



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Energía y Ambiente

**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE SECADO SOLAR DE LEÑA PARA SU
USO COMO BIOCOMBUSTIBLE**

Ing. Carlos Alejandro Alegre Ordóñez

Asesorado por el M.A. Ing. José Antonio Rosal Chicas

Guatemala, octubre de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE SECADO SOLAR DE LEÑA PARA SU
USO COMO BIOCOMBUSTIBLE**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ING. CARLOS ALEJANDRO ALEGRE ORDÓÑEZ

ASESORADO POR EL M.A. ING. JOSÉ ANTONIO ROSAL CHICAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ENERGÍA Y AMBIENTE

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Ángel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE SECADO SOLAR DE LEÑA PARA SU USO COMO BIOCOMBUSTIBLE

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 31 de agosto de 2015.



Ing. Carlos Alejandro Alegre Ordóñez

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Fuente de vida y conocimiento.
Virgen María	Por tomarme de la mano y ser la guía de mi camino.
Mis padres	Carlos Heberto y Marta Lidia, por darme todo, esperando un mejor futuro.
Mi hermano	Heberto José, por demostrarme que con esfuerzo y dedicación en la vida las metas se pueden alcanzar.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por haberme permitido obtener conocimientos.

Facultad de Ingeniería

Que en sus aulas he formado mi academia.

Mis compañeros

Por su amistad, apoyo y solidaridad incondicional en todo momento de la formación académica.

Mi asesor

Ing. José Antonio Rosal Chicas, por su amistad y colaboración en este trabajo.

Panadería San Antonio

En especial a su Juan Carlos Cabrera. Por abrir sus puertas a la investigación y a sus métodos de panificadora.



FACULTAD DE
INGENIERÍA - USAC
EP
ESCUELA DE
ESTUDIOS DE POSTGRADO

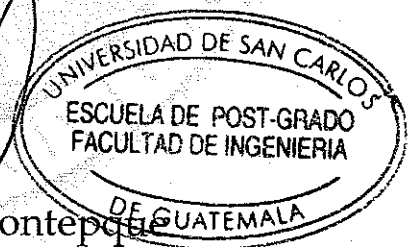
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Teléfono 2418-9142 / 24188000 Ext. 86226

APT-2016-069

Como Coordinador de la Maestría en Energía y Ambiente y revisor del Trabajo de Graduación titulado **"OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE SECADO SOLAR DE LEÑA PARA SU USO COMO BIOCOMBUSTIBLE"** presentado por el Ingeniero Civil Carlos Alejandro Alegre Ordóñez, apruebo y recomiendo la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"

MSc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepa
Coordinador de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado



Guatemala, Octubre de 2016

Cc: archivo/la

Doctorado: Sostenibilidad y Cambio Climático. Programas de Maestrías: Ingeniería Vial, Gestión Industrial, Estructuras, Energía y Ambiente Ingeniería Geotécnica, Ingeniería para el Desarrollo Municipal, Tecnologías de la Información y la Comunicación, Ingeniería de Mantenimiento. Especializaciones: Gestión del Talento Humano, Mercados Eléctricos, Investigación Científica, Educación virtual para el nivel superior, Administración y Mantenimiento Hospitalario, Neuropsicología y Neurociencia aplicada a la Industria, Enseñanza de la Matemática en el nivel superior, Estadística, Seguros y ciencias actuariales, Sistemas de información Geográfica, Sistemas de gestión de calidad, Explotación Minera, Catastro.



FACULTAD DE
INGENIERÍA - USAC

ESCUELA DE
ESTUDIOS DE POSTGRADO

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Teléfono 2418-9142 / 24188000 Ext. 86226

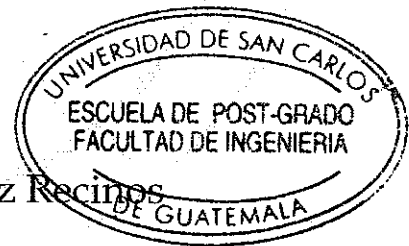
APT-2016-069

El Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y dar el visto bueno del revisor y la aprobación del área de Lingüística del Trabajo de Graduación titulado **"OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE SECADO SOLAR DE LEÑA PARA SU USO COMO BIOCOMBUSTIBLE"** presentado por el Ingeniero Civil **Carlos Alejandro Alegre Ordóñez**, correspondiente al programa de Maestría en Energía y Ambiente; apruebo y autorizo el mismo.

"Id y Enseñad a Todos"


MSc. Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Director

Escuela de Estudios de Postgrado



Guatemala, Octubre de 2016.

Cc: archivo/la

Doctorado: Sostenibilidad y Cambio Climático. Programas de Maestrías: Ingeniería Vial, Gestión Industrial, Estructuras, Energía y Ambiente Ingeniería Geotécnica, Ingeniería para el Desarrollo Municipal, Tecnologías de la Información y la Comunicación, Ingeniería de Mantenimiento. Especializaciones: Gestión del Talento Humano, Mercados Eléctricos, Investigación Científica, Educación virtual para el nivel superior, Administración y Mantenimiento Hospitalario, Neuropsicología y Neurociencia aplicada a la Industria, Enseñanza de la Matemática en el nivel superior, Estadística, Seguros y ciencias actuariales, Sistemas de información Geográfica, Sistemas de gestión de calidad, Explotación Minera, Catastro.



FACULTAD DE
INGENIERÍA - USAC
ES
ESCUELA DE
ESTUDIOS DE POSTGRADO

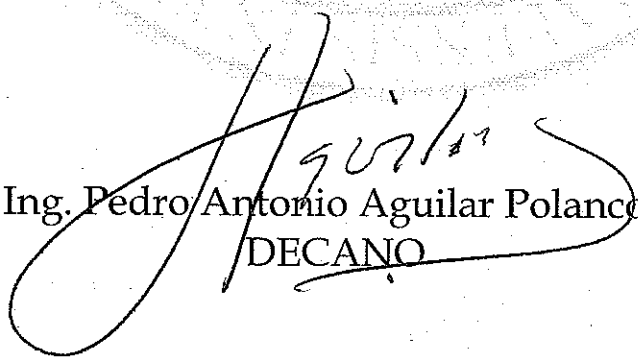
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Teléfono 2418-9142 / Ext. 86226

Ref. APT-2016-069

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Postgrado, al Trabajo de Graduación de la Maestría en Energía y Ambiente titulado: **"OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE SECADO SOLAR DE LEÑA PARA SU USO COMO BIOCOMBUSTIBLE "** presentado por el Ingeniero Civil Carlos Alejandro Alegre Ordóñez, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
DECANO

Guatemala, Octubre de 2016.

Cc: archivo/la

Doctorado: Sostenibilidad y Cambio Climático. Programas de Maestrías: Ingeniería Vial; Gestión Industrial, Estructuras, Energía y Ambiente Ingeniería Geotécnica, Ingeniería para el Desarrollo Municipal, Tecnologías de la Información y la Comunicación, Ingeniería de Mantenimiento. Especializaciones: Gestión del Talento Humano, Mercados Eléctricos, Investigación Científica, Educación virtual para el nivel superior, Administración y Mantenimiento Hospitalario, Neuropsicología y Neurociencia aplicada a la Industria, Enseñanza de la Matemática en el nivel superior, Estadística, Seguros y ciencias actuariales, Sistemas de información Geográfica, Sistemas de gestión de calidad, Explotación Minera, Catastro.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XIII
RESUMEN	XVII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS	XIX
OBJETIVOS	XXV
RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO	XXVII
INTRODUCCIÓN	XXXI

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Calor y temperatura	1
1.1.1. Capacidad calórica.....	2
1.2. Uso de leña en Guatemala	5
1.3. Uso de leña como combustible.....	6
1.3.1. Densidad de la madera.....	9
1.3.2. Conductividad térmica.....	9
1.3.3. Difusividad térmica.....	10
1.4. Eficiencia energética de hornos de leña.....	10
1.5. Humedad contenida en la madera.....	11
1.5.1. Determinación del contenido de humedad en la madera.....	12
1.6. Bases físicas del secado de madera.....	13
1.6.1. Proceso de secado de la madera.....	14
1.7. Radiación solar.....	16

1.7.1.	Constante solar	16
1.7.2.	Componentes de la radiación solar	16
1.7.3.	Movimiento solar	19
1.8.	Cámaras para secado solar de madera	20
1.8.1.	Diseño de secadores solares de madera	21
2.	FASE EXPERIMENTAL	
2.1.	Análisis de la situación actual de secado de leña utilizada como combustible en una industria panificadora	29
2.2.	Análisis estadístico de series históricas de variables meteorológicas: temperatura, precipitación, humedad relativa, velocidad del viento, nubosidad	31
2.2.1.	Temperatura	31
2.2.2.	Humedad relativa	32
2.2.3.	Nubosidad	33
2.2.4.	Precipitación	34
2.2.5.	Velocidad del viento	34
2.3.	Diseño de cámara para secado solar de madera	35
2.4.	Construcción de modelo de cámara para secado solar de madera	44
3.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	
3.1.	Presentación de gráficas contenido de humedad versus tiempo de secado	49
3.2.	Presentación de resultados de laboratorio CII	54

4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS	
4.1.	Comparación entre secado tradicional al aire libre y secado por medio de cámara de secado solar.....	57
5.	PRESUPUESTO Y EVALUACIÓN FINANCIERA	
5.1.	Presupuesto	61
5.2.	Valor actual neto, tasa interna de retorno	62
	CONCLUSIONES	65
	RECOMENDACIONES.....	67
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
	ANEXOS	73

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Esquema de los mecanismos de transferencia de calor	1
2.	Curva teórica de secado.....	15
3.	Mapa de radiación solar de la República de Guatemala	18
4.	Secador solar del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago.....	22
5.	Secador solar de la Universidad Autónoma de Chapingo, México.....	23
6.	Efecto invernadero ocasionado por la incidencia de rayos solares.....	25
7.	Diagrama del proceso de circulación de aire y perfil de secador solar.....	26
8.	Esquema de secador solar propuesto y sus componentes	27
9.	Esquema de proceso de secado	27
10.	Horno en panadería, portezuela	30
11.	Interior de horno en panadería cargado antes de incinerar.....	30
12.	Secador solar	47
13.	Deshidratador Aureliano Buendía	48
14.	Contenido de humedad versus tiempo de secado Encino (<i>quercus tristis</i>).....	49
15.	Contenido de humedad versus tiempo de secado Ciprés (<i>cupressus lusitánica</i>)	51
16.	Contenido de humedad versus tiempo de secado Capulín (<i>trema micrantha</i>)	52
17.	Informe de Tecnología de la Madera CII	80

18.	Proceso constructivo de secador solar	90
19.	Toma de datos para estudio	91
20.	Planos constructivos secadora solar	97

TABLAS

I.	Resumen del consumo semanal de leña por tamaño de leño por hogares.....	6
II.	Consumo de leña para diferentes industrias.....	7
III.	Contenido de humedad actual.....	31
IV.	Valores característicos temperatura media mensual (°C).....	31
V.	Valores característicos temperatura máxima mensual (°C)	32
VI.	Valores característicos temperatura mínima mensual (°C).....	32
VII.	Valores característicos humedad relativa media mensual (%).....	32
VIII.	Valores característicos humedad relativa máxima mensual (%).....	33
IX.	Valores característicos humedad relativa mínima mensual (%).....	33
X.	Valores característicos nubosidad (octas).....	34
XI.	Valores característicos precipitación (mm).....	34
XII.	Valores característicos velocidad del viento (km/h).....	35
XIII.	Resumen de diseño de secador solar.....	40
XIV.	Dimensionamiento de secador solar.....	46
XV.	Contenido de humedad versus tiempo de secado Encino (<i>quercus tristis</i>).....	50
XVI.	Contenido de humedad versus tiempo de secado Ciprés (<i>cupressus lusitánica</i>)	51
XVII.	Contenido de humedad versus tiempo de secado Capulín (<i>trema micrantha</i>)	53
XVIII.	Resultados Laboratorio CII.....	54
XIX.	Condiciones durante el período de estudio.....	58

XX.	Resumen de presupuesto.....	61
XXI.	Flujo de Fondos, Valor Actual Neto y Tasa Interna de Retorno.....	62
XXII.	Series de registros meteorológicos, Estación INSIVUMEH Suiza Contenta.....	73
XXIII.	Toma de datos para estudio.....	85
XXIV.	Integración de precios unitarios.....	87
XXV.	Ahorro energético Encino (<i>quercus tristis</i>)	92
XXVI.	Ahorro energético Ciprés (<i>cupressus lusitánica</i>)	94
XXVII.	Ahorro energético Capulín (<i>trema micrantha</i>)	95

LISTA DE SÍMBOLOS

hp	Altura de pila de leña
A	Área
Ae	Área de evaporación
Al	Área de listones
Aet	Área efectiva de evaporación
Qagua	Calor del agua
Qm	Calor del material
C	Calor específico
Qc	Calor necesario para evaporar agua
M	Cantidad de aire que pasa por la cámara de secado
dQ	Cantidad de calor
C	Capacidad calórica
CII	Centro de Investigaciones de Ingeniería
U	Coefficiente de convección diferencial
k	Conductividad térmica
$\Delta T, dt$	Delta de temperatura
ρ	Densidad
D.E.	Desviación estándar
E	Emisividad
q	Energía calórica suministrada a placa colectora
Ha	Entalpía del agua
Hv	Entalpía del vapor de agua
dx	Espesor
g	Gramo
h	Horas

hf	Humedad final
hi	Humedad inicial
IR	Índice de Rentabilidad
kWh	Kilo watt hora
kg	Kilogramo
®	Marca registrada
m²	Metro cuadrado
m³	Metro cúbico
msnm	Metros sobre nivel del mar
MEM	Ministerio de Energía y Minas de Guatemala
p.	Número de página
¶	Párrafo
Ph	Peso húmedo
Ps	Peso seco
%	Porcentaje
% H	Porcentaje de humedad
AE	Razón de agua a evaporar
AEm	Relación entre razón de agua a evaporar y tiempo de secado
s	Segundos
s.f.	Sin fecha
TIR	Tasa Interna de Retorno
T1	Temperatura ambiente
T2	Temperatura del cuerpo a recibir calor
°C	Temperatura en grados centígrados
°K	Temperatura en grados kelvin
Tf	Temperatura final
To	Temperatura inicial
ts	Tiempo de secado

m	Unidad de masa. Distancia en metros
VAN	Valor Actual Neto
MÁX	Valor máximo
MÍN	Valor mínimo
v	Velocidad
Vp	Volumen a secarse
Vt	Volumen de probeta
W	Watt

GLOSARIO

Agua de constitución	Agua que forma parte de la materia celular de la madera.
Agua de saturación	Agua contenida en las paredes celulares de la madera.
Agua libre	Agua que da a la madera su condición de verde, ocupando las cavidades celulares.
Aislante térmico	Material utilizado en la construcción y la industria, caracterizado por su alta resistencia térmica. Constituye una barrera al paso de calor entre dos medios que tendrían transferencia de calor.
Biomasa	Cantidad de productos obtenidos por fotosíntesis, susceptibles de ser transformados en combustible.
Calor	Energía cinética total de todos los átomos o moléculas de una sustancia.
Capacidad calórica	Cantidad de calor que se requiere para elevar la temperatura de una sustancia un grado Celsius por cada kilogramo.

Colector	Componente del secador solar cuya función es capturar la energía solar, la cual se convierte en calor y se transmite al aire.
Combustible	Sustancia o materia que al combinarse con oxígeno es capaz de reaccionar desprendiendo calor.
Conducción	Mecanismo de transferencia de calor a escala atómica a través de la materia por la actividad molecular por el choque de moléculas entre sí.
Conductividad	Capacidad de un material para transferir calor.
Constante solar	Intensidad de flujo de radiación solar que incide sobre una unidad de superficie en un plano tangente a la esfera imaginaria formada por la capa externa de la atmósfera.
Convección	Mecanismo de transferencia de calor por movimiento de masa o circulación dentro de la sustancia.
Densidad	Razón de masa de un material entre una unidad de volumen.
Difusividad térmica	Rapidez con la que varía la temperatura de un material ante una solicitud térmica.
Humedad	Razón de masa de agua contenida en una masa de un material.

Irradiación	Energía incidente por unidad de superficie sobre un plano dado, obtenida por la integración de la irradiancia durante un intervalo de tiempo dado.
Irradiancia	Potencia solar incidente por unidad de superficie sobre un plano dado.
Latitud	Ángulo que forma la vertical de un punto de la superficie de la tierra y el plano del ecuador.
Longitud	Arco del ecuador comprendido entre el meridiano de un lugar y el meridiano de Greenwich.
Longitud de onda	Cociente entre la velocidad de la luz y la frecuencia.
Radiación	Energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura dada, produciendo directamente desde la fuente hacia afuera en todas direcciones.
Radiación difusa	Rayos solares que llegan a la superficie de la tierra después de haber cambiado varias veces de dirección al atravesar la atmósfera.
Radiación directa	Rayos solares que alcanzan la superficie de la tierra sin ser desviados.
Radiación reflejada	Parte de radiación reflejada por el terreno y otros elementos de la superficie terrestre y que puede ser reabsorbida por otros objetos.

Radiación solar	Ondas electromagnéticas en que llega la energía del sol a la tierra que se propagan en todas las direcciones.
Radiación total	Suma de radiación directa, difusa y reflejada.
Techo	Componente del secador solar a través del cual se capta la energía que elevará la temperatura del aire interno de la cámara.
Temperatura	Medida de la energía cinética promedio de los átomos y moléculas individuales de una sustancia.
Transferencia de calor	Ocurre cuando dos cuerpos de diferente temperatura se ponen en contacto entre sí. Ocurre del de mayor temperatura al de menor temperatura.
Ventila	Componente del secador solar cuya función es retirar el aire caliente saturado de la cámara que puede detener el proceso de secado.
Ventilador	Componente del secador solar que sirve para poner en movimiento en el interior de la cámara de secado la energía solar captada en el colector.

RESUMEN

El proceso de secado consiste en la reducción del contenido de humedad de un material, debido a una transferencia de calor entre sus partículas con las del ambiente que le rodea.

En Guatemala, el combustible de mayor uso es la leña. Su explotación inmoderada contribuye a la deforestación en el país. La leña al ser incinerada emana una serie de gases, algunos de ellos perjudiciales a la salud. Al no tener un óptimo secado, gran cantidad de estos gases lo constituye el vapor de agua.

El uso de energía solar térmica es cotidiano para el hombre: sentir calor, secar ropa, secar granos, secar madera, entre otros. Su explotación puede contribuir en aportar energía de manera más eficiente a un proceso específico, además de poder convertir esta energía calórica en otro tipo, como la eléctrica.

Al desarrollar modelos de secadores solares, el colector solar recibe energía del sol en forma de ondas, y esta aporta energía a una masa de aire capturada del ambiente y confinada en el colector, aumentando su temperatura y disminuyendo su presión, lo que garantiza el flujo del aire hacia lugares de mayor presión en forma ascendente. Con ello, se conecta a la cámara de secado en la cual ocurre la transferencia de calor hacia las trozas que en el momento de iniciar el proceso tienen menor temperatura y mayor contenido de humedad. La transferencia de calor disminuye el contenido de humedad de las trozas de leña.

La implementación del modelo construido en forma artesanal, da oportunidad para que el mismo sea de acceso a la sociedad, de rápida construcción y puesta en marcha. De acuerdo a factores climáticos y a las propiedades de la especie maderable, la eficiencia del modelo será variable repercutiendo en el tiempo de secado.

El costo es fijo y el mantenimiento del equipo es escaso a lo largo del tiempo. El análisis financiero de la implementación es variable de acuerdo al fin que se pretenda. De acuerdo a la especie, puede secarse el recurso a utilizar como combustible en menor tiempo comparado contra el secado tradicional; el proceso continuo utilizando la energía solar puede aportar una mayor cantidad de trozas en condiciones de secado óptimas que pueden ser comercializadas. La ubicación de la cámara de secado puede aportar un espacio físico en la edificación donde se implemente el secador.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS

Pozos Suárez (2010), indica:

“El uso de energía solar para secado es antiguo. Los egipcios descubrieron el efecto que un cuerpo expuesto al sol en un recipiente de vidrio se calienta más que al aire libre. Herón de Alejandría construyó un dispositivo para bombear agua accionado por la radiación solar (100 d.C.). Arquímedes incendió una flota utilizando espejos planos pequeños agrupados para formar espejos cóncavos grandes (siglo III). Lavoisier construyó el primer horno solar concentrando la energía con ayuda de una lente con líquido, obtuvo la temperatura de fusión del platino (siglo XII)” (p. 5).

La energía solar cotidianamente se utiliza en actividades como secado de ropa en la vivienda, secado de elementos de mampostería (ladrillos y bloques de concreto), secado de madera (biocombustible aprovechado como leña; aporte para este trabajo).

La reducción del contenido de humedad en la madera se realiza por medio del proceso de transferencia de calor, el cual ocurre cuando “un cuerpo de mayor temperatura está en contacto con uno de menor temperatura” (Inzunza, 2007, p. 407), aportando así una transferencia. Uno de los mecanismos de transferencia de calor es la convección, la cual se refiere al “movimiento de una masa o circulación dentro de una sustancia” (Inzunza, 2007, p. 412).

El aprovechamiento de energía solar para transferencia de calor por convección para reducir el contenido de humedad en trozas de madera utilizadas como biocombustible se muestra en el modelo del Instituto

Tecnológico de Costa Rica. Este prototipo enmarca ventilas como impulsores para direccionar viento hacia la ubicación de la madera en la parte baja del modelo, donde la acción del sol es calentar el aire interno (que por principio se ubica en la parte superior de su confinamiento) y el delta de presiones de masas de aire moviliza el flujo adentro de la cámara, recreando una transferencia de calor por convección, aumentando la temperatura de las trozas y promoviendo la transferencia del agua de no ligada en la madera por evaporación, disminuyendo el contenido de humedad de las mismas. (Salas, Moya y Córdoba, 2008).

