes componentes deben cumplir con las condiciones de diseño como ancho, alto, largo inclinación entre otras para su mejor desempeño y no generar gastos innecesarios.

- Es de gran importancia la implementación automática de control de secado de madera, esto evita el control presencial de un operador ya que mediante el sensor de humedad y temperatura y la pantalla LCD se puede observar de forma inmediata el comportamiento de dichas variables, por lo que se recomienda implementar la automatización del control del proceso de secado de madera a fin de que el mismo sea de ayuda para la empresa y pueda ser ejemplo para próximos proyectos dentro de la misma.

## **Bibliografía**

- Akribis. (2021). *Sinergizando Conocimiento y Tecnología*. Obtenido de Proceso de Secado de Madera: <https://www.akribis.info/web/proceso-de-secado-de-la-madera/#:~:text=La%20madera%20se%20seca%20en,calidad%20de%20la%20materia%20prima>.
- Albuja, C. (2014). ANÁLISIS DEL PROCESO DE SECADO Y SU INCIDENCIA EN LA SEGURIDAD DE LA EMPRESA MADEORTEGA S.A. (*Tesis de Ingeniería Industrial*). Universidad Tecnológica Indoamérica, Quito.
- Ambiente, S. d. (15 de 03 de 2022). Obtenido de <http://www.quitoambiente.gob.ec/>
- America, M. (18 de 03 de 2022). *Dices net*. Obtenido de Mapa de Valle de los Chillos en Pichincha en Conocoto: <https://mapasamerica.dices.net/ecuador/mapa.php?nombre=Valle-de-los-Chillos&id=2615>
- ARDUINO. (2022). *ARDUINO*. Obtenido de <https://www.arduino.cc/en/software>
- AREATECNOLOGÍA. (2022). *AREATECNOLOGÍA*. Obtenido de <https://www.areatecnologia.com/electricidad/contactor.html>
- Argentina, C. (2015). *Eucalipto*. Obtenido de <http://www.celulosaargentina.com.ar/>
- Bermejo, F. (22 de 03 de 2021). *Tableros y Molduras Felix Bermejo. S.L.* Obtenido de Humedad de la Madera: [https://tmolduras-fermejo.es/pdfmaderas/p\\_humedad.pdf](https://tmolduras-fermejo.es/pdfmaderas/p_humedad.pdf)
- Bonilla, F. (2015). Horno Solar para Secado de Madera. (*Tesis de Licenciatura*). Tecnológico de Costa Rica, Cartago.

- Carrión, F. (2004). *Calculo y Diseño de Hornos Solares para el. Tesis de Ingeniería Electromecánica*. Universidad Nacional de Loja, Loja.
- Cesefor. (16 de 01 de 2020). *Cesefor*. Obtenido de <http://www.cesefor.com/noticias/la-produccion-mundial-de-productos-de-madera-registra-el-mayor-crecimiento-en-70-anos>
- Coluccio, E. (15 de 07 de 2021). *Concepto*. Obtenido de Entalpía: <https://concepto.de/entalpia/>
- Company, E. T. (15 de 03 de 2021). *Importancia de un buen proceso de secado*. Obtenido de <https://www.ecuadortimber.com/home/>
- Componentes, E. (19 de 01 de 2021). *Electro Componentes*. Obtenido de <https://www.electrocomponentes.es/fijas/34-resistencia-330-ohm-025w.html>
- Cordero, A. (2011). *CUANDO LOS ÁRBOLES NO DEJAN VER EL BOSQUE: EFECTOS DE LOS MONOCULTIVOS FORESTALES EN LA CONSERVACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD*. Obtenido de Scielo: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0120-548X2011000200018&lng=es&nrm=is&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0120-548X2011000200018&lng=es&nrm=is&tlng=es)
- Córdoba, R. (2005). Conceptos básicos sobre el secado de la madera. *Kurú*, 2(5), 1-2.
- Coyago, R., & Criollo, D. (2013). *Diseño Térmico de un Horno para Secado de Madera con una Capacidad de 23 Metros Cúbicos al Mes [Tesis de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Nacional]*. Repositorio Institucional.
- ELECTRONICS, U. (2021). *UNIT ELECTRONICS*. Obtenido de Arduino Uno Rev3: <https://uelectronics.com/producto/arduino-uno-rev3/>
- Espina, A. (2006). *Densidad básica de la madera de Eucalyptus globulus en dos sitios de Chile [Tesis de Ingeniería Forestal, Universidad Austral de Chile]*. Repositorio Institucional. Obtenido de <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/fife.77d/doc/fife.77d.pdf>
- Forestal, E. (23 de 07 de 2013). *Ficha Técnica No. 15 EUCALYPTUS GLOBULUS LABILL*. Obtenido de [ecuadorforestal.org/](http://ecuadorforestal.org/)
- INEN. (20 de 11 de 2012). *Instituto Ecuatoriano de Normalización*. Obtenido de <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/1160.pdf>
- Ipaulownia. (2020). *Ipaulownia*. Obtenido de El mercado maderero: <https://www.ipaulownia.com/es/el-mercado-maderero/>
- Kurú. (2008). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR SOLAR PARA MADERA. TECNOLOGÍA DE PRODUCTOS FORESTALES*. Obtenido de <https://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/424/355>