Otro prototipo, es el propuesto por la Universidad Autónoma de Chapingo, Estado de México. En este se trabaja una propuesta tipo invernadero, que consta de una entrada de masa de aire frío de manera continua en una cámara, parte donde interactúa con la acción solar, calentando el aire, posteriormente buscando la parte baja de la cámara de secado, haciéndole pasar por las trozas distribuidas en el interior generando transferencia de calor, conduciéndole después a un canal de escape de aire con la humedad de salida. (Fuentes, Luna, Osorio, y Corona, 2003).

En Guatemala, no se cuenta con información de la utilización de un sistema para secado de madera, por medio de la utilización de energía solar.

El propósito del secado de madera contenido en este documento es aprovechamiento energético de un recurso, ser utilizada como biocombustible (incinerarla para producir calor y con ello obtener un producto final, pan para este estudio). Los modelos mencionados previamente consideran aspectos para conservar el estado de la madera, cuidándole de torceduras y grietas.

La tasa de deforestación de Guatemala es de 2,1 % anual. El uso de leña como combustible representa 63,0 % del consumo de energía en el país. Solo el 10,0 % de los consumidores reforestan (Fundación Solar, 2013). Ello implica que la leña representa el combustible con mayor consumo en el país. Una de las industrias que le utiliza es la industria panificadora.

Si la eficiencia va ligada a su contenido de humedad y si se utiliza la energía solar para el proceso de secado, surge la pregunta principal de investigación, ¿se podrá optimizar el proceso de secado solar de leña a través de la energía solar para su uso como biocombustible en la industria panificadora?

Ligado a la pregunta anterior, ¿bajo cuál condición de humedad inicial se obtiene e inicia el proceso de secado tradicional la leña que después será utilizada en la industria panificadora como combustible?, ¿a cuál condición de humedad final se llega tras el proceso de secado que se utiliza actualmente?

El contenido de humedad de la leña utilizada como biocombustible debe de ser estudiado con base en las condiciones climáticas de la región, el período y forma de almacenamiento y su efecto relacionado al consumo durante el proceso. Con base en los resultados, se puede proponer métodos para el control de la misma.

Entre estos métodos se encuentran las cámaras de secado solar de madera, pero, ¿con qué materiales y con cuáles dimensiones se construye este tipo de tecnología?

Con base en modelos consultados, estudiando los materiales que se utilizan en su fabricación y analizando las alternativas del mercado nacional, se

puede proponer un listado de materiales. El volumen de la cámara está en función del volumen de consumo del biocombustible en la industria panificadora estudiada.

Para diseñar adecuadamente la cámara, se debe de entender previamente el funcionamiento de la misma, con lo que surge la pregunta: ¿cuáles son las condiciones de operación del equipo de secado de leña?

Con las variables de secado de madera definidas, delimitadas y estudiadas, se construyó un modelo de cámara de secado solar de leña y se puso en operación.

Después de la construcción de la cámara y su puesta en marcha, ¿qué diferencias se obtienen en comparación con los procesos de secado utilizados actualmente?, ¿a qué costo y qué beneficio económico se puede obtener?

Al finalizar el estudio entre condiciones de secado tradicional y secado con cámara solar, se realizó un comparativo de variables de humedad y tiempo de secado de trozas utilizadas como combustible durante el proceso estudiado. Ello determinó las conclusiones de la implementación, costos y la validez del desarrollo del método.

La investigación propuesta pretende desarrollar un modelo para secado de madera que se utilizará como biocombustible utilizando la energía solar. El diseño de la cámara pretende utilizar la transferencia de calor por convección aprovechando el flujo de masas de aire en su interior, incrementando la temperatura interna y reduciendo el contenido de humedad de las trozas de madera. La línea de investigación referida en este trabajo es Energía Aplicada a Energía Renovable y no Renovable, Consumo doméstico; GLP, Leña y otros.

Los posibles beneficiarios del estudio son: productores de leña, quienes pueden ofrecer un producto en mejores condiciones para aporte de capacidad calórica; artesanos que utilicen hornos cuyo combustible es leña, tales como ladrilleros y panaderos, esperando resultados de mejor aprovechamiento del recurso en cantidad de consumo y tiempos. Inclusive puede ser de utilidad para el uso de la leña como combustible de calderas industriales a base de biomasa.

Este estudio también aporta datos de curvas de secado y las correlaciones del diseño del secador para posibles reproducciones por parte de fabricantes de equipos. Estos datos también aportan conocimiento para futuros estudios de manejo de biocombustibles.

OBJETIVOS

General

Establecer un modelo de secador solar para optimizar las condiciones de secado de leña a ser utilizada como biocombustible en una industria panificadora, ubicada en el municipio de San Lucas Sacatepéquez.

Específicos

1. Determinar las condiciones iniciales y finales de humedad de la leña obtenidas durante el proceso de secado actual.
2. Determinar los materiales y las dimensiones del modelo a construir para el secado de trozas.
3. Determinar las condiciones de operación del modelo de secado de leña.
4. Realizar un comparativo de los resultados obtenidos del proceso propuesto contra las condiciones actuales.
5. Realizar un análisis de costos ligados a la implementación del modelo.

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

La investigación realizada es de tipo correlacional, comparando los datos que se obtienen a partir del secado tradicional de leña contra el secado utilizando la cámara solar.

Actualmente, en la panadería San Antonio, ubicada en el municipio San Lucas Sacatepéquez se utiliza leña como biocombustible. La leña utilizada se seca utilizando el tradicional método “al aire libre”. Por medio de entrevista con el propietario, señor Juan Carlos Cabrera, se determinó las especies utilizadas como combustible, el proceso de combustión actual, y su rendimiento. A partir de toma de muestras, se determinó la humedad actual y tiempo de secado de las trozas incineradas.

Al conocer la ubicación de la panadería y considerando realizar la construcción del secador solar en el área, se realizó el análisis estadístico de las variables meteorológicas precipitación, humedad relativa, nubosidad, temperatura y velocidad del viento de la estación INSIVUMEH más cercana, con ello se determina los valores característicos para el diseño, apoyándose en software INFOSTAT para los datos. Con las series históricas de datos y los valores característicos media, desviación estándar, valor mínimo y valor máximo, en la ubicación de la fábrica se procedió a realizar el diseño de la cámara de secado.

Se tomó una tarea de leña como volumen de estudio característico para el dimensionamiento de la cámara de secado. La misma se colocó en la ubicación conveniente de manera tal que el colector de aire y la ventila interna están

dispuestas a favor de la dirección del viento; las trozas se orientan de manera que favorezcan el flujo interno para secado; el techo colector de energía solar queda dispuesto para favorecer las horas de sol y el dren de exceso de humedad (drenaje francés) es adecuado a sus requerimientos. Los procedimientos de diseño se describen detalladamente en el marco teórico.

Implementando el uso de materiales adecuados: madera, lámina galvanizada lisa, nylon plástico, vidrio liso 3 mm de espesor, PVC 3" para dren de aire húmedo; disponiéndoles de acuerdo a los requerimientos del diseño y en la ubicación consensuada, se construyó la cámara utilizando herramienta manual y el personal necesario.

El proceso de aporte de energía solar para optimizar el proceso de secado de las trozas se realizó durante un período de treinta días. Utilizando una balanza se determinó el peso bruto húmedo, y posterior a un día de aporte de energía (reducción de contenido de humedad) dentro de la cámara de secado se determinó el peso bruto seco. Estos valores acumulativos disminuyendo día con día determinaron el porcentaje de humedad final de la leña. Éste proceso se realizó de igual manera con trozas en secado tradicional.

A partir de los datos obtenidos se tabularon los resultados y se realizaron comparaciones estadísticas para evidenciar si el proceso de secado es más efectivo, ello por medio de curvas de secado en las especies estudiadas superponiendo los métodos cámara de secado y tradicional de contenido de humedad versus tiempo. El proceso se realizó por medio de software Microsoft Excel.

Al finalizar la implementación y comparación entre métodos, se realizó un resumen de costos y cuantificación de materiales a utilizar. Además, se realizó

una evaluación de inversión financiera calculando Valor Actual Neto y Tasa Interna de Retorno para un período de vida de 10 años del modelo, tomando como agregado un espacio físico, actualmente cuarto de secado, con un fin diferente, y que, de acuerdo a la especie y a la continuidad del proceso, puede obtenerse un producto para venta.

INTRODUCCIÓN

El biocombustible de mayor uso en el país, la leña, se seca por medios tradicionales en diferentes condiciones atmosféricas variables acordes a la región en donde se realice el proceso de secado y a la época del año. Éste proceso resulta en un contenido de humedad final cercano a la humedad ambiente de la región y usualmente mayor al deseado para obtener su mayor capacidad calórica.

En el capítulo uno se define la transferencia de calor como la base del proceso de secado, así como los conceptos calor, temperatura y capacidad calórica, ligados al proceso y los tipos de transferencia de calor conducción, radiación y convección.

Durante el proceso de incineración de leña, el aprovechamiento de la capacidad calórica se utiliza inicialmente para reducir el propio contenido de humedad de cada troza (reflejado junto a otras sustancias en la emisión de humo), y después de reducir la humedad aporta su capacidad calórica al fin primordial inicial (cocinar, secar, entre otros).

En la segunda sección del capítulo uno se evidencia el uso de leña como biocombustible y sus características intrínsecas. La leña tiene características variables de acuerdo a su especie, para el proceso de secado es de gran interés su densidad. El interesado le adquiere de maneras diferentes, ya sea comprándola o cortándola; mientras más reciente sea su corte mayor será su contenido de humedad (en forma de agua libre, agua de saturación y agua de constitución). Además, su aporte de capacidad calórica será de mejor eficiencia

cuanto mejor sea el horno en que se utilice y menor el contenido de humedad de las trozas.

Debido a ello, el fin es disminuir el contenido de humedad de la leña utilizada como biocombustible aprovechando el uso de la energía solar previo a ser incinerada. La energía acumulada en un espacio confinado, puede ser conducida para aportar al proceso de secado y disminuir el tiempo del mismo. Ello se debe a la transferencia de calor (en convección, radiación y conducción) entre sustancias de mayor temperatura hacia las de menor temperatura. La extracción de la humedad contenida en las trozas es variable dependiente de la temperatura, humedad del ambiente y velocidad del aire, considerando que el secado será de tipo artificial.

En la tercera sección del capítulo uno se define la energía solar y su contribución como fuente de energía renovable hacia el proceso de secado. La energía solar es variable de acuerdo a las múltiples condiciones atmosféricas, se ve influenciada directamente por la nubosidad y los regímenes de lluvia. La captación de la energía puede ser por radiación directa, radiación difusa y radiación reflejada; cuya suma se considera como radiación total y tiene mejor incidencia de acuerdo al ángulo de inclinación entre la superficie de captación y los rayos solares.

En la cuarta sección del capítulo uno se analiza modelos construidos en otros lugares del mundo utilizando la fuente de energía solar para realizar el proceso de secado artificial de madera. Los modelos son para mayores volúmenes y con el fin de secar trozas para madera, además de utilizar equipos ajenos a la fuente inicial, tal como ventiladores y extractores de aire.

En la primera sección del capítulo dos, se evalúa el secado tradicional realizado actualmente en la panadería San Antonio. El contenido de humedad que se utiliza en la industria panificadora actualmente es elevado (cercano al 73,0 %).

En la segunda sección del capítulo dos, se realiza el estudio estadístico de variables meteorológicas, según información proporcionada por INSIVUMEH en la estación meteorológica Suiza Contenta, la más cercana al área de estudio e implementación de la secadora solar. El modelo diseñado, construido y experimentado es de baja temperatura. No utiliza energía eléctrica pretendiendo sea de uso en cualquier región no necesitando conexión al sistema; y utilizando principios físicos de presión para movimiento interno de masa de aire.

En el capítulo tres se muestra el proceso de secado de leña realizado. El proceso se realizó durante 30 días, debido a que ello es lo que se utiliza en la industria panificadora en el secado tradicional y se utilizó tres especies (*quercus tristis*), ciprés (*cupressus lusitánica*) y capulín (*trema micrantha*) utilizadas en la región, entre las cuales hay características diferentes de densidad.

De acuerdo a la curva teórica de secado de madera, se debe de utilizar mayor tiempo de secado para obtener trozas con menor contenido de humedad. Implementando el secador solar, se obtienen resultados diferentes entre las tres especies, siendo el capulín (la de menor densidad) la de mejores resultados (evidenciados en las curvas mostradas).

En el capítulo cuatro se muestra la comparación entre el secado tradicional al aire libre y el secado utilizando la cámara de secado solar. Durante el período de secado las condiciones climáticas fueron adversas a la incidencia de los

rayos solares, evidenciándose días de lluvia y alta nubosidad. Se constata además que el tiempo de secado tradicional utilizado actualmente es un dato aproximado que queda a un mes. En esta sección se muestra que acorde a las curvas teóricas de secado, no se ha finalizado el proceso.

En la segunda sección del capítulo cuatro se muestra la toma de datos de especies que son utilizadas en procesos de incineración en la región, encino (*quercus tristis*), ciprés (*cupressus lusitánica*) y capulín (*trema micrantha*). De acuerdo a la densidad de cada especie, la reacción ante el incremento en energía es diferente.

En el capítulo cinco se muestra el costo de la implementación de la secadora solar y el costo del estudio realizado. Además, se realiza una proyección económica del modelo a una vida útil de diez años. Esta proyección se realizó considerando el aprovechamiento del espacio físico que hoy ocupa el secado tradicional y almacenamiento de leña. La construcción de la secadora solar en la ubicación de operación debe ser en donde la incidencia de rayos solares sea mayor.

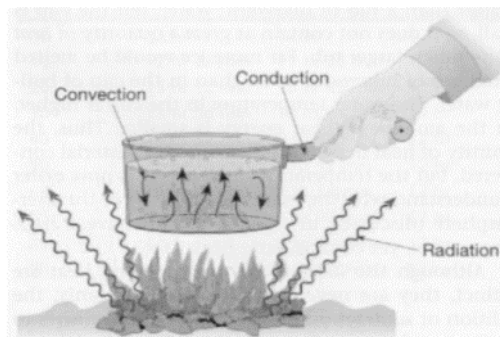
1. MARCO TEÓRICO

1.1. Calor y temperatura

Inzunza (2007) define calor como “la energía cinética total de todos los átomos o moléculas de una sustancia” (p. 364). “Temperatura es una medida de la energía cinética promedio de los átomos y moléculas individuales de una sustancia. Cuando se agrega calor a una sustancia, sus átomos o moléculas se mueven más rápido y su temperatura se eleva” (p. 407).

Según Inzunza (2007) “cuando dos cuerpos con diferentes temperaturas se ponen en contacto entre sí se produce transferencia de calor. La misma ocurre desde el cuerpo con mayor temperatura al de menor temperatura” (p. 407). La transferencia se puede realizar por tres mecanismos físicos que son conducción, convección y radiación.

Figura 1. **Esquema de los mecanismos de transferencia de calor**



Fuente: Inzunza, J. (2007). *Física: Introducción a la mecánica y calor*. Concepción: Chile. Universidad de Concepción. p.408.

Inzunza (2007), indica:

“La conducción de calor es el mecanismo de transferencia a escala atómica a través de la materia por actividad molecular por el choque de moléculas entre sí, donde las más energéticas le entregan energía a las menos energéticas produciendo flujo de calor de temperaturas más altas a más bajas” (p. 408).

“La radiación térmica es energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura dada, produciendo directamente desde la fuente hacia afuera en todas direcciones. Esta energía se produce por los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas constitutivas transportadas por ondas electromagnéticas o fotones” (p. 414).

“La convección es el mecanismo de transferencia por movimiento de masa o circulación dentro de la sustancia. Puede ser natural producida por la diferencia entre densidades de materia o forzada cuando la materia se obliga a moverse de un lugar a otro” (p. 412).

1.1.1. Capacidad calórica

Según Inzunza (2007), la capacidad calórica (C) de cualquier sustancia se define como “la cantidad de calor que se requiere para elevar la temperatura de una sustancia un grado Celsius por cada kilogramo de material” (p. 366). Calor se define por la ecuación:

$$Q = C \Delta T$$

En donde:

Q calor
C capacidad calórica
 ΔT delta de temperatura

A partir de la ecuación anterior se despeja:

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

En donde:

- C capacidad calórica
- Q calor
- ΔT delta de temperatura

La capacidad calórica de cualquier sustancia es proporcional a su masa. La capacidad calórica puede definirse por unidad de masa, lo que se denomina calor específico (c):

$$c = \frac{C}{m}$$

En donde:

- c calor específico
- C capacidad calórica
- m unidad de masa

Para la madera, el calor específico medio medido en J / (kg*K) es 1381. Para la madera de pino el valor es 1298, para la madera de roble es 2386 (Propiedades térmicas de materiales, s.f.).

Debido a que el calor específico de la madera es un dato conocido, y estando en función de su masa, sustituyendo las ecuaciones anteriores resulta la expresión:

$$Q = cm \Delta T$$

En donde:

- Q calor
- c calor específico
- m unidad de masa
- ΔT delta de temperatura

Con esta expresión, se evidencia que al agregar calor a una sustancia la temperatura es positiva, al disminuir el calor a una sustancia, la temperatura es negativa (calor y temperatura tienen el mismo signo).

Si se desconoce el calor específico de cualquier material, según Inzunza (2007), el mismo puede ser calculado por el procedimiento: calentar el material hasta una temperatura conocida; colocar el material entre un envase con volumen y temperatura inicial de agua conocidos; luego medir la temperatura del agua al momento de alcanzar el equilibrio térmico.

Con base en la ley de conservación de la energía, el calor que entrega el material más caliente, cuyo calor específico es desconocido, es igual al calor que absorbe el agua:

$$Q_m = -mc \ T_o \ m - T_f \ m$$
$$Q_{agua} = mc \ T_o \ agua - T_f \ agua$$

Igualando ambas ecuaciones anteriores:

$$Q_m = Q_{agua}$$
$$-mc \ T_o \ m - T_f \ m = mc \ T_o \ agua - T_f \ agua$$

Despejando c del material:

$$c = \frac{cm \ Ti - Tf \ agua}{-m \ Ti - Tf \ material}$$

$$c = \frac{cm \ Tf - Ti \ agua}{m \ Ti - Tf \ material}$$

En donde:

Qm	calor del material
Qagua	calor del agua
m	masa (de material o de agua)
c	calor específico (de material o de agua)
To	temperatura inicial (de material o de agua)
Tf	temperatura final (de material o de agua)

1.2. Uso de leña en Guatemala

“La fuente energética de mayor demanda en Guatemala es la leña, donde se estima que la cobertura vegetal del país es 37 000 km², lo que es equivalente a 34,0 % de la superficie del territorio nacional. Su tasa de deforestación es 2,1 % anual”. (Fundación Solar, 2013, p. 4).

El balance energético nacional muestra que el consumo nacional de leña constituye el 63,0 % del consumo final de energía (Fundación Solar, 2013). Según Montúfar (2012) “el uso de biomasa como combustible alternativo al diésel incrementa en el país cada día, principalmente en los ingenios del país. Cerca del 80,0 % de la energía generada por biomasa proviene de leña” (p. 22).

El quinto eje de la Política Energética 2013-2027 establece acciones para reducir el uso de leña y para masificar el uso de estufas mejoradas en 100 mil hogares. La misma también proyecta incrementar un 10,0 % de la cobertura boscosa y se planifica reducir el 15,0 % del uso industrial de leña en negocios diversos, entre ellos la industria panificadora, la fabricación artesanal de ladrillos y tejas y en el uso de calderas en ingenios. Anualmente se consumen más de 16 millones de metros cúbicos de leña a nivel nacional (MEM, 2013).

Según la Encuesta Nacional de leña (2011) “el 89,1 % de las personas encuestadas utiliza leña como combustible; el 98,1 % de los encuestados consumen leña durante todo el año, entre los cuales el 30,6 % utiliza pino (*pinus*), 18,3 % encino (*quercus tristis*) y 23,0 % no definen la especie” (p. 5).

1.3. Uso de leña como combustible

El consumo de leña se define a partir de su tamaño, dividiéndose los mismos en leños grandes, leños medianos y leños pequeños. Su distribución y pesos se definen en la siguiente tabla:

Tabla I. **Resumen del consumo semanal de leña por tamaño de leño para hogares**

Tamaño del leño	Peso en libras	Consumo semanal promedio en libras
Leño grande	5,00	87,74
Leño mediano	4,47	309,85
Leño pequeño	3,59	397,40
Sumatorias	13,06	794,99

Continuación de la tabla I.

Tamaño del leño	Peso en libras	Consumo semanal promedio en libras
Promedios	4,35	265,00

Fuente: CEPAL, Akianto (2011). *ENCUESTA NACIONAL DE LEÑA CONSUMO DE LEÑA EN HOGARES Y PEQUEÑA INDUSTRIA EN GUATEMALA*. Guatemala. p 25.

Anteriormente se menciona que según la Encuesta Nacional de leña (2011) el 89,1 % de las personas encuestadas utiliza leña como combustible, sin embargo, solo el 5,5 % tiene alguna actividad comercial que utiliza el recurso.

Esta actividad comercial es variada. Según la FAO (2005), estudio realizado en Centro América y México, una distribución del consumo de leña para diferentes industrias es:

Tabla II. **Consumo de leña para diferentes industrias**

Tipo de industria	Consumo	País
Tortillerías	1,4 – 2,0 kg/kg de maíz	México
	1,9 kg/kg de maíz	El Salvador
Panaderías	0,06 kg/kg de harina	Panamá
	2,66 kg/kg de harina	Honduras

Continuación de la tabla II.