- Macias, R. (2018). ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS PARA EL SERVICIO ELÉCTRICO DEL CENTRO HISTÓRICO DE LA CIUDAD DE QUITO, Y SU INCIDENCIA EN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA. (*Tesis de Ingeniería Industrial*). Universidad Tecnológica Indoamérica, Quito.
- Madera, T. (01 de 2020). *Sounds Wood*. Obtenido de Contenido de Agua: <https://tocamaderablog.com/propiedades-fisicas/>
- Maderame. (14 de 03 de 2022). *La Madera de Eucalipto: Características y Principales Usos*. Obtenido de <https://maderame.com/enciclopedia-madera/eucalipto/>
- NaturalistEC. (01 de 05 de 2021). *Eucalipto Azul Australiano (Eucalyptus globulus)*. Obtenido de <https://ecuador.inaturalist.org/taxa/53398-Eucalyptus-globulus>
- PCE, I. (13 de 08 de 2021). *PCE Iberica*. Obtenido de <https://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/balanzas/balanza-humedad-pce-mb-c.htm>
- Rodgers, K. (2020). *Alternativas para la Transformación Industrial del Recurso Forestal*. Obtenido de <https://www.oas.org/dsd/publications/Unit/oea19s/ch007.htm#TopOfPage>
- S&P. (Febrero de 2016). *Sistema de Ventilación*. Obtenido de <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/ventiladores-industriales/>
- Sánchez, A., Vayas, T., Mayorga, F., & Freire, C. (15 de 03 de 2021). Sector Maderero Ecuador. *Observatorio Económico y Social de Tungurahua*, 1.
- Sánchez, J. (19 de 03 de 2022). *Cálculo de la Evapotranspiración Potencial mediante la fórmula de Hargreaves*. Obtenido de <https://hidrologia.usal.es/>
- Statista. (02 de 07 de 2021). *Statista*. Obtenido de <https://es.statista.com/estadisticas/1222951/perdida-bosques-america-latina-pais/>
- Universo, E. (18 de 06 de 2021). *Este domingo 20 de junio en Ecuador ocurrirá el primer solsticio de 2021*. Obtenido de <https://www.eluniverso.com/noticias/ecuador/este-domingo-20-de-junio-en-ecuador-ocurrira-el-primer-solsticio-de-2021-nota/>
- Utkina, I. (14 de diciembre de 2016). *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura*. Obtenido de La producción mundial de madera crece impulsada por la construcción y las energías verdes: <http://www.fao.org/news/story/es/item/459939/icode/>
- Valle, H. D. (30 de 01 de 2018). *Maquinaria y Maderas*. Obtenido de LO QUE DEBES SABER SOBRE LA CALIDAD DE CORTE EN LA MADERA: <https://maquinariaymaderas.com/todo-sobre-calidad-del-corte-en-la-madera/>

- Valle, H. D. (25 de 06 de 2019). *Maquinaria y Maderas*. Obtenido de 5 FASES DEL SECADO DE MADERA INDUSTRIAL QUE DEBES CONOCER:  
<https://maquinariaymaderas.com/secado-de-madera-industrial/>
- Villegas, E. (2017). PLAN DE NEGOCIOS PARA LA FABRICACIÓN Y COMERCIALIZACIÓN DE CALENTADORES DE AGUA CON ENERGÍA SOLAR EN LA PARROQUIA CALDERON DE LA CIUDAD DE QUITO. *Ingeniería en Administración de Empresas*. Universidad Tecnológica Indoamérica, Quito.
- Viscarra, S. (1998). Guía Práctica para el Secado de Madera en Hornos. 7.
- Woods. (12 de 2020). *¿Cuáles son los beneficios de la madera secada al horno?*  
Obtenido de <https://woodscostarica.com/blog/beneficios-de-la-madera-secada-al-horno.php>

## ANEXOS

Anexo 1.- Humedad Relativa Ambiente y Contenido de Humedad de Equilibrio de la Madera para Diferentes Temperaturas del Bulbo Seco

T <sup>°C</sup>	Humedad %	Diferencia Psicrométrica en °C																					
		1	1 1/2	2	2 1/2	3	3 1/2	4	4 1/2	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	22	25	28
5	H.R.	86	79	72	65	58	52	45	39	33	20	7											
	<b>C.H.E.,</b>	<b>19</b>	<b>16</b>	<b>14</b>	<b>12</b>	<b>11</b>	<b>9.5</b>	<b>8.5</b>	<b>7,5</b>	<b>6.5</b>	<b>4.5</b>	<b>1.5</b>											
15	H.R.	90	85	80	75	71	66	61	57	53	44	36	27	20	13								
	<b>C.H.E.,</b>	<b>20.5</b>	<b>18</b>	<b>16</b>	<b>14,5</b>	<b>13</b>	<b>12</b>	<b>11</b>	<b>10,5</b>	<b>10</b>	<b>8</b>	<b>7</b>	<b>6</b>	<b>4.5</b>	<b>3</b>								
25	H.R.	92	88	84	81	77	74	70	67	63	57	50	44	39	33	22	12						
	<b>C.H.E.,</b>	<b>21.5</b>	<b>19,5</b>	<b>17.5</b>	<b>16</b>	<b>15</b>	<b>14</b>	<b>13</b>	<b>12</b>	<b>11.5</b>	<b>10</b>	<b>9</b>	<b>8</b>	<b>7.5</b>	<b>6.5</b>	<b>5</b>	<b>2.5</b>						
35	H.R.	94	90	87	84	81	78	75	72	69	64	59	54	49	44	36	28	20	13	7			
	<b>C.H.E.,</b>	<b>22</b>	<b>19.5</b>	<b>18</b>	<b>16.5</b>	<b>15.5</b>	<b>14.5</b>	<b>13.5</b>	<b>13</b>	<b>12</b>	<b>11</b>	<b>10</b>	<b>9.5</b>	<b>8.5</b>	<b>8</b>	<b>6.5</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>1.5</b>			
40	H.R.	94	91	88	85	82	80	77	74	72	67	62	57	53	48	40	33	26	20	14	6		
	<b>C.H.E,</b>	<b>22</b>	<b>19.5</b>	<b>18</b>	<b>17</b>	<b>16</b>	<b>15</b>	<b>14</b>	<b>13</b>	<b>12.5</b>	<b>11.5</b>	<b>10.5</b>	<b>9.5</b>	<b>9</b>	<b>8</b>	<b>7</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>1,5</b>		
45	H.R.	94	91	88	85	83	80	78	75	73	69	64	60	56	52	44	37	30	25	19	14		
	<b>C.H.E,</b>	<b>22</b>	<b>19.5</b>	<b>18</b>	<b>17</b>	<b>15.5</b>	<b>15</b>	<b>14</b>	<b>13.5</b>	<b>12.5</b>	<b>11.5</b>	<b>10.5</b>	<b>10</b>	<b>9</b>	<b>8</b>	<b>7</b>	<b>6.5</b>	<b>5.5</b>	<b>4.5</b>	<b>4</b>	<b>3</b>		
50	H.R.	95	92	89	86	83	81	79	76	74	70	65	61	58	54	46	40	34	29	24	18	12	5
	<b>C.H.E.,</b>	<b>22</b>	<b>19.5</b>	<b>18</b>	<b>16.5</b>	<b>15.5</b>	<b>15</b>	<b>14</b>	<b>13.5</b>	<b>12.5</b>	<b>11.5</b>	<b>10.5</b>	<b>10</b>	<b>9</b>	<b>8.5</b>	<b>7.5</b>	<b>6.5</b>	<b>5.5</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>3.5</b>	<b>2.5</b>	<b>1</b>
55	H.R.	95	92	90	87	84	82	80	78	76	72	67	63	60	56	50	43	37	32	27	22	16	10
	<b>C.H.E.,</b>	<b>21.5</b>	<b>19.5</b>	<b>18</b>	<b>16.5</b>	<b>15.5</b>	<b>14.5</b>	<b>13.5</b>	<b>13</b>	<b>12.5</b>	<b>11.5</b>	<b>10.5</b>	<b>10</b>	<b>9</b>	<b>8.5</b>	<b>7.5</b>	<b>6.5</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>4.5</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>2</b>