Salineras	3,5 kg/kg de sal	Costa Rica
	2,5 – 3,5 kg/kg de sal	Nicaragua
	4,5 kg/kg de sal	El Salvador
	3,53 kg BM/kg de sal	Honduras
Caleras	1,2 kg/kg de cal	Costa Rica
	1,5 kg/kg de cal	Nicaragua
	1,6 kg/kg de cal	El Salvador
	1,2 kg BM/kg de cal	Honduras
Trapiches	1,5 kg/lata de guarapo	Nicaragua
	4,5 kg/kg de dulce	El Salvador
	1,0 kg/kg de panela	Costa Rica
	0,0013 m ³ /kg de panela	Panamá
	1,57 kg BM/kg de dulce	Honduras
Ladrilleras	0,86 – 1,2 kg/ladrillo	El Salvador
	0,6 kg/ladrillo	Guatemala
	0,4 – 0,9 kg/ladrillo	México
	0,36 kg BM/kg ladrillo	Honduras
Alfarerías	1,6 m ³ /100 objetos	Honduras
	3001 800 kg/mes (13 m ³ /mes)	México
Producción de carbón	6,5 kg/kg	Honduras
Ingenios azucareros y destilerías	0,015 m ³ /909 kg de azúcar	Honduras
Beneficios de café	0,002 – 0,011 m ³ /kg de café	Costa Rica
	0,34 kg BM/kg de café	Honduras

Continuación **de la tabla II.**

Secado de hojas de tabaco	0.19 m ³ /kg de hojas de tabaco	Honduras
	3.66 kg BM/kg de tabaco	Honduras

Fuente: *Uso eficiente y sostenible de la energía.* Boletín de servicios agrícolas de la FAO 2005.

p. 92

1.3.1. Densidad de la madera

Densidad se define como “la razón de masa de un material entre una unidad de volumen”. En el sistema internacional de medidas, su unidad es kg / m³ (Propiedades térmicas de materiales, s.f., ¶ 1).

En relación a madera, su densidad media es 840 kg/m³, para la madera de pino es 650 kg/m³, para la madera de roble (encino) es 850 kg/m³ (recuperado de <http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/Quimica/PropiedadesTermicas.asp>).

1.3.2. Conductividad térmica

Conductividad térmica se define como “la capacidad de un material para transferir calor” (Propiedades térmicas de materiales, s.f., ¶ 3). Es el fenómeno por el cual el calor se transporta de regiones de alta temperatura a regiones de baja temperatura dentro de un mismo material o entre cuerpos diferentes. En el sistema internacional de medidas, su unidad es W/(m*K), aunque se expresa también en kcal/(h*m*°C) (relación 1 a 0,86) (Propiedades térmicas de materiales, s.f.).

En relación a madera, la conductividad térmica media es 0,13 W/(m*K), para la madera de pino es 0,163 W/(m*K) y para la madera de roble (encino) es 0,209 W/(m*K) (recuperado de <http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/Quimica/PropiedadesTermicas.asp>).

1.3.3. Difusividad térmica

La difusividad térmica se refiere a “la rapidez con la que varía la temperatura del material ante una solicitud térmica” (Propiedades térmicas de materiales, s.f., ¶ 4) (tal como una variación brusca de la temperatura en la superficie). En el sistema internacional de medidas su unidad es m^2 / s (Propiedades térmicas de materiales, s.f.).

En relación a madera, la difusividad térmica media es $0,112 * 10^{-6} m^2/s$, para la madera de pino es $0,193 * 10^{-6} m^2/s$ y para la madera de roble (encino) es $0,103 * 10^{-6} m^2/s$ (recuperado de <http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/Quimica/PropiedadesTermicas.asp>).

1.4. Eficiencia energética de hornos de leña

La eficiencia en el consumo del combustible depende principalmente del diseño del horno.

Según Montúfar (2012), tomando como ejemplo las fábricas de ladrillos (mayoría) no cuentan con la tecnología adecuada para conservar y potenciar el calor en los hornos utilizados en la cocción, por lo que requieren de grandes cantidades de leña.

El tamaño de los hornos es variable y también la cantidad de material que es posible quemar. La cantidad de leña a consumir es una variable dependiente del tamaño del horno (Montúfar, 2012).

1.5. Humedad contenida en la madera

La humedad en un árbol recién cortado, contiene una cantidad de agua relativamente alta, la cual varía de acuerdo a la época del año, región de procedencia y especie forestal. Las maderas livianas son más porosas, por lo que contienen una mayor cantidad de agua que las maderas pesadas. Entre las partes del tronco, la albura (conformada por células cuya función es conducir agua) presenta mayor contenido de humedad del duramen; debido a ello el contenido de agua es variable entre las paredes de un árbol vivo (Luna, C., Cruz, C., 2003).

Según Luna y Cruz (2003) “el agua contenida en la madera se puede encontrar en tres formas diferentes: agua libre, agua de saturación y agua de constitución” (p. 37).

Luna y Cruz (2003) indican:

“El agua libre es el agua que da a la madera su condición de verde, ocupando las cavidades celulares. Su cantidad se delimita por el volumen de los poros. Cuando se realiza el proceso de secado, se pierde por evaporación; este proceso ocurre fácilmente ya que las fuerzas capilares que le retienen son débiles (p. 37).

Cuando se evapora toda esta forma de agua, la madera llega al punto de saturación de las fibras (variable entre 21,0 % y 32,0 % (Luna, C., Cruz, C., 2003)). En esta condición, las paredes celulares se encuentran saturadas de agua y sus cavidades vacías. En esta fase de secado, no hay cambios de dimensión ni alteración en las propiedades mecánicas.

“El agua de saturación es el agua contenida en las paredes celulares. Durante el secado, posterior a evaporar el agua libre, el proceso continúa con mayor lentitud hasta llegar al estado de equilibrio higroscópico con la humedad relativa de la atmósfera dependiendo del lugar donde se realiza el secado” (para la mayoría de especies, éste se encuentra entre 12,0 % y 18,0 %) (Luna, C., Cruz, C., 2003, p. 38). Cuando la madera se seca al aire libre solo puede alcanzar este valor de humedad de equilibrio. Para un contenido de humedad menor debe realizarse secado artificial (para eliminar agua de saturación).

“El agua de constitución es el agua que forma parte de la materia celular de la madera. No puede ser eliminada utilizando técnicas normales de secado. Separarle implica destrucción parcial de la madera” (Luna, C., Cruz, C., 2003, p. 38).

1.5.1. Determinación del contenido de humedad en la madera

Según Luna y Cruz (2003) el contenido de humedad se calcula considerando los valores de agua libre y agua de saturación. La madera se considera totalmente seca al momento en que se seca en estufa y alcanza un peso constante. El contenido de humedad en base húmeda se define como el peso de cantidad de agua presente en una pieza de madera cuyo peso suma agua y peso propio expresado en porcentaje.

Para determinarla se utiliza la siguiente expresión:

$$\% H = \frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100$$

En donde:

% H Porcentaje de humedad

Ph Peso húmedo

Ps Peso seco

1.6. Bases físicas del secado de madera

Según Luna y Cruz (2003), el proceso de secado de madera, ya sea de forma natural como artificial, se refiere a la extracción de la humedad contenida en la madera por evaporación. “La velocidad de la evaporación se controla por medio de la temperatura, humedad del ambiente y velocidad del aire” (p. 41).

En proceso de evaporación, cuánto más se eleva la temperatura mayor será la evaporación; ello se debe a que el aire absorbe más humedad. El calor es la fuente de la cual las moléculas de agua contenidas en la madera adquieren la energía cinética necesaria para evaporar.

En secado artificial, el calor se transmite a la madera por convección. Al no haber radiación directa, la superficie de la madera no produce una diferencia significativa en la circulación del aire. En secado natural (al aire libre), la temperatura superficial sobre las piezas de madera puede ser muy superior a la temperatura del aire en circulación, por lo cual las condiciones son muy severas, repercutiendo en defectos de torceduras, grietas, rajaduras, entre otros.

La velocidad del aire dentro de una pila de madera tiene como función transmitir la energía requerida para calentar el agua contenida en la madera para facilitar su evaporación y transportar la humedad saliente de la madera. La circulación del aire actúa sobre la velocidad de evaporación del agua durante el secado. Experimentalmente se obtienen condiciones óptimas de secado cuando “el aire circula dentro de una pila a una velocidad relativamente alta, en

maderas de mayor densidad y secado lento se recomienda 2,0 m/s. La velocidad no debe ser menor de 1,0 m/s, ya que si es menor el secado es ineficiente, con velocidad mayor a 2,0 m/s pueden causar grietas en la madera” (a tomar en cuenta cuando el fin no es biocombustible) (Benítez y Calderón, 1993, citado en Salas, Moya y Córdoba, 2008, p. 7).

Al bajar el contenido de humedad debajo del punto de saturación se puede reducir la velocidad del aire.

En madera recién aserrada, la distribución del contenido de humedad es relativamente uniforme. Al momento de iniciar el secado (natural o artificial) esta se modifica. El secado de madera es el resultado del movimiento de humedad desde el interior hasta la superficie en donde se evapora. Mientras mayor sea la diferencia entre el contenido de humedad en el centro y en la superficie (gradiente de humedad) más rápido será el secado de madera. Si el gradiente es bajo, el tiempo de secado aumenta.

1.6.1. Proceso de secado de la madera

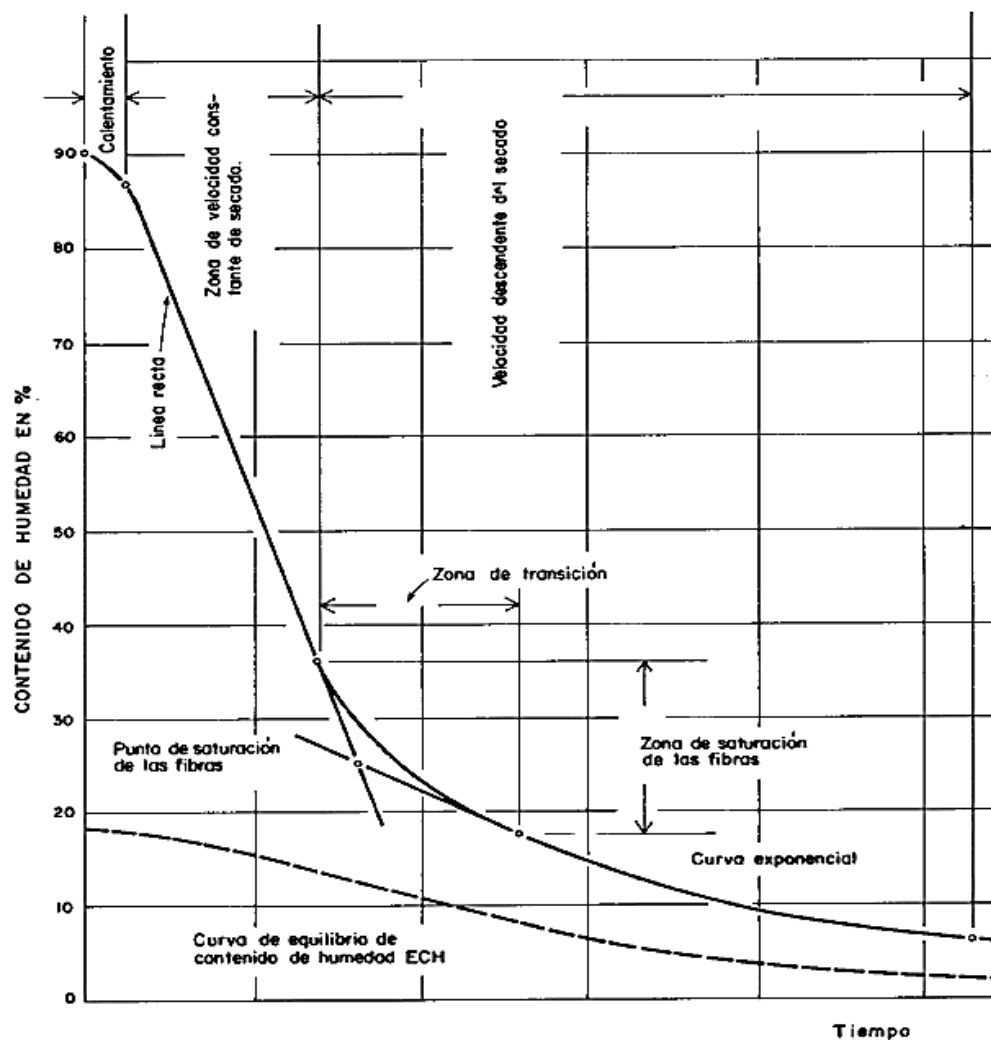
Las leyes que regulan este proceso son de naturaleza diferente, son dependientes del contenido de humedad de acuerdo al punto de saturación de las fibras.

Luna y Cruz (2003) indican:

“Arriba del punto de saturación bajo condiciones estables de temperatura y humedad relativa del aire, permanece constante y el movimiento de agua libre líquida es debido a fuerzas capilares, las cuales durante la evaporación no se producen dentro de la madera” (solo distribución del contenido de humedad hacia el interior de las trozas). (p. 45).

“Debajo del punto de saturación, la permeabilidad de la estructura microscópica de la madera interviene en el proceso de remoción de agua” (Luna, C. Cruz, C., 2003, p. 45). La misma se ilustra en diferentes zonas de acuerdo a la siguiente figura:

Figura 2. Curva teórica de secado



Fuente: Manual del Grupo Andino para el secado de Maderas, mencionado en Luna, C., Cruz, C (2003). *Diseño y construcción de un secador para maderas con energía solar*. (Tesis de grado). Ecuador. Universidad Tecnológica Equinoccial. p. 46

1.7. Radiación solar

La Agencia Valenciana de la Energía (s.f.), afirma que: “la energía del sol llega a la tierra en forma de ondas electromagnéticas que se propagan en todas las direcciones. Las ondas electromagnéticas se caracterizan por la frecuencia con que la onda se repite completamente por unidad de tiempo” (p. 19).

“La longitud de onda es el cociente entre la velocidad de la luz y la frecuencia. Cuanto más pequeña sea la longitud de onda más grande será la frecuencia y más energía se transportará” (p. 19).

1.7.1. Constante solar

“Es la intensidad de flujo de radiación solar que incide sobre una unidad de superficie en un plano tangente a la esfera imaginaria formada por la capa externa de la atmósfera” (Agencia Valenciana de la Energía, s.f., p. 19).

Según la Agencia Valenciana de la Energía (s.f.) éste valor corresponde a $1\,367\text{ W/m}^2$ con una varianza de $\pm 7\text{ W/m}^2$ debido a la órbita elíptica de la tierra.

1.7.2. Componentes de la radiación solar

Según Agencia Valenciana de la Energía (s.f.), se enumeran tres fenómenos físicos:

- Reflexión: “una parte de la radiación se refleja en la parte superior de las nubes” (p. 20).

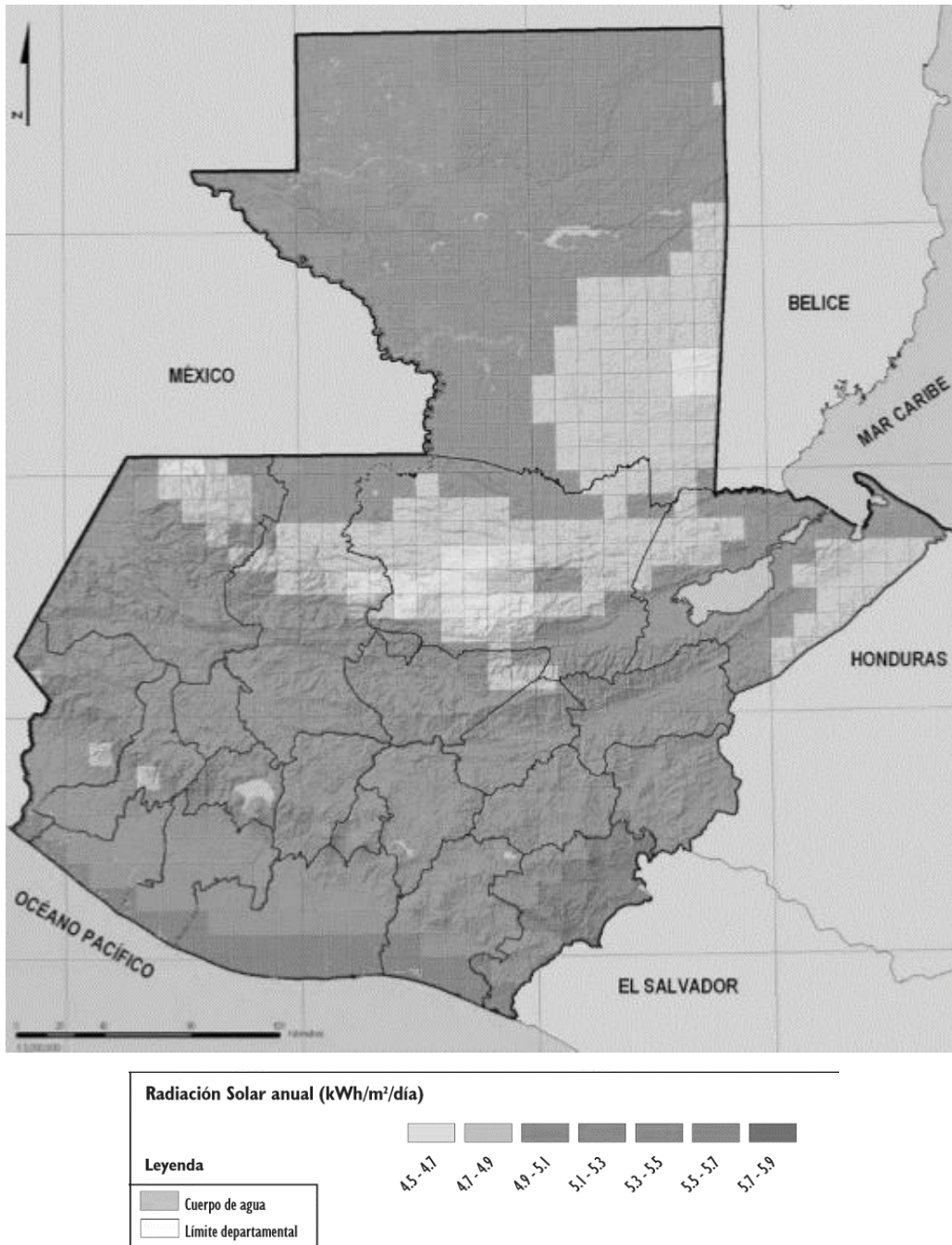
- Difusión: “los rayos solares chocan con las moléculas gaseosas y partículas de polvo difundiéndose en todas direcciones, de forma que vuelve al espacio” (p. 20).
- Absorción: “una parte de la radiación es absorbida por las moléculas presentes en la atmósfera” (p. 20).

Como consecuencia a los fenómenos físicos descritos anteriormente, un objeto que se encuentre en la superficie de la tierra recibe tres tipos de radiación (Agencia Valenciana de la Energía, s.f.):

- Radiación directa: “aquellos rayos que alcanzan la superficie de la tierra sin ser desviados. Esta radiación en días nublados es muy pequeña y provoca sombras” (p. 20).
- Radiación difusa: “la que llega a la superficie terrestre después de haber cambiado varias veces de dirección al atravesar la atmósfera. A mayor nubosidad más importante es la radiación difusa” (p. 20).
- Radiación reflejada: “la parte de radiación reflejada por el terreno y otros elementos de la superficie terrestre y que puede ser reabsorbida por otros objetos. Al cociente entre la radiación reflejada y la incidente en la superficie terrestre se le llama albedo” (p. 20).

La suma de los tres tipos de radiación se denomina radiación total. (Agencia Valenciana de la Energía, s.f.). “En días despejados la radiación directa será mucho mayor que la difusa. La radiación difusa puede llegar en un porcentaje de 10-15 % en días claros y hasta 95 % en días nublados. A lo largo del año la radiación difusa supone aproximadamente un tercio de la radiación total que llega a la superficie terrestre” (p. 20).

Figura 3. Mapa de radiación solar de la República de Guatemala



Fuente: IARNA (2006). *Perfil Ambiental de Guatemala: Tendencias y reflexiones sobre la gestión ambiental*. Guatemala. Universidad Rafael Landívar. p. 182.

La Agencia Valenciana de la Energía (s.f.), indica:

“La cantidad de radiación directa que una superficie recibe depende del ángulo formado entre ésta y los rayos solares incidentes. Si la superficie está situada perpendicularmente a los rayos solares la radiación directa será máxima, disminuyendo a medida que aumenta el ángulo que forman los rayos con la normal al plano en que inciden” (p. 21).

Según la Agencia Valenciana de la Energía (s.f.) para definir la energía solar que llega a una superficie se utilizan:

- Irradiancia (I): “potencia solar incidente por unidad de superficie sobre un plano dado. Se expresa en W/m^2 ” (p. 20).
- Irradiación (E): “energía incidente por unidad de superficie sobre un plano dado, obtenida por integración de la irradiancia durante un intervalo de tiempo dado, normalmente una hora o un día. Se expresa en kWh/m^2 ” (p. 20).

1.7.3. Movimiento solar

Al instalar un colector solar, el objetivo es captar la máxima radiación solar. Los factores clave del adecuado funcionamiento de las instalaciones son la inclinación y orientación y las posibles sombras a proyectar sobre el colector solar (Agencia Valenciana de la Energía, s.f.).

La tierra efectúa una rotación completa sobre sí misma en un día, saliendo habitualmente el sol por el Este y ocultándose por el Oeste. Definir la posición del sol en cada instante desde un punto en la tierra requiere de utilizar coordenadas de azimut solar (ángulo de giro del sol con respecto al sur geográfico medido desde un plano horizontal) y altura solar (ángulo que forman

los rayos solares sobre la horizontal; variable a lo largo del día y época del año) (Agencia Valenciana de la Energía, s.f.).

La Agencia Valenciana de la Energía (s.f.), indica:

“El sol sale desde la horizontal para llegar a su altura máxima al medio día solar y luego ir disminuyendo hasta que se pone por el oeste. Además, cada día del año el sol alcanza una altura diferente consiguiendo la altura máxima durante el solsticio de verano (21 de junio en el hemisferio Norte) y la altura mínima durante el solsticio de invierno (21 de diciembre en el hemisferio Norte) (p. 22).

Según la Agencia Valenciana de la Energía (s.f.) para determinar la posición de un objeto en la tierra se utilizan los parámetros:

- Latitud: “ángulo que forma la vertical de un punto de la superficie de la tierra y el plano del ecuador. Se considera positiva en el hemisferio norte y negativa en el hemisferio sur” (p. 22).
- Longitud: “arco del ecuador comprendido entre el meridiano de un lugar y un meridiano de referencia, el meridiano de Greenwich” (p. 22).