Anexo 2.- Peso Específico Básico, Densidad y Programas de Secado para Diferentes Maderas

No.	Nombre común	Nombre científico	Peb*	Dad** 12%	Horario***	
					1*	2*
1	Ajpa, Joroni	<i>Swartzia sp.</i>	0,64	—	(T2-C2)	(T2-C1)
2	Amargo	<i>Simarouba amara</i>	0,36	—	Fuerte	—
3	Amarillo	<i>Aspidosperma sp.</i>	0,61	0,73	(T6-D2)	(T3-D1)
4	Azucaró, Cedrillo	<i>Spondias mombin</i>	0,36	—	Fuerte	—
5	Balsa	<i>Ochroma pyramidale</i>	0,20	—	(T10-D4S)	(T8-D3S)
6	Borracho, Gultarero	<i>Didymopanax morototoni</i>	0,40	—	Fuerte	—
7	Cambar	<i>Erisma uncinatum</i>	0,46	0,57	(T1-D2)	—
8	Cedro	<i>Cedrela spp.</i>	0,42	0,50	(T10-D4S)	(T8-D3S)
9	Copalbo	<i>Copaifera sp.</i>	0,60	0,70	MODERADO	—
10	Cuchi	<i>Astronilum urundeuva</i>	1,00	1,22	(T1-B1)	—
11	Curupaú, Cebil	<i>Anadenanthera macrocarpa</i>	0,85	1,02	(T8-B3)	(T5-B1)
12	Cuta beniana	<i>Astronilum graveolens</i>	0,86	—	(T3-C2)	—
13	Cuta blanca, Perilla	<i>Phyllostylon sp.</i>	0,79	0,95	(T2-B2)	—
14	Gabún, Sangre de toro	<i>Virola boliviana</i>	0,39	0,48	(T3-C2)	(T3-C1)
15	Guapl	<i>Guarea sp.</i>	0,58	—	(T6-D2)	(T3-D1)
16	Guayabochi	<i>Calycophyllum spruceanum</i>	0,75	0,91	(T2-C2)	(T2-C1)
17	Isigo	<i>Protium sp.</i>	0,54	—	(T3-C2)	(T3-C1)
18	Japunaqui	<i>Cordia sp.</i>	0,66	—	(T6-D2)	(T3-D1)
19	Jichituriqui, Gabetillo	<i>Aspidosperma pyriforme</i>	0,73	0,89	(T6-D2)	(T3-D1)
20	Laurel amarillo	<i>Nectandra sp.</i>	0,45	0,53	SUAVE	—
21	Mapajo	<i>Ceiba pentandra</i>	0,51	0,62	(T10-D6S)	(T8-D4S)
22	Mara	<i>Swietenia macrophylla</i>	0,43	0,54	(T6-D4)	(T3-D3)
23	Mara macho	<i>Cedrelinga catenaeformis</i>	0,46	0,57	MODERADO	—
24	Momoqui	<i>Caesalpinia peltophoroides</i>	0,89	1,05	(T3-C2)	(T3-C1)
25	Mora	<i>Chlorophora tinctoria</i>	0,81	0,96	MODERADO	—
26	Morado del Beni	<i>Peltogyne porphyrocardia</i>	0,86	—	(T6-D2)	(T3-D1)
27	Morado Chiquitos	<i>Peltogyne sp.</i>	0,84	0,99	(T6-D2)	(T3-D1)
28	Mururé, Mascajo	<i>Cianisia racemosa</i>	0,61	0,70	SUAVE	—
29	Nogal	<i>Juglans australis</i>	0,50	0,59	(T6-D4)	(T3-D3)
30	Nui, ojoso colorado	<i>Pseudoalmeda laevigata</i>	0,76	0,90	MODERADO	—
31	Ochoó, Solimán	<i>Hura crepitans</i>	0,44	0,52	(T6-D2)	(T3-D1)