1.8. Cámaras para secado solar de madera

El secado solar de madera constituye un mecanismo de transferencia de calor por convección.

El secado solar de madera pretende que mediante el uso de un colector plano la radiación se convierta en energía térmica. “Esta energía alcanza los 60°C. Comparado con secado al aire libre, el secado solar reduce entre 2 y 5 veces el tiempo para obtener el contenido de humedad por debajo de la humedad equilibrio del lugar” (Luna, C., Cruz, C., 2003, p. 48). El funcionamiento y eficiencia de los secadores dependen de su construcción, el

diseño que permita captar en mejor forma la energía térmica emitida por la radiación solar. La orientación del techo y del colector debe de ser de tal manera que la incidencia de los rayos solares evite la reflexión y aumente la refracción. Esta orientación depende de la ubicación del secador en el globo, pero se recomienda no variar más de 4° durante el año y sus estaciones.

El principio de funcionamiento es: calentar el aire en lo interno del secador, y circular el aire calentado entre la madera. La masa de aire caliente circula continuamente a través de las piezas para calentarles. Se eleva la temperatura de las piezas y libera el agua libre, lo que permite descender el contenido de humedad (Salas, Moya y Córdoba, 2008).

1.8.1. Diseño de secadores solares de madera

Según Salas, Moya y Córdoba (2008) las cámaras de secado se dividen en dos partes fundamentales: área de elevación de temperatura, que es la responsable de calentar el aire y área de apilado, donde se colocan las trozas a secar.

Díaz (2005), indica:

“La inclinación del techo, para el hemisferio norte, debe ser con dirección sur. Su grado de inclinación para mayor captación de radiación solar es una variable de acuerdo a la latitud del país (de 5° a 10° menos que la latitud). Se recomienda una inclinación superior a los 15° por razones de escurritía. La posible pérdida de aprovechamiento varía entre 5,0 % y 10,0 % de acuerdo al cambio de inclinación” (p. 24).

La determinación del tamaño óptimo de la cámara de secado está en función de la demanda de volumen de madera de la industria para la cual se proyecta. Según la experiencia vista en Honduras (Benítez y Calderón, 1993,

citado en Salas, Moya y Córdoba, 2008) construir un secador para volumen superior a 15 m³ no es conveniente, ya que cuanto más grande sea la cámara de secado, menor es su eficiencia. (Salas, Moya y Córdoba, 2008).

Además, se considera el ancho de la cámara, ya que el diseño del flujo debe de garantizar uniformidad en la circulación de la masa de aire a través de la madera apilada que se desea secar, quedando el mismo convenientemente restringido a menos de 5,0 m de ancho. (Salas, Moya y Córdoba, 2008).

Figura 4. **Secador solar del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago**



Fuente: Salas, C., Moya, R., y Córdoba, R. (2008). Diseño y construcción de un secador solar para madera. *Kurú: Revista Forestal*. 5. Consultado el 24 de junio, 2015. En: <http://www.tecdigital.itcr.ac.cr/servicios/ojs/index.php/kuru/article/viewFile/424/355>.

Otro aspecto importante a considerar durante la construcción de un secador solar es evitar al máximo la pérdida de calor, lo que debe de lograrse a partir del aislamiento de calor. Ello va ligado a la selección del material adecuado y un riguroso método constructivo. En Honduras según Benítez y

Calderón (2003) citada en Salas, Moya y Córdoba (2008), la experiencia indicó que debe de garantizarse como mínimo un delta de 10°C entre interior y exterior de la cámara de secado.

El techo de la cámara se recomienda debe ser de un material transparente. El material recomendado para ello es el vidrio. Además las paredes deben de ser fabricadas con madera, block, ladrillo, hierro galvanizado, entre otros. Si las paredes son fabricadas con madera o hierro, dependen de un aislante térmico para evitar la fuga de temperatura, recomendándose la fibra de vidrio. (Salas, Moya y Córdoba, 2008).

Figura 5. **Secador solar de la Universidad Autónoma de Chapingo, México**



Fuente: Fuentes, M., Luna, D., Osorio, J., Corona, J. (2003). Construcción y validación de un secador solar para madera aserrada. [Versión electrónica]. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del ambiente*, 9. p. 172.

Otro prototipo para la cámara, es el propuesto por la Universidad Autónoma de Chapingo, Estado de México. Este modelo propone una construcción de tipo invernadero utilizando como materiales estructura metálica,

como colector solar lámina negra calibre 14 y bastidores de madera cubiertos con malla de alambre y plástico de invernadero. (Fuentes, Luna, Osorio, y Corona, 2003).

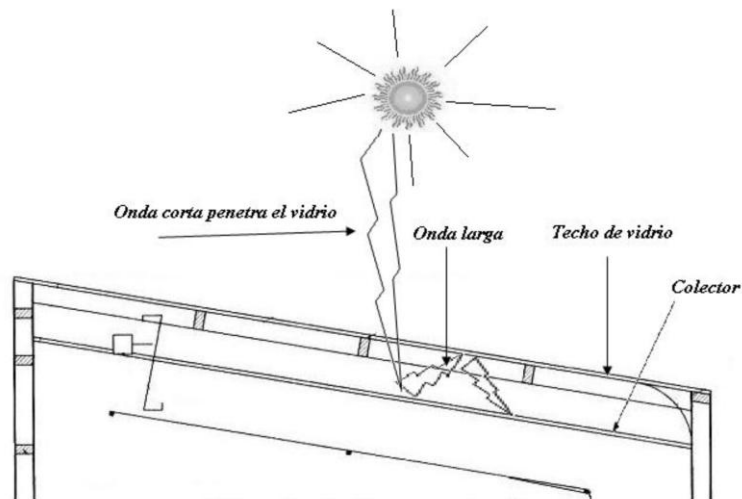
Entre ambos modelos, existe un principio de funcionamiento en común, elevar la temperatura del aire en el interior, trabajar con aislamiento para evitar la pérdida de temperatura, tener un suministro de aire fresco y una salida de aire que se encontraba en interior, circulación de aire en el interior de la cámara de secado por medio de abanicos o ventiladores para la continuidad del flujo.

Los componentes de la secadora según Salas, Moya y Córdoba (2008) son:

- Techo: componente a través del cual se capta la energía que elevará la temperatura del aire interno de la cámara que es el responsable de secar la madera. “La energía atraviesa el techo en forma de onda corta, ya no pudiendo salir porque se ve reflejado como onda larga quedando atrapado y produciendo un efecto invernadero en el interior de la cámara” (p. 6).
- Colector: ubicado entre el techo y la pila de madera. “Su función es capturar la energía solar, la cual se convierte en calor y se transmite al aire, con lo cual el aire eleva su temperatura” (p. 7).
- Ventiladores o abanicos: componente que sirve para poner en movimiento en el interior de la cámara de secado la energía solar capturada en el colector. “Permite que el aire caliente circule entre la pila húmeda de madera y absorbe la humedad de las trozas de madera, dando paso al secado. La velocidad mínima del aire que pasa a través de la pila de madera para que el secado sea eficiente es de 1,0 m/s” (Benítez y Calderón, 1993, citado en Salas, Moya y Córdoba, 2008, p. 7).

- Ventiladas o ventanas: componente cuya función es la de retirar el aire caliente saturado, el cual puede detener el proceso de secado. “Las ventiladas deben de permanecer cerradas y abrirse cuando la humedad relativa interna de la cámara es mayor que la externa” (p. 7).

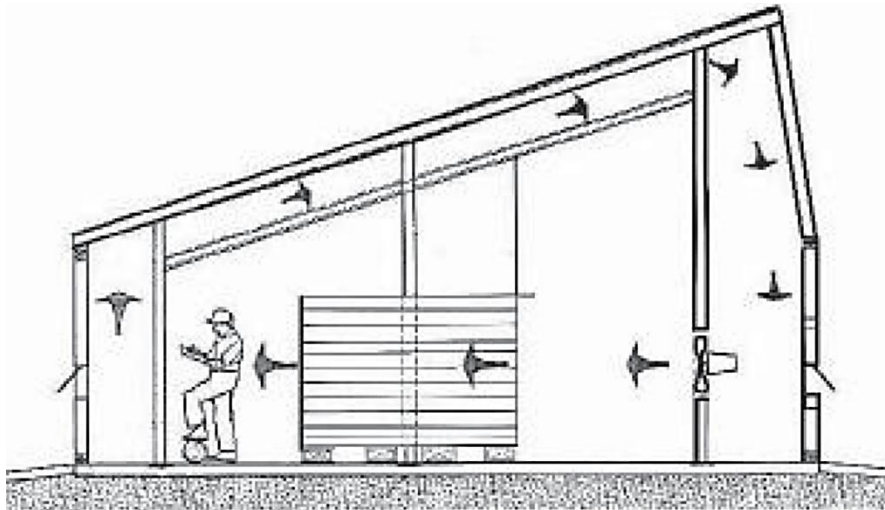
Figura 6. **Efecto invernadero ocasionado por la incidencia de rayos solares**



Fuente: Salas, C., Moya, R., y Córdoba, R. (2008). Diseño y construcción de un secador solar para madera. *Kurú: Revista Forestal*. 5. Consultado el 24 de junio, 2014. En: <http://www.tec-digital.itcr.ac.cr/servicios/ojs/index.php/kuru/article/viewFile/424/355>.

La figura 6 muestra el efecto invernadero que ocurre en el colector solar. Las ondas solares directas, difusas y reflejadas atraviesan el techo de vidrio y se reflejan sobre una superficie de hierro (modelo propuesto por Salas, Moya y Córdoba). De igual manera se evidencia que al colector solar estar en el techo del secador, es necesario implementar impulsores (ventiladores) que utilizan energía eléctrica para trabajar mecánicamente.

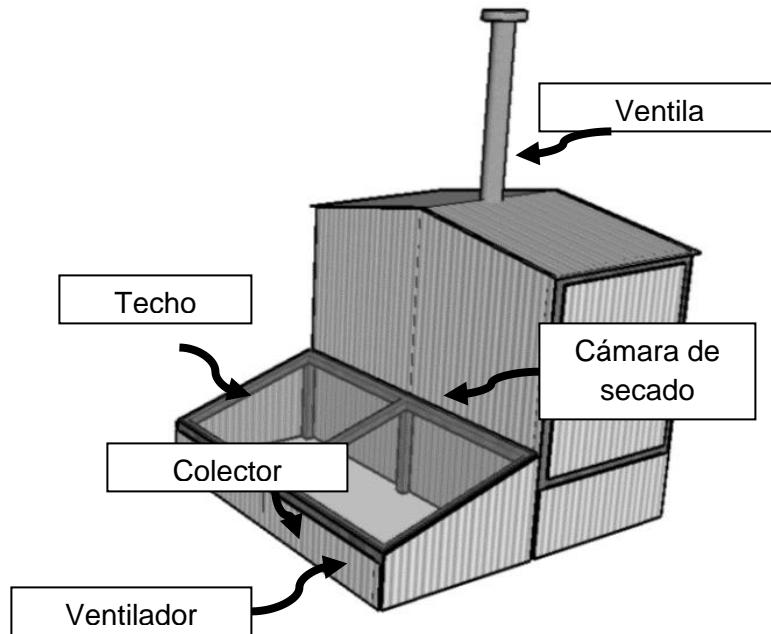
Figura 7. Diagrama del proceso de circulación de aire y perfil de secador solar



Fuente: Fuentes, M., Luna, D., Osorio, J., Corona, J. (2003). Construcción y validación de un secador solar para madera aserrada. [Versión electrónica]. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del ambiente*, 9. p. 175.

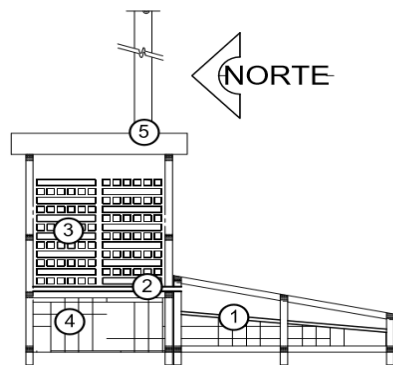
La figura 7 muestra el diagrama de circulación de aire en el interior del secador propuesto Chapingo, México. Éste modelo es de tipo invernadero, tiene el colector solar en el techo y el impulsor se encuentra en el acceso hacia la cámara de secado. Se evidencian las ventilas para renovación de aire.

Figura 8. Esquema de secador solar propuesto y sus componentes



Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Esquema de proceso de secado



- (1) El aire húmedo ingresa al colector solar proveniente del ambiente. En el interior del colector se produce un incremento de la temperatura del aire debido al efecto invernadero que ocurre en su interior por la influencia del sol .-
- (2) El aire con mayor temperatura, debido a la física de gases en diferentes ambientes de presión y temperatura, por medio de ventanas pasa a la cámara de secado en donde incrementará gradualmente la temperatura interna .-
- (3) El aire con mayor temperatura pasa entre las trozas de leña húmedas dispuestas en la cámara de secado. Se realiza entre ellas una transferencia de calor por convección, reduciendo así el contenido de humedad de las trozas. el agua retirada y condensada precipita y el aire caliente sigue su flujo hacia las áreas de menor temperatura y mayor presión en la cámara de secado .-
- (4) Capa de aire en el interior de la cámara de secado. Su función es mantener la temperatura interna de la cámara y el dren del agua precipitada hacia su salida por medio de pañuelos en la superficie de suelo .-
- (5)Ventila de aire húmedo. Se retira cuando su humedad es mayor a la del ambiente .-

Fuente: elaboración propia.

2. FASE EXPERIMENTAL

2.1. Análisis de la situación actual de secado de leña utilizada como combustible en una industria panificadora

La situación actual de secado se realizó en la panadería San Antonio, ubicada en la zona 1 de San Lucas Sacatepéquez. Según información de su propietario, Juan Carlos Cabrera (comunicación personal, 10 de octubre de 2016), con el equivalente de 1,5 tareas (600 leños aproximados) rinde una semana de trabajo (4 750 panes de varias clases aproximados).

El horno utilizado está fabricado de ladrillo tayuyo recubierto con mezción. El mismo ocupa un área aproximada de 15,5 m² y una altura de 1,5 m; trabaja diariamente durante 2,5 horas, ocupando los primeros 15 minutos tras incineración como calentamiento (durante el cual se retira exceso de humo de las trozas incinerada). Su ingreso es por medio de una compuerta de lámina de 0,40 m de alto por 0,50 m de ancho, fabricada en acero distribuida en dos hojas.

Actualmente la especie utilizada es variada entre encino (*quercus tristis*), gravilea (*grevillea robusta*) y eucalipto (*eucalyptus*). El propietario no recomienda utilizar pino (*pinus*) y ciprés (*cupressus lusitánica*) debido a que su llama tiende a rajar las paredes del horno (recomienda estas especies para fabricar las paletas utilizadas durante el proceso de cocción). Las especies se consiguen comprándoles a varios distribuidores con precios variables entre Q. 200,00 y Q. 400,00 por tarea, preferiblemente en troza (no rajada).

La leña se coloca en un apartado especial (habitación) cercana al horno. Según recomendación del propietario, el tiempo de secado usual es de 30 días, no variando de acuerdo a la especie previo a ser incinerado. Se tomaron trozas para estimar contenidos de humedad.

Figura 10. Horno en panadería, portezuela



Fuente: fotografía tomada por el autor.

Figura 11. Interior de horno en panadería cargado antes de incinerar



Fuente: fotografía tomada por el autor.

Tabla III. **Contenido de humedad actual**

No.	Especie	Peso Bruto Húmedo	Peso Bruto Seco	Contenido de humedad
1	Encino (<i>quercus tristic</i>)	3396 g	2995 g	76,61 %
2	Encino (<i>quercus tristic</i>)	2864 g	2488 g	74,89 %

Fuente: elaboración propia.

2.2. Análisis estadístico de series históricas de variable meteorológicas: temperatura, precipitación, humedad relativa, velocidad del viento, nubosidad

Para realizar los cálculos en esta sección, se utilizan datos de la estación meteorológica del INSIVUMEH Suiza Contenta, ubicada en San Lucas Sacatepéquez: latitud 14°37'08", longitud 90°39'40" a 2105 msnm, que constituye la estación más cercana al lugar en estudio.

2.2.1 Temperatura

Se cuenta con información desde el año 1997 hasta el año 2015. Los valores característicos se calcularon utilizando InfoStat ®.

Tabla IV. **Valores característicos temperatura media mensual (°C)**

MEDIA	17.38
D.E.	1.96
MÍN	12.00
MÁX	23.00

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Valores característicos temperatura máxima mensual (°C)**

MEDIA	24.35
D.E.	1.73
MÍN	20.00
MÁX	29.00

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Valores característicos temperatura mínima mensual (°C)**

MEDIA	4.68
D.E.	3.00
MÍN	-5.00
MÁX	10.00

Fuente: elaboración propia.

2.2.2 Humedad relativa

Se cuenta con información desde el año 2006 hasta el año 2015. Los valores característicos se calcularon utilizando InfoStat ®.

Tabla VII. **Valores característicos humedad relativa media mensual (%)**

MEDIA	79.11
D.E.	5.41

Continuación de la tabla VII.

MÍN	60.00
MÁX	90.00

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Valores característicos humedad relativa máxima mensual (%)**

MEDIA	93.75
D.E.	5.00
MÍN	70.00
MÁX	99.00

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Valores característicos humedad relativa mínima mensual (%)**

MEDIA	56.30
D.E.	11.91
MÍN	32.00
MÁX	90.00

Fuente: elaboración propia.

2.2.3. Nubosidad

Se cuenta con información desde el año 2006 hasta el año 2015. Los valores característicos se calcularon utilizando InfoStat ®.

Tabla X. **Valores característicos nubosidad (octas)**

MEDIA	5.89
D.E.	0.95
MÍN	3.00
MÁX	8.00

Fuente: elaboración propia.

2.2.4. Precipitación

Se cuenta con información desde el año 1997 hasta el año 2015. Los valores característicos se calcularon utilizando InfoStat ®.

Tabla XI. **Valores característicos precipitación (mm)**

MEDIA	97.81
D.E.	113.61
MÍN	0.00
MÁX	432.80

Fuente: elaboración propia.

2.2.5. Velocidad del viento

Se cuenta con información desde el año 2006 hasta el año 2015. Los valores característicos se calcularon utilizando InfoStat ®.

Tabla XII. Valores característicos velocidad del viento (km/h)

MEDIA	2.98
D.E.	2.27
MÍN	1.00
MÁX	9.10

Fuente: elaboración propia.

2.3. Diseño de cámara para secado solar de madera

El procedimiento para diseño de cámara se secado solar de madera referenciado es el propuesto por Luna y Cruz (2003), iniciando con cálculos:

1. Cantidad de calor que pasa por la pared de vidrio:

$$dQ = k * A * \frac{dt}{dx} \quad \frac{Kcal}{h}$$

En donde:

k = conductividad térmica del vidrio en Kcal/hm°C

A = área de la plancha de vidrio del colector

dt = delta de temperatura interior de colector – ambiente (no menor a 10°C)

dx= espesor de la pared de vidrio

2. Cantidad de energía que se suministra a la placa colectora de la energía solar:

$$q = 4.92 * E \left(\frac{T2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T1}{100} \right)^4 * A \quad \frac{Kcal}{h}$$

En donde:

E = emisividad del cuerpo a recibir calor (placa del colector)

T1 = temperatura ambiente en °K

T2 = temperatura del cuerpo a recibir calor en °K (placa del colector)

A = área del cuerpo a recibir calor (placa del colector)

3. Pérdidas de calor en las paredes del secador:

$$q = U * A * dt \quad \frac{Kcal}{h}$$

En donde:

A= área diferencial de cada pared con contacto al exterior en m²

dt= delta de temperatura interior de colector – ambiente (no menor a 10°C)

U = coeficiente de convección diferencial en Kcal/hm°C:

Paredes horizontales arriba: $2,1 * dt^{0,25}$

Paredes horizontales abajo: $1,1 * dt^{0,25}$

Paredes verticales: $1,5 * dt^{0,25}$

4. Cálculo de agua a evaporar en el secador:

a. Cálculo del área de evaporación:

$$Ae = \frac{2 * Vt}{e} \quad m^2$$

En donde:

Ae= área de evaporación en m²

Vt = volumen de la probeta en m³

e = espesor de la probeta en m

b. Cálculo del área efectiva de evaporación:

$$A_{et} = A_e - A_l \quad m^2$$

En donde:

A_{et} = área efectiva de evaporación en m^2

A_e = área de evaporación en m^2

A_l = área de listones de la fila en m^2

c. Cálculo del peso total de la madera:

$$m = \rho * V_p \quad Kg$$

En donde:

m = peso de la pila de madera en Kg

ρ = densidad de la madera en Kg/m^3

V_p = volumen de madera real a secarse en m^3

$$V_p = A_{et} * h_p \quad m^3$$

En donde:

A_{et} = área efectiva de evaporación en m^2

h_p = altura de la pila en m

d. Cálculo de la razón de agua evaporada:

$$AE = m * (h_i - h_f) \quad \frac{Kg}{carga}$$

En donde:

AE = razón de agua a evaporar en Kg/carga

hf = porcentaje de humedad final de la madera

hi = porcentaje de humedad inicial de la madera

e. Cálculo del calor dentro del secador generado por la radiación solar:

$$Qa = Qr * A1 * ts \quad Kcal$$

En donde:

Qa = calor dentro del secador en Kcal

Qr = calor proporcionado por la radiación solar en Kcal/hm²

A1 = área superior del colector en m²

ts = tiempo de secado en horas (acumulativo)

5. Cálculo de la cantidad de aire que debe pasar por el secador:

$$M = \frac{AEm}{Y} \quad \frac{kg \text{ aire seco}}{h} \quad Y = 0.017 * \frac{Kg \text{ agua/h}}{kg \text{ aire seco}}$$

En donde:

M = cantidad de aire que debe de pasar por el secador

Y = constante

AEm = relación entre razón de agua a evaporar y tiempo de secado en horas

$$AEm = \frac{AE}{ts} \quad \frac{Kg}{carga * h}$$

6. Cálculo del calor requerido para evaporar el agua de la madera:

$$Q_c = H_v - H_a \quad \frac{Kcal}{Kg}$$

En donde:

Q_c = calor necesario para evaporar el agua en Kcal/Kg

H_v = entalpía del vapor de agua

H_a = entalpía del agua

7. Cálculo del calor requerido para evaporar la razón de agua contenida en la madera

$$Q_m = Q_c * AE \quad Kcal$$

En donde:

Q_m = calor requerido para evaporar la AE del agua

Q_c = calor necesario para evaporar el agua en Kcal/Kg

AE = razón de agua a evaporar en Kg/carga

8. Cálculo de renovación de aire:

- a. Cálculo de paso de aire de colector a secador:

$$v = \frac{M}{A} \quad \frac{m}{s}$$

En donde:

v = velocidad de aire entre saliente de tubería de conexión a pila de trozas en m/s

M = cantidad de aire que debe de pasar por el secador en m³/s

A = área de tubería de conexión en m²

b. Cálculo de paso de aire de colector a secador:

$$A = \frac{M}{v} \quad m^2$$

En donde:

A = área de tubería de ingreso a colector en m²

M = cantidad de aire que debe de pasar por el secador en m³/s (caudal de salida debe ser igual a caudal de ingreso)

v = velocidad media del viento en m/s

Tabla XIII. **Resumen de diseño de secador solar**

1. Cantidad de calor que pasa por la pared de vidrio			
$dQ = k * A * \left(\frac{dt}{dx}\right) \quad \left[\frac{Kcal}{h}\right]$			
k	A	dt	dx
246.47	3.00	10.00	0.003
Kcal/hm°C	m ²	°C	m
	dQ	2464700	Kcal/h

Continuación de la tabla XIII.

2. Cantidad de energía que se suministra a la placa colectora de la energía solar:			
$q = 4.92 * E \left[\left(\frac{T2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T1}{100} \right)^4 \right] * A$			$\left[\frac{Kcal}{h} \right]$
E	T1	T2	A
0,94	290,53	300,53	3,00
Kcal/hm°C	°K	°K	m2
	q	143,28	Kcal/h

3. Pérdidas de calor en las paredes del secador:			
$q = U * A * dt$			$\left[\frac{Kcal}{h} \right]$
	U*A	dt	
	38,79	10,00	
	Kcal*m/h°C	°C	
	q	387,89	Kcal/h
U	A	U*A	
3,73	2,27	8,47	hor-arr
1,96	2,00	3,91	hor-aba
2,67	9,90	26,41	ver

4a. Cálculo del área de evaporación			
$Ae = \frac{2 * Vt}{e}$			$[m^2]$
	Vt	e	
	0.025	0.05	
	m3	m	
	Ae	1.00	m2

Continuación de la tabla XIII.

4b. Cálculo del área efectiva de evaporación			
$A_{et} = A_e - A_l \quad [m^2]$			
Ae		Al	
1.00	0.25		
m ²	m ²		
Aet		0.75	m²

4c. Cálculo del peso total de la madera			
$m = \rho * V_p \quad [Kg] \quad V_p = A_{et} * h_p \quad [m^3]$			
ρ	Vp	hp	
840,00	0,63	0,84	
kg/m ³	m ³	m	
m		529,20	Kg

4d. Cálculo de la razón de agua evaporada			
$AE = m * (h_i - h_f) \quad \left[\frac{Kg}{carga} \right]$			
m	hi	hf	
529.20	0.85	0.25	
Kg	%	%	
AE		317.52	Kg/carga

4e. Cálculo del calor dentro del secador generado por la radiación:			
$Q_a = Q_r * A_1 * t_s \quad [Kcal]$			
Qr	A1	ts	
687.88	3.00	100.00	
Kcal/hm ²	m ²	hora	
Qa		206362.80	Kcal

Continuación de la tabla XIII.

5. Cálculo de la cantidad de aire que debe pasar por el secador:

$$M = \frac{AE m}{Y} \quad \left[\frac{\text{kg aire seco}}{h} \right]$$

AE m	Y	ts
3.18	0.017	100.00
<i>Kg/carga*h</i>	<i>kcal/kg</i>	<i>hora</i>
	M	186.78
		kg aire seco/h

6. Cálculo del calor requerido para evaporar el agua de la madera:

$$Q_c = H_v - H_a \quad \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} \right]$$

Hv	Ha
636.40	20.03
<i>kcal/kg</i>	<i>kcal/kg</i>
Qc	616.37
	kcal/kg

7. Cálculo del calor requerido para evaporar la razón de agua contenida en la madera

$$Q_m = Q_c * AE \quad \left[\text{Kcal} \right]$$

Qc	AE
616,37	317,52
<i>kcal/kg</i>	<i>kg/carga</i>
Qm	195709,80
	Kcal

Continuación de la tabla XIII.

8a. Cálculo de paso de aire de colector a secador:			
	$v = \frac{M}{A} \left[\frac{m}{s} \right]$		
	M	A	
	0,04	0,03	
	m ³ /s	m ²	
M	186,78	0,0002315	
	kg aire seco/h	factor m ³ /s	
lados	0,2	0,085	2
	m	m	cantidad
	v	1,27	m/s

8b. Cálculo de renovación de aire en colector:			
	$A = \frac{M}{v} [m^2]$		
	M	v	
	0,04	0,21	
	m ³ /s	m/s	
	A	0,21	m²

Fuente: elaboración propia.

2.4. Construcción de modelo de cámara para secado solar de madera

La construcción de la cámara de secado se realizó utilizando madera de pino en óptimas condiciones, con procesos constructivos adecuados y por personal cualificado para la actividad. Los planos adjuntos en anexos muestran las distancias y especificaciones.

A partir de información contenida en la tabla XIII, se evidencia:

- En el inciso 1 se indica que el área del colector es de $3,0 \text{ m}^2$ (resultado de $2,0 \times 1,5 \text{ m}$). El material del techo es vidrio y su espesor es de 3 mm . La inclinación del techo es de 15° hacia el sur (pretendiéndose ser perpendicular a la incidencia directa de los rayos del sol), lográndose con una altura en elevación norte de 60 cm y en la elevación sur de 30 cm . La placa colectora del modelo propuesto consiste en un cartón rígido cubierto con nylon color negro, ubicado con inclinación sur en elevación norte 30 cm y elevación sur 15 cm en con longitud $2,0 \text{ m}$.
- En el inciso 3 se indica las áreas del secador. Las paredes horizontales arriba (hor-arr) se refiere al área del techo de dos aguas del secador, correspondiente a dos superficies planas de $1,05 \times 1,08 \text{ m}$ (área total $2,27 \text{ m}^2$). Las paredes horizontal abajo (hor-aba) se refiere al área inferior de mesa interior del secador cuyas dimensiones son $2,0 \times 1,0 \text{ m}^2$ (área total $2,0 \text{ m}^2$). Las paredes verticales (ver) se refiere al área de paredes verticales en el secador incluyendo puertas de acceso. Los muros oriente y occidente tienen una altura de $1,55 \text{ m}$, los muros norte y sur varían en altura de $1,65$ a $1,75 \text{ m}$ (media de $1,70 \text{ m}$). El área de muros oriente occidente es $3,10 \text{ m}^2$ ($1,0 \times 1,55 \text{ m}$ cada una) y el área de muros norte sur es $6,80 \text{ m}^2$ ($1,70 \times 2,0 \text{ m}$ cada una), resultando un área total de muros de secador en $9,90 \text{ m}^2$. Para esta estructura, el material de construcción utilizado es lámina lisa calibre 28, colocada en dos camas (la exterior pintada color negro) separadas por aire (propuesta de aislante) con estructura de madera de pino de sección $3'' \times 1 \frac{1}{2}''$.
- En los incisos 4, 5, 6 y 7 se describe que el diseño se utiliza para una tarea de leña (volumen $0,882 \text{ m}^3$, según Encuesta Nacional de leña (2011); 2 pilas de $0,89 \times 0,59 \times 0,84 \text{ m}$) asumiendo como especie encino (densidad $840 \text{ kg} / \text{m}^3$), durante un tiempo de secado de 100 horas

(acumuladas de 20 días), a una insolación 4 000 kwh / día distribuido en 5 horas diarias (según mapa de radiación solar del MEM).

- En el inciso 8 se muestra que controlando el ingreso de volumen de aire a renovar en el colector (área 0,21 m²), en un área de 340 cm² (equivalente a 2 áreas de 20,0 x 8,5 cm) para conectarse al secador, se conserva internamente una velocidad de 1,27 m/s, la cual se encuentra en el rango estimado de eficiencia descrito anteriormente. El ingreso de volumen de aire a renovar se consideró por medio de una boquilla para el ingreso del aire orientada hacia el nororiente (dirección del viento predominante en Guatemala).

La tabla XIV muestra el resumen de dimensionamiento para las diferentes partes que conforman el secador solar.

Tabla XIV. **Dimensionamiento de secador solar**

PARTE	LARGO (m)	ANCHO (m)	ALTO (m)
Colector	2,0	1,5	0,45 (media)
Cámara de secado	2,0	1,0	1,625 (media)
Ventila	0,200	0,085	-----
Ventilador	0,458	0,458	-----

Fuente: elaboración propia.

Se tomó como referencia la geometría del deshidratador solar Aureliano Buendía (diseñado para Humahuaca, Argentina) (INTI, s.f.), considerando la inclinación del colector solar referenciada a la latitud de Guatemala, los techos a dos aguas para la cámara de secado, la ubicación de ventila y dirección del

ventilador para que el proceso físico se lleve a cabo por convección (la velocidad del aire interna de la cámara es variable acorde a los cambios de temperatura y presión obtenidos en el colector solar) acomodando a las dimensiones resultantes en el cálculo y a los materiales descritos anteriormente, se construyó el secador solar de leña.

Figura 12. **Secador solar**



Fuente: fotografía tomada por el autor.

Figura 13. **Deshidratador Aureliano Buendía**



Fuente: INTI (s.f.). *Manual de construcción del deshidratador solar Aureliano Buendía*.
Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Industrial. p 1.

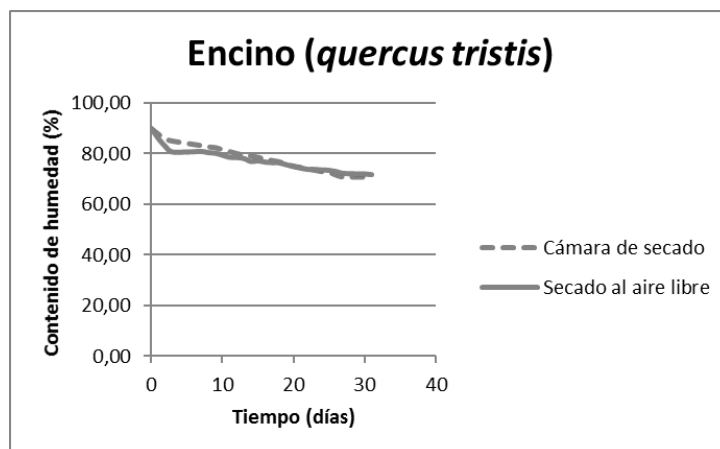
3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

3.1. Presentación de gráficas contenido de humedad versus tiempo de secado

Tras realizar la construcción de la cámara de secado, se realizó el estudio comparativo de secado tradicional al aire libre y secado utilizando la cámara de secado. Se utilizó tres especies de leña utilizada en la región de estudio: Encino (*quercus tristis*), Ciprés (*cupressus lusitánica*) y Capulín (*trema micrantha*) (Unidad Técnica Cordillera Alux, s.f.). El período de estudio referenciado es de 32 días.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Figura 14. Contenido de humedad versus tiempo de secado Encino (*quercus tristis*)



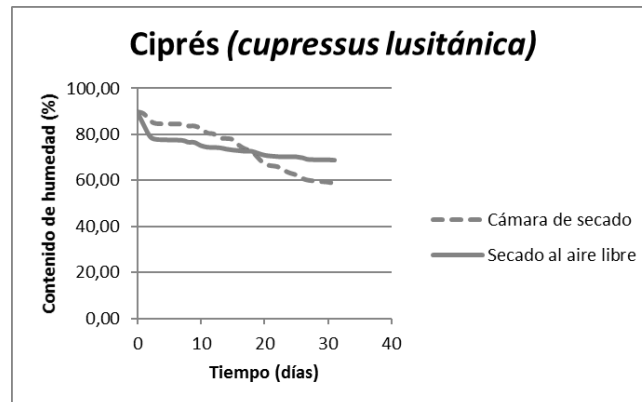
Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Contenido de humedad versus tiempo de secado Encino**
(*quercus tristis*)

No.	Encino (<i>quercus tristis</i>)			
	Cámara de secado		Secado al aire libre	
	Peso (g)	% H	Peso (g)	% H
	1857	90,00	957	90,00
1	1816	87,74	920	85,98
2	1782	85,83	891	82,72
3	1768	85,04	873	80,66
7	1737	83,26	875	80,89
8	1728	82,74	871	80,43
9	1723	82,45	869	80,20
10	1709	81,63	862	79,39
11	1696	80,86	855	78,57
12	1683	80,09	854	78,45
13	1672	79,43	851	78,10
14	1667	79,13	841	76,91
15	1658	78,59	843	77,15
16	1646	77,86	839	76,67
17	1637	77,31	837	76,43
18	1628	76,76	836	76,31
20	1601	75,07	824	74,86
22	1586	74,12	815	73,75
23	1575	73,43	815	73,75
24	1567	72,92	813	73,51
25	1562	72,60	812	73,38
26	1545	71,49	808	72,89
27	1534	70,78	802	72,14
30	1533	70,71	800	71,89
31	1529	70,45	798	71,64

Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **Contenido de humedad versus tiempo de secado Ciprés (*cupressus lusitánica*)**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Contenido de humedad versus tiempo de secado Ciprés (*cupressus lusitánica*)**

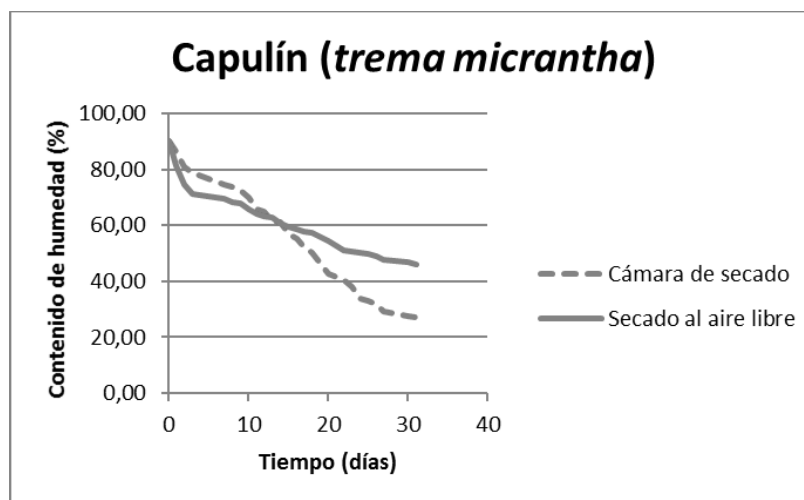
Ciprés (<i>cupressus lusitánica</i>)				
No.	Cámara de secado		Secado al aire libre	
	Peso (g)	% H	Peso (g)	% H
	504	90,00	847	90,00
1	500	89,20	802	84,39
2	486	86,32	763	79,28
3	479	84,86	753	77,95
7	478	84,65	750	77,55
8	474	83,80	744	76,74
9	474	83,80	743	76,61
10	469	82,74	733	75,24
11	460	80,78	728	74,56
12	458	80,35	727	74,42
13	450	78,57	726	74,28
14	449	78,35	722	73,73
15	447	77,90	719	73,31
16	436	75,37	717	73,03

Continuación de la tabla XVI.

No.	Cámara de secado		Secado al aire libre	
	Peso (g)	% H	Peso (g)	% H
17	429	73,74	715	72,75
18	425	72,80	715	72,75
20	403	67,34	703	71,05
22	398	66,09	699	70,47
23	392	64,56	698	70,33
24	387	63,26	698	70,33
25	384	62,48	698	70,33
26	378	60,90	695	69,90
27	375	60,10	690	69,17
30	372	59,29	689	69,03
31	370	58,75	688	68,88

Fuente: elaboración propia.

Figura 16. Contenido de humedad versus tiempo de secado Capulín (*trema micrantha*)



Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Contenido de humedad versus tiempo de secado Capulín**
(*trema micrantha*)

Capulín (<i>trema micrantha</i>)				
No.	Cámara de secado		Secado al aire libre	
	Peso (g)	% H	Peso (g)	% H
	665	90,00	647	90,00
1	641	86,26	596	81,44
2	608	80,83	559	74,82
3	596	78,81	540	71,31
7	571	74,44	530	69,42
8	567	73,73	524	68,27
9	561	72,66	522	67,89
10	547	70,10	512	65,94
11	525	65,91	502	63,95
12	521	65,14	499	63,34
13	504	61,77	496	62,74
14	500	60,97	487	60,89
15	481	57,02	481	59,64
16	473	55,33	477	58,81
17	460	52,50	473	57,96
18	449	50,05	470	57,32
20	418	42,64	456	54,25
22	409	40,44	442	51,08
23	399	37,93	440	50,63
24	383	33,75	438	50,17
25	380	32,96	437	49,94
26	375	31,63	433	49,02
27	366	29,17	427	47,61
30	360	27,50	424	46,91
31	359	27,23	421	46,19

Fuente: elaboración propia.

3.2. Presentación de resultados de laboratorio CII

Tras finalizar la investigación, toma de datos y elaboración de gráficas de secado, se llevó al Centro de Investigaciones de Ingeniería, CII, la Universidad de San Carlos de Guatemala, USAC, probetas para ser analizadas en el laboratorio de Tecnología de la Madera. Los resultados obtenidos son:

Tabla XVIII. Resultados laboratorio CII

Especie	Humedad Promedio	Humedad Aserrín	Absorción Promedio	Densidad Promedio	Contracción Volumétrica Promedio	Porcentaje de Cenizas
	%	%	%	g/cm ³	----	%
Quercus tristis	15,16	13,41	12,71	0,82	12,13	8,17
Cupressus lusitánica	15,16	11,52	13,56	0,65	16,69	5,19
Trema micrantha	15,16	12,55	16,40	0,43	18,86	6,16

Fuente: elaboración propia.

Los ensayos de laboratorio practicados son porcentaje de humedad, porcentaje de humedad de aserrín, porcentaje de absorción, densidad, contracción volumétrica, porcentaje de cenizas.

El muestreo realizado para los ensayos de laboratorio se realizó utilizando las trozas de leña en forma posterior al secado en el interior del secador solar,

recolectando 1,0 gramos de aserrín, una pieza de 1, 0 cm³, dos piezas de 1,0 x 1,0 x 2,0 cm (2,0 cm³) de cada una de las especies en estudio.

La humedad resultante, parámetro obtenido por el método gravimétrico en el interior del secador solar, que se muestra en los ensayos de laboratorio es menor a la que se muestra obtenida en los cálculos realizados en el interior del secador, lo cual comprueba que en el mismo se llevó a cabo un proceso de secado.

En la sección de Anexos, se muestran los resultados emitidos por el Centro de Investigaciones de Ingeniería.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS

4.1. Comparación entre secado tradicional al aire libre y secado por medio de cámara solar

Las condiciones climáticas durante el período en que se realizó el estudio (entre el 13 de octubre de 2015 y el 13 de noviembre de 2015, para ser acorde a lo que se estima período de secado en la panadería referenciada en el estudio) evidenciaron ser adversas a las ideales propuestas en el diseño original. Precipitación en varios días de estudio, nubosidad densa de tipo cúmulo y velocidad y dirección del viento variable son factores que afectaron la captación de energía solar.

Al analizar tres especies, se obtienen tres resultados diferentes entre sí, pero vinculantes de acuerdo a un factor: la densidad de cada madera. En el estudio realizado en la panadería San Antonio, se proporcionó información acerca de realizar el secado de trozas al aire libre por un período de un mes, utilizando idealmente encino. La obtención de las especies fue tras desrame de árboles realizado en la ubicación de la cámara de secado, retirando las ramas para aumentar el área de influencia del colector solar.

Del encino (*quercus tristis*), los resultados indican una diferencia de 1,19 % con menor contenido de humedad en el secado en el interior de la cámara, lo cual no es significativo comparado contra la inversión que pudiese realizarse. El encino es la especie con mayor densidad de las estudiadas.

Del ciprés (*cupressus lusitánica*) se obtuvo un delta de 10,13 %, lo cual representa un 17,25 % del contenido de humedad obtenido al final del estudio en el interior de la cámara. El ciprés (*cupressus lusitánica*) no es una especie recomendada por el propietario de la panadería, ya que la misma al ser incinerada genera una llama intensa en un período comparativamente corto, y ello tiende a dañar los muros del horno.

Del capulín (*trema micrhantha*), especie local en la región de estudio, utilizada por los locales como combustible en su vivienda y en tortillerías, se obtuvo un delta de 18,97 %, lo que representa un 69,67 % del contenido de humedad obtenido al final del estudio en el interior de la cámara y un contenido de humedad de 27,23 %. Cabe resaltar que acorde a la teoría, en el 30,0 % del contenido de humedad se encuentra un cambio de tendencia en la curva de secado, y ésta especie lo alcanzó en 27 días en el interior de la cámara, cuando al aire libre al final quedan pendientes aún 16,19 % para obtener ese contenido de humedad.

Tras analizar el estudio de secado en las condiciones en el interior de la cámara y las condiciones en el secado al aire libre, se obtuvo información para optimizar el diseño propuesto:

Tabla XIX. **Condiciones durante período de estudio**

Ti media	24,2	°C
Te media	19,1	°C
d T	5,2	°C
Ac	45,5	%
Hi media	71,8	%
He media	73,2	%
Nubosidad	6	Octas

Fuente: elaboración propia.

La tabla anterior indica que en el interior de la cámara de secado, la temperatura media fue 24,2°C, siendo la mayor registrada 38,6°C y la menor 14,6°C, así como una humedad relativa media 71,8 %, siendo la mayor registrada 93 % y la menor 40 %.