Anexo 3.- Programa Suave (S): para maderas latifoliadas de secado difícil

Contenido de humedad de la madera %	Temperatura °C		Humedad relativa aproximada %
	Termómetro seco	Termómetro húmedo	
Verde	40	37	80
40	40	35	70
30	45	37	60
25	50	40	50
20	55	42	40
15	55	37	30

Anexo 4.- Calor específico a presión constante

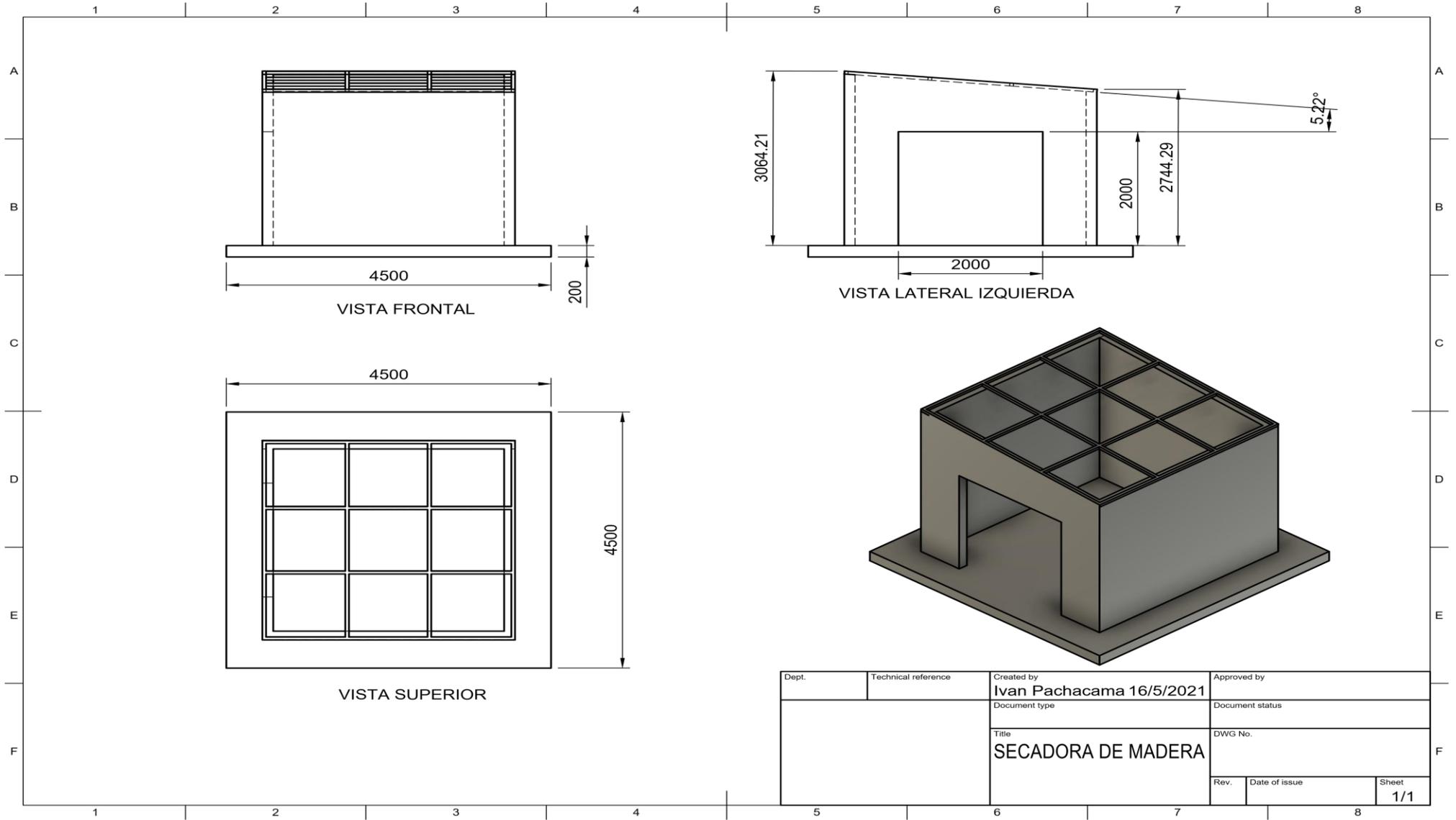
Temperatura, K	$C_p$ kJ/kg · K	$C_v$ kJ/kg · K	$k$
	Aire		
250	1.003	0.716	1.401
300	1.005	0.718	1.400
350	1.008	0.721	1.398
400	1.013	0.726	1.395
450	1.020	0.733	1.391
500	1.029	0.742	1.387
550	1.040	0.753	1.381
600	1.051	0.764	1.376
650	1.063	0.776	1.370
700	1.075	0.788	1.364
750	1.087	0.800	1.359
800	1.099	0.812	1.354
900	1.121	0.834	1.344
1000	1.142	0.855	1.336