También se indica que el exterior donde se realizó el secado al aire libre, la temperatura media fue 19,1°C, siendo la mayor registrada de 26,2°C y la menor 15,1°C, así como una humedad relativa media 74,3 %, siendo la mayor registrada 95 % y la menor 42 %.

La tendencia de los datos indicó que la ser artesanal la fabricación de la cámara de secado, se obtuvo un incremento de temperatura de 5,2°C (diferencia de las medias), que solo el 45,5 % del área del colector tuvo influencia de radiación solar directa, que la nubosidad fue 6 octas y que no hubo cambio significativo en la diferencia de contenido de humedad en el aire.

Posterior al proceso realizado, se realizó ensayos en el CII. Las muestras fueron enviadas a laboratorio de forma posterior a realizar el estudio en el secador, prolongando su período de secado en el interior del secador solar por tres meses. Ello repercutió en que el contenido de humedad obtenido fuera 15,16 % en las tres especies, resultado mucho menor al obtenido tras un mes de secado en el período de estudio.

5. PRESUPUESTO Y EVALUACIÓN FINANCIERA

5.1. Presupuesto

La construcción, puesta en operación y toma de datos de la cámara de secado solar se estimó en un precio Q. 5 390,83 (cinco mil trescientos noventa quetzales con ochenta y tres centavos), los cuales se desglosan como se indica en la siguiente tabla.

Tabla XX. Resumen de presupuesto

<u>OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE SECADO SOLAR DE LEÑA PARA SU USO COMO BIOCOMBUSTIBLE</u>
--

Investigador	Ing. Carlos Alejandro Alegre Ordóñez
Asesor	M.A. Ing. José Antonio Rosal Chicas
Fecha	Octubre de 2015

<u>RESUMEN DE PRESUPUESTO</u>					
No.	Renglón	Unidad	Cantidad	P.U.	Total
01	Colector solar	unidad	1,0	Q1.480,40	Q1.480,40
02	Cámara de secado	unidad	1,0	Q2.191,90	Q2.191,90
03	Operación de equipo	global	1,0	Q1.718,53	Q1.718,53
					Q5.390,83

Fuente: elaboración propia.

El desglose de precios unitarios se adjunta en las tablas de anexos al final del presente documento.

5.2. Valor actual neto, tasa interna de retorno

Según Baca (2001), valor actual neto “es el valor monetario que resulta de restar la suma de los flujos descontados a la inversión inicial” (p. 213). Además la tasa interna de retorno (o tasa interna de rendimiento) se define como “la tasa de descuento por la cual el valor actual neto es igual a cero. Es la tasa que iguala la suma de los flujos descontados a la inversión inicial” (p. 216). El VAN positivo indica que el proyecto puede ser rentable, el VAN negativo indica que el proyecto no es rentable, en VAN igual a cero tiene que ser analizado de acuerdo a un beneficio costo diferente (Baca, 2001).

Para el desarrollo de éste estudio, se realiza el flujo de caja a partir del rendimiento de secado de la especie Capulín (*trema micrantha*), el cual proyecto minimizar el tiempo de secado a la mitad del tiempo (en un mes se puede secar cuatro tareas de leña), razón por la cual se puede comercializar durante seis meses una cantidad de trozas igual a la que se utilizará en la producción de la panificadora. Además, se puede utilizar el cuarto de almacenamiento, al ser propia la edificación, para un uso diferente, el cual se refleja en la tabla a continuación como uso alternativo a bodega. El cálculo se realizó utilizando Microsoft Excel ©, para un período de vida de 10 años.

Tabla XXI. Flujo de Fondos, Valor Actual Neto y Tasa Interna de Retorno

COSTOS FIJOS	
Mantenimiento	Q110,50
TOTAL	Q110,50

COSTOS VARIABLES	
Materia prima	Q15.600,00 * 01 tarea semanal
TOTAL	Q15.600,00

INVERSIÓN	Q11.016,90	* precio estimado a 3 veces el utilizado en estudio
VALOR DE RESCATE	Q3.855,90	* 35 % del diseño

Continuación de tabla XXI.

FLUJO DE FONDOS											
AÑO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Secado de leña	Q0,00	Q15.600,00	Q15.912,00	Q16.230,20	Q16.554,80	Q16.885,90	Q17.223,60	Q17.568,10	Q17.919,50	Q18.277,90	Q18.643,50
Uso alternativo a bodega	Q0,00	Q3.000,00	Q3.060,00	Q3.121,20	Q3.183,60	Q3.247,30	Q3.312,20	Q3.378,40	Q3.446,00	Q3.514,90	Q3.585,20
Costos fijos	Q0,00	Q110,50	Q110,50	Q110,50	Q110,50	Q110,50	Q110,50	Q110,50	Q110,50	Q110,50	Q110,50
Costos variables	Q0,00	Q15.600,00	Q15.912,00	Q16.230,20	Q16.554,80	Q16.885,90	Q17.223,60	Q17.568,10	Q17.919,50	Q18.277,90	Q18.643,50
Ganancias variables	Q0,00	Q2.889,50	Q2.949,50	Q3.010,70	Q3.073,10	Q3.136,80	Q3.201,70	Q3.267,90	Q3.335,50	Q3.404,40	Q3.474,70
Impuestos	Q0,00	Q288,95	Q294,95	Q301,07	Q307,31	Q313,68	Q320,17	Q326,79	Q333,55	Q340,44	Q347,47
Ganancias netas	Q0,00	Q2.600,55	Q2.654,55	Q2.709,63	Q2.765,79	Q2.823,12	Q2.881,53	Q2.941,11	Q3.001,95	Q3.063,96	Q3.127,23
Valor de rescate	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q3.855,90
Inversión	Q11.016,90	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00
Total de ingresos	Q0,00	Q18.600,00	Q18.972,00	Q19.351,40	Q19.738,40	Q20.133,20	Q20.535,80	Q20.946,50	Q21.365,50	Q21.792,80	Q26.084,60
Total de egresos	Q11.016,90	Q15.999,45	Q16.317,45	Q16.641,77	Q16.972,61	Q17.310,08	Q17.654,27	Q18.005,39	Q18.363,55	Q18.728,84	Q19.101,47
Flujo neto de fondos	-Q11.016,90	Q2.600,55	Q2.654,55	Q2.709,63	Q2.765,79	Q2.823,12	Q2.881,53	Q2.941,11	Q3.001,95	Q3.063,96	Q6.983,13

VPN	Q21.408,42
TIR	22,93 %

Fuente: elaboración propia.

Desde la implementación de la cámara de secado, la cual se ubica en la ubicación de la edificación donde le favorece la captación de radiación, así como el acceso a la misma, permite liberar la habitación de bodega; ésta renta convierte el flujo de caja en positivo a partir del primer año. Se evidencia un VPN positivo y una TIR de rango aceptable para considerar viable el proyecto.

CONCLUSIONES

1. Durante el estudio realizado en la panadería San Antonio, ubicada en San Lucas Sacatepéquez, se determinó que el secado actualmente se realiza al aire libre, iniciando el proceso con una humedad 90 % (contenido de la troza al ser cortada), se utiliza principalmente encino y se incinera tras un mes de secado, estimando un 75,75 % de contenido de humedad al final del proceso durante un período de 30 días.
2. Los materiales utilizados para construir la cámara de secado solar son tradicionales en la industria guatemalteca, estos son lámina de aluminio, madera, vidrio, PVC 3", cartón piedra, nylon negro y clavos. Las dimensiones del colector solar son 1,50*2,00 m (en planta), para un volumen de aire de 0,50 m³. Las dimensiones de la cámara de secado son 1,00*2,00*1,70 m, resultando un volumen de 3,40 m³. Se encuentra dimensionado para realizar el secado de 1 tarea de leña, equivalente a 0,87 m³. El detalle se especifica en los planos constructivos.
3. El principio de operación del modelo se refiere a elevar la temperatura del aire en el colector solar. Por diferencia de presiones, el aire pasa del colector a la cámara de secado, en la cual se eleva la temperatura media interna en un delta de 5,2°C, en la cual la energía colectada realiza un proceso de transferencia de calor hacia las trozas apiladas, reduciendo así su contenido de humedad. El aire se renueva a partir de ingreso de aire en el colector y salida de la cámara de secado, a través de una tubería de escape.

4. Se trazaron las curvas de secado de tres especies utilizadas en la región como leña, se espera llegar a un 30,0 % de contenido de humedad, se estudió el comportamiento durante 30 días. Las tres especies presentan una curva similar a la curva teórica de secado. El encino (*quercus tristis*) a pesar del delta de energía, no presentó cambios significativos, variando un 1,19 % y se llegó a un contenido de humedad de 70,45 % en la cámara de secado. El ciprés (*cupressus lusitánica*) presentó un delta de 10,13 % y se llegó a un contenido de humedad de 58,75 % en la cámara de secado. El capulín (*trema micrantha*) presentó un delta de 18,97 % y se llegó a un contenido de humedad de 27,23 % en la cámara de secado, esta especie presentó los mejores resultados disminuyendo considerablemente el período de secado. Las especies se comportaron en mejores resultados de acuerdo a la densidad de cada especie. Tras prolongar el tiempo de secado a tres meses en el interior del secador solar, se tomó muestras para enviar a laboratorio, concluyendo un resultado de contenido de humedad de 15,16 % en las tres especies.

5. Se utilizó los datos de secado del capulín, para obtener beneficios alternativos de la habitación en que actualmente se realiza el secado y venta de especie sobrante. Se determinó que el costo de la cámara de secado es Q. 3 672,30 (tres mil seiscientos setenta y dos quetzales con treinta centavos), proyectando a un período de 10 años un valor presente neto de Q. 21 408,42 (veintiuno mil cuatrocientos ocho quetzales con cuarenta y dos centavos) y una tasa interna de retorno de 22,93 %.

RECOMENDACIONES

1. El plazo de secado se delimitó a lo utilizado actualmente en la panadería en estudio. Para obtener resultados de llegar al contenido de humedad estipulado se debe de continuar con períodos mayores de toma de datos, dato que se comprueba extendiendo el período a tres meses acorde a los resultados del laboratorio del CII. El contenido de humedad de las trozas incinerado en la panadería es alto, razón por la cual requiere de mayores períodos de precalentamiento y mayor cantidad de humo; se aconseja utilizar leña con menor contenido de humedad.
2. El diseño utilizado como base no considera el efecto de la nubosidad. El colector tuvo influencia solar media en un 45,5 % de su área durante el tiempo de estudio, lo cual varía los resultados esperados. Se sugiere considerar el factor de nubosidad y sombra en la ubicación del colector al momento de ubicarlo en otra localidad.
3. El método constructivo de las piezas que conforman el secador solar fue construir el armazón de madera, recubrirlo con lámina lisa de aluminio calibre aprovechando como aislante el aire. Se sugiere para posteriores modelos, en taller construir los paneles que conforman cada muro y techo y anclarles posteriormente en la ubicación.
4. Para colocar el secador en cualquier ubicación, se debe de considerar adecuadamente la orientación e inclinación del colector solar, así como su volumen. La cámara de secado puede distar del colector y conectarse

por tubería (considerando el aislamiento adecuado y que la diferencia de presiones dará la tendencia al aire de mayor temperatura a subir).

5. Las diferencias de temperaturas en el interior de la cámara de secado logradas durante el período de estudio fueron bajas. Para fines de biocombustible con requerimientos más específicos, tales como el consumo en industrias que requieren gran cantidad del recurso, calderas a base de biomasa; se sugiere utilizar impulsores de aire calentado desde el colector hacia la cámara de secado, con los cuales se puede controlar de mejor manera la velocidad del flujo y su renovación y de esta manera reducir más los tiempos de secado.
6. Evaluar en modelos más sofisticados de acuerdo a los fines y disponibilidad del recurso biocombustible, el uso de materiales aislantes que confinen el modelo propuesto, tales como silicones de diferentes calidades, fibra de vidrio, métodos químicos para protección de estructura, pantallas internas de confinamiento del flujo, llaves de paso para fluidos.
7. Implementar el modelo con otros fines, tal como el secado de ropa, ya que el mismo puede incurrir en reducir tarifas de energía eléctrica que tienen este fin en las viviendas en la actualidad. También puede ser utilizado para desecar granos y frutos, optimizando las condiciones que utilizan los artesanos en la actualidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Agencia Valenciana de la Energía (s.f.). *Energía solar térmica*. LAIMPRESA CG. Valencia, España.
2. Baca Urbina, G. (2001). *Evaluación de proyectos*. Cuarta edición. México. McGraw Hill.
3. Cengel, Y. (2007). *Transferencia de calor y masa*. Reno: University of Nevada. McGraw Hill.
4. CEPAL, Akianto (2011). *ENCUESTA NACIONAL DE LEÑA CONSUMO DE LEÑA EN HOGARES Y PEQUEÑA INDUSTRIA EN GUATEMALA*. Guatemala.
5. Chupina De León, A. (2006). *Estudio comparativo entre las técnicas más utilizadas para la caracterización de arcillas y su aplicación industrial en la fabricación de ladrillos*. (Tesis de grado). Universidad de San Carlos de Guatemala.
6. Díaz Castillo, O. (2005). *Diseño de un sistema fotovoltaico residencial con capacidad para venta de energía a la red de distribución*. (Tesis de grado). Universidad de San Carlos de Guatemala.
7. FAO (2005). *Uso eficiente y sostenible de la energía*. Guatemala.

8. Fuentes, M., Luna, D., Osorio, J., Corona, J. (2003). Construcción y validación de un secador solar para madera aserrada. [Versión electrónica]. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del ambiente*, 9, 171-176.
9. Fundación Solar (2013). *Estufas ahorradoras de leña, la experiencia de la fundación Solar en Guatemala*. Guatemala: PNUD.
10. IARNA (2006). *Perfil Ambiental de Guatemala: Tendencias y reflexiones sobre la gestión ambiental*. Guatemala. Universidad Rafael Landívar. p. 182.
11. INTI (s.f.). *Manual de construcción del deshidratador solar Aureliano Buendía*. Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Industrial.
12. Inzunza, J. (2007). *Física: Introducción a la mecánica y calor*. Concepción: Chile. Universidad de Concepción.
13. Lacoma, T. (s.f.). *Cuál es el gas emitido al quemar madera*. Consultado el 03 de julio, 2014. En: http://www.ehowenespanol.com/gas-emitido-quemar-madera-sobre_314829/
14. Luna, C., Cruz, C (2003). *Diseño y construcción de un secador para maderas con energía solar*. (Tesis de grado). Ecuador. Universidad Tecnológica Equinoccial.
15. Ministerio de Energía y Minas (2012). *Política Energética 2013-2027*. Guatemala: INDE.
16. Ministerio de la Producción (2010). *Guía de Buenas Prácticas para ladrilleras artesanales*. Perú.

17. Ministerio de Salud de Argentina (2003). *El carbón y la leña también pueden producir Intoxicaciones por Monóxido de Carbono*. Buenos Aires: ENARGAS.
18. Montúfar Del Valle, D. (2012). *Evaluación del uso de biomasa como combustible alternativo en la producción de ladrillos de barro cocido en el municipio de El Tejar Chimaltenango*. (Tesis de grado). Universidad de San Carlos de Guatemala.
19. Pozos Suárez, I. (2010). *Diseño térmico para un horno solar de secado de madera*. Xalapa, Veracruz, México. Universidad Veracruzana.
20. *Propiedades térmicas de materiales*. (s.f.). Recuperado de <http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/Quimica/PropiedadesTerminicas.asp>
21. Unidad Técnica Cordillera Alux (s.f.). *PLAN MAESTRO RESERVA FORESTAL PROTECTORA DE MANANTIALES CORDILLERA ALUX 2,010 – 2,014*. CONAP. Guatemala.
22. Salas, C., Moya, R., y Córdoba, R. (2008). Diseño y construcción de un secador solar para madera. *Kurú: Revista Forestal*. 5. Consultado el 24 de junio, 2014. En: <http://www.tecdigital.itcr.ac.cr/servicios/ojs/index.php/kuru/article/viewFile/424/355>

ANEXOS

**Tabla XXII. Series de registros meteorológicos, Estación INSIVUMEH Suiza
Contenta**

VARIABLE TEMPERATURA MEDIA

DIMENSIONAL °C

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1997				22	19,6	20	20,4	19,6				20	20,3
1998	21	21,2	21	23	20	18,1	18,7	18	16,1	14,5	15	14,3	18,4
1999	12	20,1	20,5	21,6	20,9	18,6	18,2	19,3	18,5	17,2	16,5	20,2	18,6
2000	19,1	19,7	21,2	21,5	21,1	20,5	20	21,7	20		17,8	17,2	20
2001	18,5		20,1	20,7	19,8	19,6	19,2	18,3	18,1	18	18,3	19,1	18,5
2002	18,9	18,4	18,6	20,2	18,3	18,4	18,7	18,8	18,6	19,6	17,3	17,1	18,6
2003	17,5	18	20,5	21,1	19,2	18,8	19	19,6	19,8	18,6	18,1	14,7	18,7
2004	14,9	17,6	17,3	18						16,9	14,2	12,8	16
2005	12	14,2	15,9	17,8	18,6	17,6	17	17	17	16	14,5	15	16,1
2006	14	14	15	16	18	17,1	18	17,6	17	16,2	15,4	15,4	16,1
2007	16	17	16	17	18	17	17,5	17,6	17,5	15	15,7	16	16,7
2008	14,6	15,4	16,2	17,2	18	17	17	17	18	16	15,3	16	16,5
2009	15	14,8	14,3	17	17,4	17,4	17,6	17,7	18,9	17,5	16,5	15,5	16,6
2010	15,2	16	17,1	18	18,2	17,8	17,8	17,5	17,2	16,4	15,5	14	16,7
2011	15	15	15,1	17	17,8	17		17,6	17,2	15,9	15,5	15	19,3
2012	14,2	15	15,2	16,2	17,3	17,2	17,2	17,2	17	16,4	15,3	15,6	16,2
2013	15,7	16	16,6	18,1	17,2	17,6	17,4	17	17				17,0
2014	14,9	15,4	16,7	17,6	18	17,4	18	17	17	16	16	15	16,6
2015	15	15	16	18			17	17,8	17,5				

VARIABLE TEMPERATURA MÁXIMA PROMEDIO

DIMENSIONAL °C

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1997	20,4	20,5	20,4	20,2	20,6	20,7	20,6	20,1	20	20,4	19,7	20,5	20,4
1998	19,9	20,3	21	20,5	20,7	20,3	21,2	21,4	21,1	21,2		21,2	20,8

Continuación de la tabla XXII.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1999	20,3	21,2	21,6	21,3	21,3	20,6	20,7	21,1	20,8	21,1	21,3	19,9	21
2000	19,1	19,7	21,2	21,5	21,1	20,5	20,5	21,7	21,4	21	20,5	18,9	20,6
2001	20		22,3	22,9	21,5	21,5	21,1	20,8	20,7	20,9	20,9	21,1	21,2
2002	20,9	22	21,5	23,7	20,5	21,2	21,4	21	20,6	21,4	20,1	20,2	21,2
2003	20,5	21,2	23,3	23,7	22,2	22	21,8	22,3	23,3	21,1	21	20	22
2004	19,5	22,8	21,6	23,7						23,9	21,6	21,3	22,1
2005	20,3	21,8	24	24,5	23,2	22,9	22,7	22,5	22,3	21,3	20,3	21,4	22,3
2006	20	22	22	23,1	23	22,3	23	24	23,4	23	22	21	22,4
2007	22	23	22	24	29	22	22	22,5	22	21,4	21	22	22,7
2008	20,5	21,5	22	24	24	21	22	23	23	20	20,1	21	21,8
2009	21	21	22	27	23	23,2	22,7	23	24,1	23	22	21	22,8
2010	22	23	24,7	25	23,6	23,1	23,2	22,8	22,3	21,9	21,4	21,3	22,9
2011	22	22,5	22,1	24	24	22	23	23,3	23	20,7	21,5	20,7	22,4
2012	21	20	22,1	22,7	23,1	22,5	22,7	22,8	22,2	21,4	21	22,4	22,0
2013	21,4	23	24	25,2	24	22	23	22,5	22,4				23,1
2014	22	23	22	24	23	25,2	23	23	22	21	21	21,4	22,6
2015	20	21	22	24			23	24	23				

VARIABLE TEMPERATURA MÁXIMA ABSOLUTA

DIMENSIONAL °C

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1997	22	22	25	27	25	23	23	22	22	22		23	27
1998	23,5	25	25	27	25	22	23	26	24	23	20	20	27
1999	22	22,5	23	25	23	22	22	23,5	22	21	22	22	25
2000	22,5	22	23	23	24	22	20	22	24	20	23	21	24
2001	23		24	24	23	23	22	22	22	22	22	22	24
2002	22	22	24	25	23,5	23	21,4	22,4	22,5	22	21	21	25
2003	23	23	23,3	23,7	25,5	24	23	23	25,5	23,5	23	22	25,5
2004	22	25,2	25	27						28	24,5	25	28
2005	24,5	24	26	27,5	25,5	25	25	25	24,5	24,5	22,5	24,5	27,5
2006	24,5	25	25,5	26	24,5	25	25	25,5	25	25	25	25	26
2007	25	25	26	27,5	27	25	24	24,5	24	23	25	25,5	27,5

Continuación de la tabla XXII.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
2008	23,5	24,5	25	26,5	27,5	25	25	26	26	23	24,5	24	27,5
2009	25	25,5	24,5	27	26	26	24	26	26,5	25	25	25	27
2010	26	26,5	29	28	27	25	26	26	25	23,5	25	25	29
2011	29	24,5	26	27	26	25	26	26	25	24	25	24	29
2012	24	24	25	25	26	25	25	25	24,3	24,2	24,2	25	24,7
2013	24,2	25,8	27,4	28	27,2	24,2	24,6	25,2					25,8
2014	24,2	24,6	27	26,8	25,2	25,2	26,2	23	24,6	24	24,8	24,6	25,0
2015	24,2	25,2	25,4	27,4			24,6	25,4	25	24,4	24	24,8	25,0

VARIABLE TEMPERATURA MÍNIMA PROMEDIO

DIMENSIONAL °C

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1997	6,8	6	5,9	7,3	5	9,4	9,7	9,5	9,7	8,1		7,9	7,8
1998	4,9	3,8	5,4	6,9	8,5	8,7	8,8	10,5	5	7,2	5,7	2,3	6,5
1999	2,3	5,2	4,8	8,7	10,5	9,3	9,3	10,4	10,7	9,5	5,7	5	7,6
2000	2,6	2,6	3,8	6,3	9,2	10,1	9,3	8,2	9	7,6	5,4	2	6,3
2001	1,6		1,9	4,8	9,2	8,5	7,4	7,0	7,4	7,2	4,7	5,9	1,9
2002	4,7	4,8	6	8,4	8	9,2	8,8	8,4	8,2	8,6	5,7	5,6	7,4
2003	5,2	4,1	5,6	6	8,7	9,6	9,4	8,8	8,6	8,7	4,9	1,9	6,8
2004	3,4	2,9	3,3	4,9	7					7,6	6,5	6	5,2
2005	3,2	4	5,5	7,6	9,5	10,5	9,6	9,7	10,7	9,8	7	6,3	7,8
2006	6	6	6	7	9	10	10	9,4	9,5	10	6,3	8	8,1
2007	6	5	7	9	9	11	11	11	11	11	8,6	6,5	8,8
2008	6,4	7	8	9	10	11	10	10	13	11	7,2	7	9,1
2009	6	6,4	5,2	8,5	11,5	11	11,3	11	11,3	11	9	7	9,1
2010	6,7	8,5	8,1	11	12,4	11,8	11,6	12,1	11,8	4	9,4	4,8	9,4
2011	6	6,3	6	8	10,5	11	11	11	11	10	7,8	5,8	8,7
2012	6,5	7	6	7,9	10,5	10,7	10,2	10,6	9,8	10	6,7	6	8,5
2013	7,7	7	7	9,1	10	12	10,4	9,9	10,8				9,3
2014	6	6,3	6	8	11	10	10,2	10	10,7	9,9	8	6,4	8,5
2015	6	6	6	8	ND	ND	10	9,7	11				

Continuación de la tabla XXII.

VARIABLE TEMPERATURA MÍNIMA ABSOLUTA

DIMENSIONAL °C

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1997	5	4	3	4,5	5	7	8,5	8	8,5	5,5		3,5	3
1998	1	1	0,5	4	5	7	6	8	5	5	1,5	0	0
1999	0	2,5	3	4	6,5	8	8	9	9	3	2	2,5	0
2000	0	0	0	2,5	5	6,5	7	6,5	7	4	4	1	0
2001	0		0,5	1	9	8	7	6	7	5	4	3,5	0
2002	1	3	4	8	8	8	7	7	7	8	2	4	1
2003	3	2	3	0	7	8,5	8	6	7,5	6,5	1	-4	-4
2004	1	5	0	0						4	0	0	0
2005	-0,5	-1	5,5	4	5	8	7,5	6	8	4	1	2	-1
2006	0,5	0,5	0,5	1,5	7	8	6,5	6	5,5	7,5	0,5	2	0,5
2007	2	1	3,5	5,5	6	8	8,5	7	5,5	4	4	2	1
2008	2,5	2,5	4	5	7	9	7	8	7,5	6	2	3	2
2009	0,5	-5	1	5	9	9	8	8	9	7	5	5	-5
2010	3	5	2	8	7	9	9	10	10	4	4	0	0
2011	9	4	1	3	7	7	9	8	8	4	3	4	1
2012	3	3	2	2	7	7	8	6	7	5,4	0,2	3	4,5
2013	3	4	1	6	6	8,4	8	6,2	8,4	9	5,2	3,6	5,7
2014	1,5	3,2	4	2,6	8,6	7	5,6	10	8,6	2	3,8	1,5	4,9
2015	0	2	2	4			7,5	7,2	8,5				

VARIABLE HUMEDAD RELATIVA MEDIA

DIMENSIONAL %

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
2006				70	75	77	78	81	89	89	89	90	82
2007	86	82	79	78	78	84	82	86	86	88	85	80	83
2008	83	81	79	77	84	88	87	84	86	87	81	78	83
2009	72	71	72	73	80	80	79	76	79	74	76	76	76
2010	73	76	67	75	80	79	82	83	82	83	81	78	78
2011	60	76	76	74	80	85	85	83	85	85	80	82	79
2012	81	79	77	76	83	85	81	83	84	85	83	78	81
2013	78	76	70	74	77	83	80	82	84	84	79	78	79

Continuación de la tabla XXII.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
2014	73	72	71	71	78	81	74	74	80	80	78	75	76
2015	75	71	70	70			73	71	78				

VARIABLE HUMEDAD RELATIVA MÁXIMA

DIMENSIONAL %

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
2006				70	75	77	76	81	89	89	89	90	90
2007	99	99	80	96	96	96	96	98	98	97	99	98	99
2008	99	99	98	97	98	98	98	98	98	97	95	95	99
2009	93	93	94	95	96	94	92	92	92	92	92	93	96
2010	90	92	91	93	92	91	93	94	92	96	95	96	96
2011	86	96	96	95	93	95	95	96	96	96	96	97	97
2012	97	96	94	96	96	96	96	95	96	96	97	95	96
2013	96	96	96	95	95	96	96	96	95	94	94	94	95
2014	97	89	82	95	95	95	94	95	94	95	95	95	93
2015	95	95	94	95			94	95	90				

VARIABLE HUMEDAD RELATIVA MÍNIMA

DIMENSIONAL %

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
2006				70	75	77	76	81	89	89	89	90	70
2007	64	52	47	44	49	57	42	59	58	66	59	46	42
2008	51	50	48	44	52	67	66	57	65	68	56	53	44
2009	53	52	47	51	67	61	60	62	58	58	63	62	47
2010	64	64	48	58	69	70	74	76	74	61	58	49	48
2011	40	44	44	43	81	62	60	57	61	65	53	54	40
2012	56	52	44	45	57	61	54	55	57	63	57	48	54
2013	49	39	37	41	45	55	51	53	54	53	56	47	48
2014	62	57	57	40	50	54	46	32	53	54	50	43	50
2015	45	42	40	37	ND	ND	45	40	51				

Continuación de la tabla XXII.

VARIABLE NUBOSIDAD
DIMENSIONAL OCTAS

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
2006				4	6	7	6	5	6	5	6	6	6
2007	5	5	5	5	6	5	6	7	7	7	6	4	6
2008	6	6	5	5	6	6	7	6	7	7	6	4	6
2009	5	6	4	5	6	6	6	7	5	6	5	3	5
2010	5	5	4	6	6	6	7	8	7	6	6	4	6
2011	3	5	5	5	6	7	7	7	7	7	6	5	6
2012	6	6	5	6	7	7	6	7	6	7	6	5	6
2013	6	5	5	6	6	7	6	6	7	7	6	6	6
2014	6	6	5	6	7	7	5	6	7	6	6	6	6
2015	6	6	7	6			7	6	8				

VARIABLE PRECIPITACIÓN
DIMENSIONAL MILÍMETROS

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1997	11,8	9,1	1,7	24,8	64,9	273,2	55,2	101,3	399,7	67,2		0	1008,9
1998	0	0	4,3	0	71	272,8	291,2	272,4	186,5	365,1	298,7	0	1762
1999	0	0	8	17	70,4	362	398,4	274,4	221,5	92,3	3,1	7,4	1454,5
2000	0	0	23,5	20	188	232	97,8	177,9	180,8	24,2	2,5	4,4	951,1
2001	0		2,3	0	94,3	89,2	239,5	161,5	41,8	56,7	11,2	11,3	707,8
2002	0	0	0	0	60	119,9	55,1	85	102,7	44,6	5	0	472,3
2003	0	13	2,3	27,5	229,7	231,7	241	103,5	271,5	145,3			1265,5
2004	4,4	6,9	6,9	35,3						197,1	10	1,2	261,8
2005	1,5	0	4	23	151,6	186,9	344,1	174,2	157,6	99,9	9,6	11,7	1164,1
2006	9,3	2,1	2,2	53,7	204,5	361,5	169,5	150,7	208,3	221,2	34,4	18,9	1436,3
2007	7,7	0	0	9,3	32,5	217,5	241,6	197	245,3	88,7	14,5	4,6	1058,7
2008	1,3	5,4	4	9,5	108	432,8	367,9	171,7	282,7	124,5	0	0	1507,8
2009	0	6,2	1,9	4,7	137,9	187,7	99,8	151,6	121,6	69,5	123,5	38,9	943,3
2010	0,6	0	0,3	40,5	307,5	227,6	222,7	353,9	253,4	62,5	19,1	9	1497,1
2011	0,9	5,6	6,9	19,3	17,8	270,7	314,2	282,8	98	279,2	20,4	2,1	1317,9
2012	6,2	15	3,7	75,1	193,6	126,3	105,7	264,2	161,5	99	3,6	3,6	1057,5
2013	3,2	3,3	3,9	20,9	157,2	152	289	265,5	190,8	241,2	0,7	3,2	1330,9
2014	0	0	0	26,2	72,9	342	24,7	130,2	272	192,2	7,8	2,2	1070,2

Continuación de la tabla XXII.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
2015	0,7	2,5	10,9	47,2			152,9	67,5	382,3				

VARIABLE PRECIPITACIÓN
DIMENSIONAL DÍAS


AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
2006				8	16	20	2	18	17	17	0	6	104
2007	6	0	0	4	6	19	17	17	23	16	5	4	117
2008	2	3	1	5	10	25	24	21	21	18	0	0	130
2009	0	5	1	2	18	19	15	17	13	13	8	3	114
2010	1	0	1	8	18	18	23	29	24	7	19	2	150
2011	2	4	3	5	9	24	24	22	23	16	9	2	143
2012	5	6	5	12	13	19	18	22	18	18	2	4	142
2013	3	4	4	3	15	23	16	19	25	23	2	3	140
2014	0	0	0	4	16	22	11	16	25	18	7	1	120
2015	2	2	3	5			15	11	25				

VARIABLE VELOCIDAD DEL VIENTO
DIMENSIONAL KM/H


AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
2006	8	5	6	8	6	3,8	2	5,3	6,6	4,3	8	9,1	6
2007	8,5	6,9	6,3	6,5	7,7	6	8,6	7,7	7,6	6,8	7,5	6,3	7,2
2008	7,5	4,1	3,5	4	3,2	4,3	3,5	4	4,1	4,9	5,2	3,9	4,4
2009	3,9	3,6	2,7	2,6	2,5	3,1	3,2	3	3,1	3	3,4	2,5	3,1
2010	2,6	2,3	2,2	1,8	1,9	2,1	1,7	1,7	1,6	1,5	1,5	1,3	1,9
2011	1,3	1,3	1,4	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,5	1,4	1,9	1,2	1,3
2012	1,5	1,2	1,4	1,2	1,2	1,3	1,3	1,2	1,2	1,3	1,4	1,4	1,3
2013	1,5	1,3	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1,1	1	1,1	1	1,2	1,2
2014	1,2	1,1	1,1	1,4	1,2	1,3	1,1	1,2	1,5	1,6	2,6	1,6	1,4
2015	2,2	1,6	1,5	1,1			1,5	1,2	1,1				

Fuente: INSIVUMEH, 2016.

Figura 17. Informe de Tecnología de la Madera CII



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Informe Tec - Madera O.T. No. 36183

INFORME
TEC - MADERA No. 01 - 2016

INTERESADO: Carlos Alejandro Alegre Ordoñez
PROYECTO: Optimización del proceso de secado solar de leña para su uso como biocombustible

DIRECCION: Sección de Tecnología de la Madera CII / USAC

MUESTRA: Madera de 3 especies: Encino, Ciprés y Capulín
FECHA: 13 de Julio del 2016

ENSAYO REALIZADO: DETERMINACION DE PORCENTAJE DE HUMEDAD

Ensayo No.1
Encino (*quercus tristicis*)

No.	IDENTIFICACIÓN DE PROBETA	Humedad %	Humedad Promedio (%)	Humedad % aserrín	Humedad Promedio (%)
1	c-1	7.768	15.161	13.401	13.407
2	c-2	8.647		13.218	
3	c-3	8.087		13.602	

Ensayo No.2
Ciprés (*cupressus lusitánica*)

No.	IDENTIFICACIÓN DE PROBETA	Humedad %	Humedad Promedio (%)	Humedad % aserrín	Humedad Promedio (%)
1	c-4	7.768	15.161	11.516	11.519
2	c-5	8.647		11.529	
3	c-6	8.087		11.512	

FACULTAD DE INGENIERÍA – USAC
 Edificio Emilio Beltranena, Ciudad Universitaria zona 12
 Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Exts. 86253 y 86252
 Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Continuación de la figura 17.



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Ensayo No.3
Capulín (trema micrantha)

No.	IDENTIFICACIÓN DE PROBETA	Humedad %	Humedad Promedio (%)	Humedad % aserrín	Humedad Promedio (%)
1	c-7	7.768	15.161	12.56	12.550
2	c-8	8.647		12.632	
3	c-9	8.087		12.458	

ENSAYO REALIZADO: DETERMINACION DE PORCENTAJE DE ABSORCIÓN

Ensayo No.1
Encino (quercus tristis)

No.	IDENTIFICACIÓN DE PROBETA	Absorción %	Absorción Promedio (%)
1	c-1	12.23	12.710
2	c-2	13.4	
3	c-3	12.5	

Ensayo No.2
Ciprés (cupressus lusitánica)



No.	IDENTIFICACIÓN DE PROBETA	Absorción %	Absorción Promedio (%)
1	c-4	13.56	13.557
2	c-5	14.21	
3	c-6	12.9	

Ensayo No.3
Capulín (trema micrantha)

No.	IDENTIFICACIÓN DE PROBETA	Absorción %	Absorción Promedio (%)
1	c-7	16.5	16.400
2	c-8	16.45	
3	c-9	16.25	

FACULTAD DE INGENIERÍA – USAC
Edificio Emilio Beltranena, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Exts. 86253 y 86252
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Continuación de la figura 17.

 **CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA** 

ENSAYO REALIZADO: **DETERMINACION DE LA DENSIDAD**

Ensayo No.1
Encino (*quercus tristis*)

No.	IDENTIFICACIÓN DE PROBETA	Densidad (gr/cm ³)	Densidad Promedio (gr/cm ³)
1	c-1	0.804	0.822
2	c-2	0.845	
3	c-3	0.817	

Ensayo No.2
Ciprés (*cupressus lusitánica*)



No.	IDENTIFICACIÓN DE PROBETA	Densidad (gr/cm ³)	Densidad Promedio (gr/cm ³)
1	c-4	0.664	0.6.53
2	c-5	0.645	
3	c-6	0.65	

Ensayo No.3
Capulín (*trema micrantha*)

No.	IDENTIFICACIÓN DE PROBETA	Densidad (gr/cm ³)	Densidad Promedio (gr/cm ³)
1	c-7	0.435	0.428
2	c-8	0.431	
3	c-9	0.417	

FACULTAD DE INGENIERÍA – USAC
Edificio Emilio Beltranena, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2418-9135 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Exts. 86253 y 86252
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Continuación de la figura 17.

 **CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA**
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA 

ENSAYO REALIZADO: **DETERMINACION DE PORCENTAJE DE CONTRACCIÓN VOLUMÉTRICA**

Ensayo No.1
Ciprés (*cupressus lusitánica*)

No.	IDENTIFICACIÓN DE PROBETA	Contracción Volumétrica	Contracción Vol. Promedio
1	c-1	12.35	12.13
2	c-2	11.89	
3	c-3	12.15	

Ensayo No.2
Ciprés (*cupressus lusitánica*)


No.	IDENTIFICACIÓN DE PROBETA	Contracción Volumétrica	Contracción Vol. Promedio
1	c-4	17	16.69
2	c-5	16.55	
3	c-6	16.54	

Ensayo No.3
Capulín (*trema micrantha*)


No.	IDENTIFICACIÓN DE PROBETA	Contracción Volumétrica	Contracción Vol. Promedio
1	c-7	18.52	18.86
2	c-8	18.95	
3	c-9	19.12	

FACULTAD DE INGENIERÍA – USAC
Edificio Emilio Beltranena, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Exts. 86253 y 86252
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Continuación de la figura 17.



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



ENSAYO REALIZADO: **DETERMINACION DE PORCENTAJE CENIZAS**

Ensayo No.1
Encino (*quercus tristis*)


No.	IDENTIFICACIÓN DE PROBETA	Cenizas %	Cenizas Promedio (%)
1	c-1	7.768	8.167
2	c-2	8.647	
3	c-3	8.087	

Ensayo No.2
Ciprés (*cupressus lusitánica*)


No.	IDENTIFICACIÓN DE PROBETA	Cenizas %	Cenizas Promedio (%)
1	c-4	5.208	5.192
2	c-5	5.262	
3	c-6	5.106	

Ensayo No.3
Capulín (*trema micrantha*)

No.	IDENTIFICACIÓN DE PROBETA	Cenizas %	Cenizas Promedio (%)
1	c-7	6.108	6.158
2	c-8	6.262	
3	c-9	6.106	



Ing. Dennis Salvador Argueta Mayorga
Jefe de la Sección de Tecnología de la Madera
Centro de Investigaciones de Ingeniería



Vo.Bo. Ing. Francisco Javier Guñonez De La Cruz
Director
Centro de Investigaciones de Ingeniería

FACULTAD DE INGENIERÍA – USAC
Edificio Emilio Beltranena, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Exts. 86253 y 86252
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: estudio realizado por la Sección de Tecnología de la Madera CII - USAC

Tabla XXIII. Toma de datos para estudio

Fecha	No.	Hora	Ti °	Te °	Encino		Ciprés		Capulín		Octas	Área colector	% Hi	% He
					Pi (g)	Pe (g)	Pi (g)	Pe (g)	Pi (g)	Pe (g)				
13/10/2015	1	10:00	19,9	18,3	1857	957	504	847	665	647	7	65	66	79
	2	13:10	32,2	23,7							7	50		95
	3	15:30	23,5	20,3							3	60		
14/10/2015	4	7:50	15,6	15,4	1816	920	500	802	641	596	8	0	78	79
	5	12:00	37,7	21,5							1	75	44	46
	6	15:50	25,0	19,3							5	5	72	72
15/10/2015	7	8:50	17,1	16,3	1782	891	486	763	608	559	8	5	84	87
	8	12:20	21,8	19,6							8	0	71	69
	9	16:10	20,3	18,3							8	0	78	78
16/10/2015	10	9:10	18,4	17,3	1768	873	479	753	596	540	8	0	90	87
17/10/2015	Lluvia													
18/10/2015	Lluvia													
19/10/2015	Lluvia													
20/10/2015	11	9:25	17,5	15,1	1737	875	478	750	571	530	8	0	91	92
	12	13:10	26,5	21,7							8	40	79	79
	13	18:00	17,5	22,3							8	0	93	92
21/10/2015	14	7:50	17,9	17,0	1728	871	474	744	567	524	8	0	93	92
	15	13:16	23,0	18,2			Lluvia				8	0	78	80
22/10/2015	16	10:10	20,9	18,0	1723	869	474	743	561	522	8	0	83	94
	17	13:20	38,6	21,2							1	95	59	61
	18	18:10	23,9	17,5							8	0	78	83
23/10/2015	19	9:00	18,3	16,7	1709	862	469	733	547	512	5	0	87	87
	20	13:10	27,8	23,1							6	95	63	65
	21	16:30	25,4	18,3							1	0	88	85
24/10/2015	22	14:15	25,0	18,4	1696	855	460	728	525	502	7	0	89	86
25/10/2015	23	9:40	20,7	18,3	1683	854	458	727	521	499	5	50	90	90
		10:45	31,9	25,3							4	85	54	50
		12:45	30,3	22,4							7	75	58	57
		13:40	29,7	22,0							8	30	62	61
		14:45	26,3	23,1							1	25	72	73
		15:35	25,4	21,6							8	20	71	71
26/10/2015	24	9:20	18,4	16,6	1672	851	450	726	504	496	8	15	91	91
	25	12:30	21,9	18,2							8	40	85	86
	26	15:10	20,0	17,5							8	30	89	87

Continuación de la tabla XXIII.