Anexo 5.- Presión de Saturación, Vapor de Saturación a varias temperaturas.

Agua saturada. Tabla de temperaturas									
Temp., $T$ °C	Pres. sat., $P_{sat}$ kPa	Volumen específico, $m^3/kg$		Energía interna, $kJ/kg$			Entalpía, $kJ/kg$		
		Líqu. sat., $v_f$	Vapor sat., $v_g$	Líqu. sat., $u_f$	Evap., $u_{fg}$	Vapor sat., $u_g$	Líqu. sat., $h_f$	Evap., $h_{fg}$	Vapor sat., $h_g$
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1

Nota. Adaptada de Cengel octava edición.

## Anexo 6.- Planos de Horno de Solar



Anexo 7.- Proforma de varios materiales para estructura de horno solar

## MEJIA MOLINA EDILMA DEL ROCIO

*Si Piensa en Construccion Piensa en Promacons*  
 Dirección: HUANCABILCA N1367 y AZUAY  
 Teléfonos: 3804667 - 0984275110  
 Email : contabilidad@promacons.com  
 WEB : www.promacons.com

# PROFORMA

Proforma No.: **0000003447**

Realizada por:  
**MOLINA HERRERA BERTHA FABIOLA**

Fecha: **sábado 22, enero 2022 / 10:43:42**  
 Hora: **10:43:42**  
 Validez de Proforma: **1 días**

**DATOS DEL CLIENTE**

Nombre:	CONSUMIDOR FINAL	Teléfonos:	999999999
Dirección:	CONSUMIDOR FINAL	CC / RUC:	999999999

**FORMA DE PAGO : EFECTIVO**

Cuota de Entrada:	Saldo:	Número de Cuotas:	Valor de Cuota:
0.00 (0.00 %)	\$ 0.00	0	\$ 0.00

Código	Cantidad	Unidad	Descripción de Artículo	Valor Unit.	Descuento	Valor Total	
TRE-017	8.00	UNID.	TUBO RECTANGULAR 80 X 40 X 3	50.4464	5	383.39	
TC-004	5.00	UNID.	TODL CORRUGADO 3MM	118.4960	4	568.78	
						PARCIAL SIN DESC	996.05
						DESCUENTO ITEMS	43.88
						SUBTOTAL	952.17
						SUBTOTAL BASE IVA	952.17
						TOTAL IVA	114.26
						TOTAL	1066.43

Firma Responsable

Firma Cliente

Anexo 8.- Tool negro corrugado



IDMACERO. Importadora de Materiales de

Fecha impresión: 22 ene 2022 / 11:10 AM

Dirección: AV. RUMINAHUI LOTE 2 Y GENERAL ENRIQUEZ Teléfono: 2330826  
2334040

Usuario: CRIZO  
Impresión:

PROFORMA SIN VALOR COMERCIAL

Cliente:	Consumidor Final	Numero:	PROF-73858
Dirección:	na na	Fecha pedido:	22/01/22 0:00
Numero de Cuotas:	1	Condicion de Pago:	SIN CREDITO
Contacto :		Vendedor:	RIZO CASTRO CARLA

Codigo	Cantidad	Descripcion	Valor Unitario	%Desc	Descuento (U)	Valor Total
TRE-022	8.0000	TUBO RECT 80 X 40 X 3 - 31.55	52,1492		4,9855	417,19
PNC-013	5.0000	TOOL NEGRO CORRUGADO RS 3.0 - 75.64	128,5502		12,2894	642,75

[Empty box for stamp or signature]

Subtotal	1.059,94
Descuento	101,33
Subtotal - Descuento	958,61
Impuesto	115,03
Total	1.073,64

\* Proforma válida por un día.

IDMACERO.