Fecha	No.	Hora	Ti °	Te °	Encino		Ciprés		Capulín		Octas	Área colector	% Hi	% He
					Pi (g)	Pe (g)	Pi (g)	Pe (g)	Pi (g)	Pe (g)				
27/10/2015	27	10:15	18,8	17,7	1667	841	449	722	500	487	8	25	78	84
	28	12:30	24,8	21,2							1	60	59	61
	29	13:30	33,1	20,3							1	100	54	54
	30	13:40	36,3	26,2							1	100	46	42
	31	14:00	26,6	20,3							8	20	43	49
	32	14:30	27,3	21,4							4	12	59	60
	33	15:50	24,7	21,5							4	0	70	68
28/10/2015	34	7:50	14,6	15,8	1658	843	447	719	481	481	0	0	89	83
	35	14:00	29,6	21,9							7	48	58	58
	36	17:30	23,7	17,8							8	0	80	79
29/10/2015	37	8:30	17,9	16,5	1646	839	436	717	473	477	8	0	87	85
	38	11:50	31,3	22,7							7	60	52	60
	39	15:25	26,0	21,5							8	15	66	65
30/10/2015	40	8:15	16,3	15,8	1637	837	429	715	460	473	1	0	88	81
	41	14:10	25,6	18,7							7	50	90	89
	42	15:45	25,0	20,5							7	15	75	74
31/10/2015	43	8:19	16,3	16,0	1628	836	425	715	449	470	0	0	86	88
02/11/2015	44	12:15	25,9	18,7	1601	824	403	703	418	456	1	20	53	58
	45	15:05	24,7	19,2							4	35	63	71
04/11/2015	46	11:30	31,9	17,7	1586	815	398	699	409	442	2	60	57	79
	47	13:00	31,2	17,9							4	90	54	66
05/11/2015	48	8:20	15,5	15,1	1575	815	392	698	399	440	6	0	76	80
	49	10:35	32,2	17,9							7	50	40	45
	50	16:00	24,6	17,6							8	0	67	71
06/11/2015	51	10:00	22,6	16,3	1567	813	387	698	383	438	2	50	80	88
07/11/2015	52	10:10	22,1	17,6	1562	812	384	698	380	437	8	35	77	84
	53	14:00	24,9	18,9							7	30	61	63
08/11/2015	54	8:35	16,5	15,5	1545	808	378	695	375	433	8	0	77	82
	55	14:45	24,6	18,6							8	5	66	71
	56	16:15	25,5	19,2							4	0	61	65
09/11/2015	57	10:00	21,3	16,6	1534	802	375	690	366	427	8	30	69	83
12/11/2015	58	12:35	27,4	18,8	1533	800	372	689	360	424	8	50	55	54
13/11/2015	59	13:35	22,6	17,6	1529	798	370	688	359	421	8	0	78	90

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. Integración de precios unitarios

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE SECADO SOLAR DE LEÑA PARA SU USO COMO BIOCOMBUSTIBLE					
Fecha	Octubre de 2015				
RENGLÓN	01	ACTIVIDAD	Colector solar		
CUANTIFICACION		OBSERVACIONES			
CANTIDAD	UNIDAD	Construcción de colector solar			
1,00	unidad				
MATERIALES					
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL	
Madera de pino, regla 3"x1-1/2"	pie tabla	28,10	Q6,50	Q182,65	
Clavo 1"	ibra	1,00	Q5,00	Q5,00	
Clavo 3"	ibra	1,00	Q5,00	Q5,00	
Vidrio claro 3 mm	m2	3,00	Q80,00	Q240,00	
Lámina de aluminio 28 mm	m2	6,90	Q30,00	Q207,00	
Pintura de aceite tono mate color negro	galón	0,50	Q45,00	Q22,50	
Silicón	unidad	1,00	Q35,00	Q35,00	
TOTAL MATERIALES				Q697,15	
MANO DE OBRA					
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL	
Carpintero	día	2,00	Q150,00	Q300,00	
Subtotal Mano de Obra				Q300,00	
Ayudante	días	3,00	Q80,00	Q240,00	
TOTAL MANO DE OBRA				Q460,00	
MAQUINARIA, HERRAMIENTA, EQUIPO					
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL	
Herramienta menor	global	1,00	Q23,00	Q23,00	
TOTAL MAQUINARIA				Q23,00	
COSTO TOTAL				Q1.180,15	
COSTOS INDIRECTOS				Q141,62	
IMPUESTOS				Q158,61	
PRECIO TOTAL				Q1.480,38	
PRECIO UNITARIO				Q1.480,38	

Continuación de la tabla XXIV.

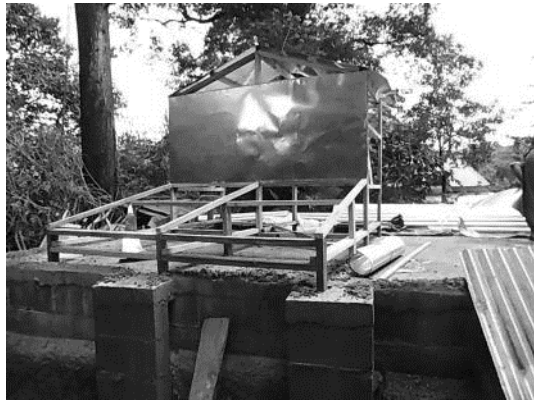
OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE SECADO SOLAR DE LEÑA PARA SU USO COMO BIOCOMBUSTIBLE					
Fecha		Octubre de 2015			
RENGLÓN	02	ACTIVIDAD	Cámara de secado		
CUANTIFICACION		OBSERVACIONES			
CANTIDAD	UNIDAD	Construcción de cámara de secado			
1,00	unidad				
MATERIALES					
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL	
Madera de pino, regla 3"x1-1/2"	pie tabla	44,80	Q6,50	Q291,20	
Clavo 1"	ibra	1,50	Q5,00	Q7,50	
Clavo 3"	ibra	1,50	Q5,00	Q7,50	
Tubo PVC 3"	unidad	1,00	Q50,00	Q50,00	
Lámina de aluminio 28 mm	m2	25,84	Q30,00	Q775,20	
Pintura de aceite tono mate color negro	galón	1,00	Q45,00	Q45,00	
Bisagras 3x1	unidad	6,00	Q3,00	Q18,00	
Silicón	unidad	2,00	Q35,00	Q70,00	
TOTAL MATERIALES				Q1.264,40	
MANO DE OBRA					
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL	
Carpintero	día	2,00	Q150,00	Q300,00	
Subtotal Mano de Obra				Q300,00	
Ayudante	3,00	2,00	días	Q80,00	Q160,00
TOTAL MANO DE OBRA				Q460,00	
MAQUINARIA, HERRAMIENTA, EQUIPO					
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL	
Herramienta menor	global	1,00	Q23,00	Q23,00	
TOTAL MAQUINARIA				Q23,00	
COSTO TOTAL				Q1.747,40	
COSTOS INDIRECTOS				Q209,69	
IMPUESTOS				Q234,85	
PRECIO TOTAL				Q2.191,94	
PRECIO UNITARIO				Q2.191,94	

Continuación de la tabla XXIV.

OPTIMIZACION DEL PROCESO DE SECADO SOLAR DE LEÑA PARA SU USO COMO BIOCOMBUSTIBLE					
Fecha		Octubre de 2015			
REGLÓN	03	ACTIVIDAD	Operación de equipo		
CUANTIFICACION		OBSERVACIONES			
CANTIDAD	UNIDAD	Operación del equipo			
1,00	global				
MATERIALES					
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL	
Nylon negro	yarda	5,00	Q30,00	Q150,00	
Tarea de leña	tarea	1,00	Q500,00	Q500,00	
TOTAL MATERIALES				Q650,00	
MANO DE OBRA					
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL	
Ayudante	días	30,00	Q20,00	Q600,00	
Subtotal Mano de Obra				Q600,00	
TOTAL MANO DE OBRA				Q600,00	
MAQUINARIA, HERRAMIENTA, EQUIPO					
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL	
Papelería variada	global	1,00	Q30,00	Q30,00	
Equipo para toma de datos	global	1,00	Q90,00	Q90,00	
TOTAL MAQUINARIA				Q120,00	
COSTO TOTAL				Q1.370,00	
COSTOS INDIRECTOS				Q164,40	
IMPUESTOS				Q184,13	
PRECIO TOTAL				Q1.718,53	
PRECIO UNITARIO				Q1.718,53	

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Proceso constructivo de secador solar**

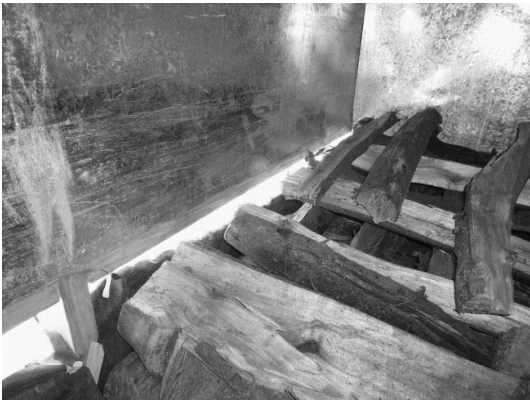


Continuación de la figura 18.



Fuente: fotografía tomada por el autor.

Figura 19. Toma de datos para estudio



Continuación de la figura 19.



Fuente: fotografía tomada por el autor.

Tabla XXV. Ahorro energético Encino (*quercus tristis*)

ENCINO (<i>quercus tristis</i>)		
Punto de ignición de la madera	320	°C
Calor específico del encino (<i>quercus tristis</i>)	2386	J/kg°C
Calor específico del agua	4186	J/kg°C

Inicialmente, se calcula la capacidad calórica del encino (*quercus tristis*), asumiendo que el biocombustible está a 25,0 % de contenido de humedad y pesa 750 g.

Continuación de la tabla XXV.

masa	0,750	kg
calor específico	2386	J/kg°C
temperatura	320	°C
Capacidad calórica encino (<i>quercus tristis</i>)	0,573	MJ

Posteriormente, se calcula la capacidad calórica del agua retirada en el proceso, colocando el delta de masa y un delta de temperatura de la temperatura ambiente (24,8 °C) al punto de ebullición del agua (100 °C).

masa	1,107	kg
calor específico	4186	J/kg°C
temperatura	75,2	°C
Capacidad calórica agua	0,348	MJ
Asumiendo un consumo de 600 leños de encino (<i>quercus tristis</i>) al mes:		
Húmedo	209,08	MJ
Seco (25 %)	343,58	MJ
Diferencia	134,50	MJ

La diferencia de energía constituye el ahorro energético en el proceso de secado del encino (*quercus tristis*)

37,36 **Kwh**

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. Ahorro energético Ciprés (*cupressus lusitánica*)

CIPRÉS (*cupressus lusitánica*)

Punto de ignición de la madera	320	°C
Calor específico del ciprés (<i>cupressus lusitánica</i>)	1591	J/kg°C
Calor específico del agua	4186	J/kg°C

Inicialmente, se calcula la capacidad calórica del ciprés (*cupressus lusitánica*), asumiendo que el biocombustible está a 25,0 % de contenido de humedad y pesa 300 g.

masa	0,3	kg
calor específico	1591	J/kg°C
temperatura	320	°C

Capacidad calórica del ciprés (<i>cupressus lusitánica</i>)	0,153	MJ
--	--------------	-----------

Posteriormente, se calcula la capacidad calórica del agua retirada en el proceso, colocando el delta de masa y un delta de temperatura de la temperatura ambiente (24,8 °C) al punto de ebullición del agua (100 °C).

masa	0,204	kg
calor específico	4186	J/kg°C
temperatura	75,2	°C

Capacidad calórica agua	0,064	MJ
--------------------------------	--------------	-----------

Asumiendo un consumo de 600 leños de ciprés (*cupressus lusitánica*) al mes:

Húmedo	38,53	MJ
Seco (25 %)	91,64	MJ
Diferencia	53,11	MJ

Continuación de la tabla XXVI.

La diferencia de energía constituye el ahorro energético en el proceso de secado del ciprés (*cupressus lucitánica*)

14,75 Kwh

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. Ahorro energético Capulín (*trema micrantha*)

CAPULÍN (<i>trema micrantha</i>)		
Punto de ignición de la madera	320	°C
Calor específico del capulín (<i>trema micrantha</i>)	1298	J/kg°C
Calor específico del agua	4186	J/kg°C

Inicialmente, se calcula la capacidad calórica del capulín (*trema micrantha*), asumiendo que el biocombustible está a 27,23 % de contenido de humedad y pesa 359 g.

masa	0,359	kg
calor específico	1298	J/kg°C
temperatura	320	°C

Capacidad calórica del capulín (<i>trema micrantha</i>)	0,149	MJ
--	--------------	-----------

Posteriormente, se calcula la capacidad calórica del agua retirada en el proceso, colocando el delta de masa y un delta de temperatura de la temperatura ambiente (24,8 °C) al punto de ebullición del agua (100 °C).

Continuación de la tabla XXVII.

masa	0,306	kg
calor específico	4186	J/kg°C
temperatura	75,2	°C

Capacidad calórica agua 0,096 MJ

Asumiendo un consumo de 600 leños de capulín (*trema micrantha*) al mes:

Húmedo	57,79	MJ
Seco (27,23 %)	89,47	MJ
Diferencia	31,67	MJ

La diferencia de energía constituye el ahorro energético en el proceso de secado del capulín (*trema micrantha*)

8,80 Kwh

Fuente: elaboración propia.



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN ENERGÍA Y AMBIENTE

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE SECADO SOLAR DE LEÑA PARA SU USO COMO BIOCOMBUSTIBLE

OCTUBRE DE 2015

OBSERVACIONES

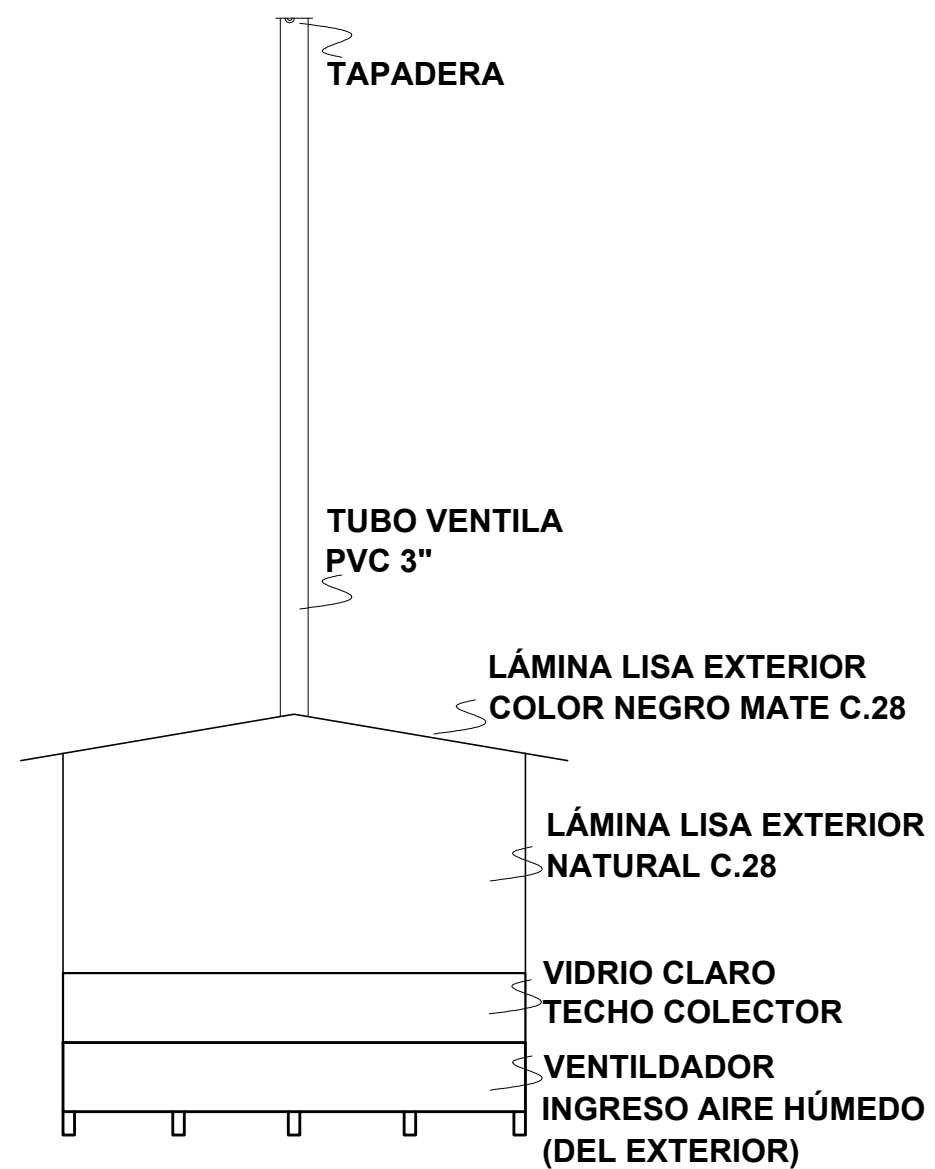
CARLOS ALEJANDRO ALEGRE ORDÓÑEZ

PLANO:

DISPOSICIÓN DE CUBIERTAS DE SECADOR SOLAR

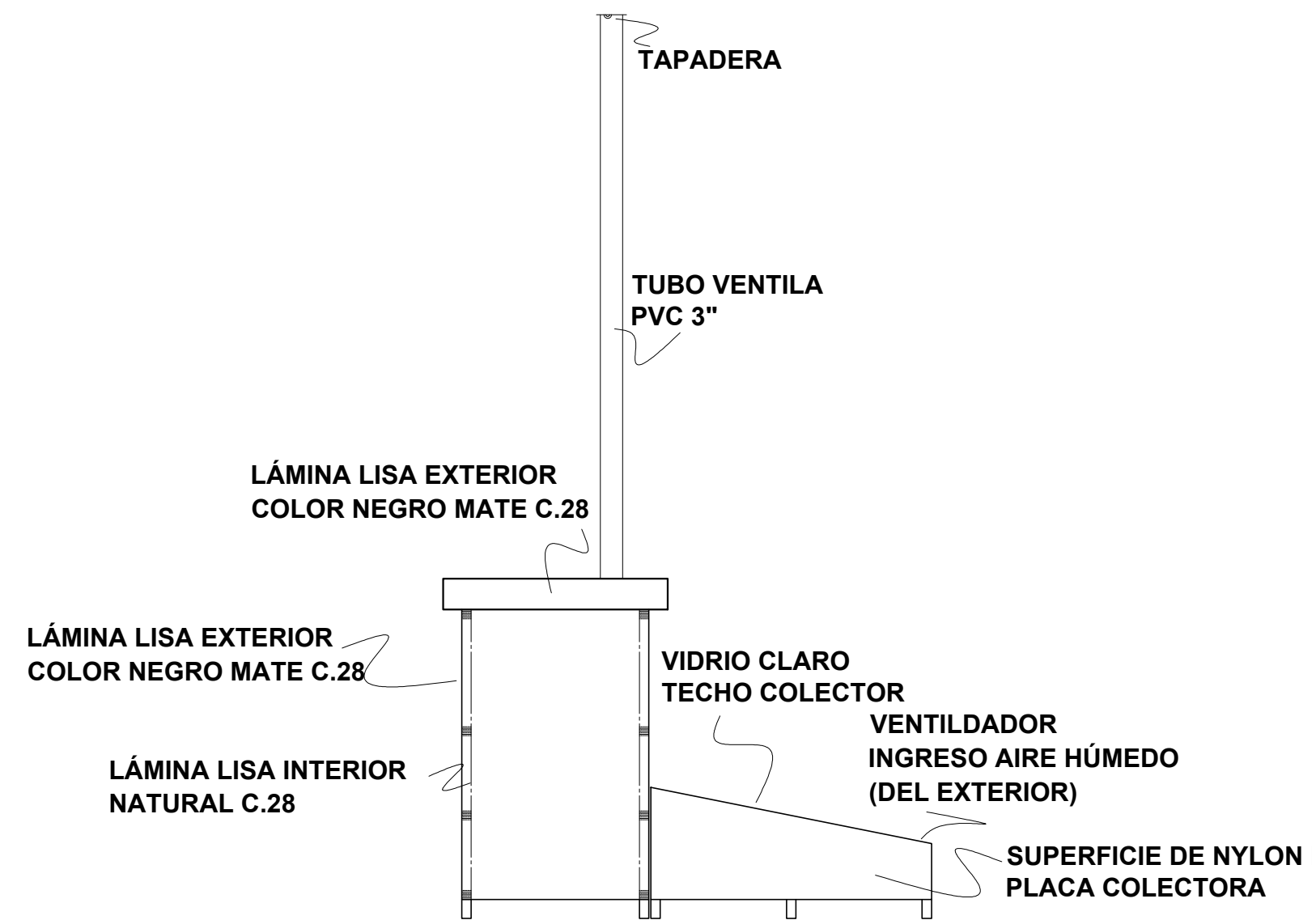
ESCALA 1:30

02 DE 03



FRONTAL SECADOR SOLAR .-

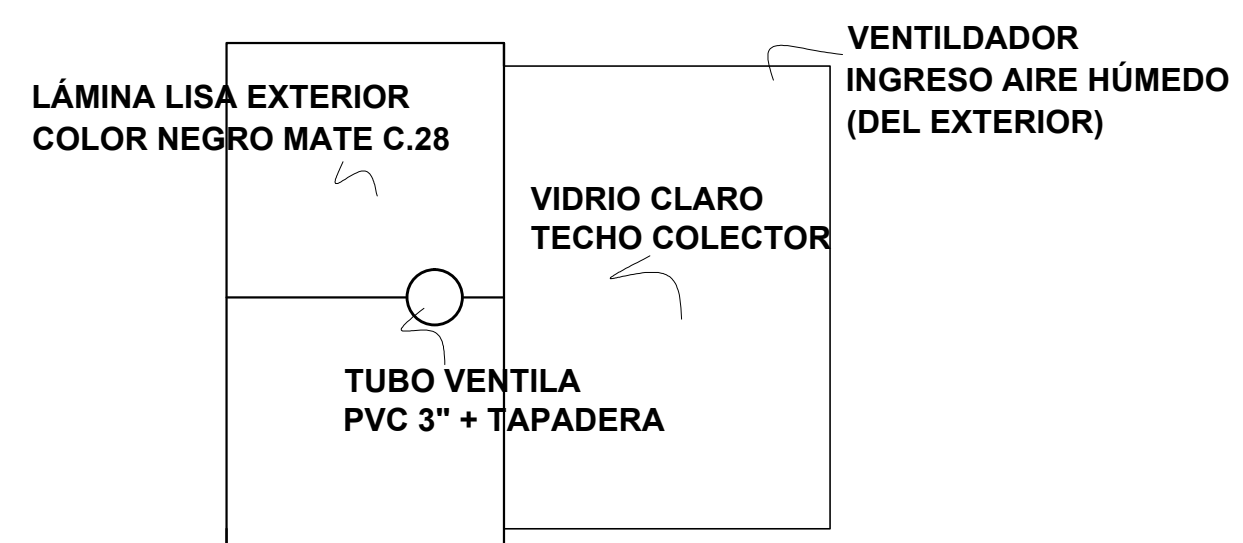
ESCALA 1:30



LATERAL SECADOR SOLAR .-

ESCALA 1:30

- El techo del colector solar es de vidrio de 3 mm de espesor .-
- El techo de la cámara de secado es de lámina de aluminio lisa calibre 28 pintada color negro mate .-
- Las paredes del colector solar y de la cámara de secado son en el exterior de lámina de aluminio lisa calibre 28 pintada color negro mate. En el interior son de lámina de aluminio lisa calibre 28 sin pintura .-
- El aislante a utilizar es aire, cuyo espesor está confinado acorde a la estructura de madera de soporte del secador solar (ver el detalle en el plano 03/03) .-



PLANTA SECADOR SOLAR .-

ESCALA 1:30



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN ENERGÍA Y AMBIENTE

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE SECADO SOLAR DE LEÑA PARA SU USO COMO BIOCOMBUSTIBLE

OCTUBRE DE 2015

OBSERVACIONES

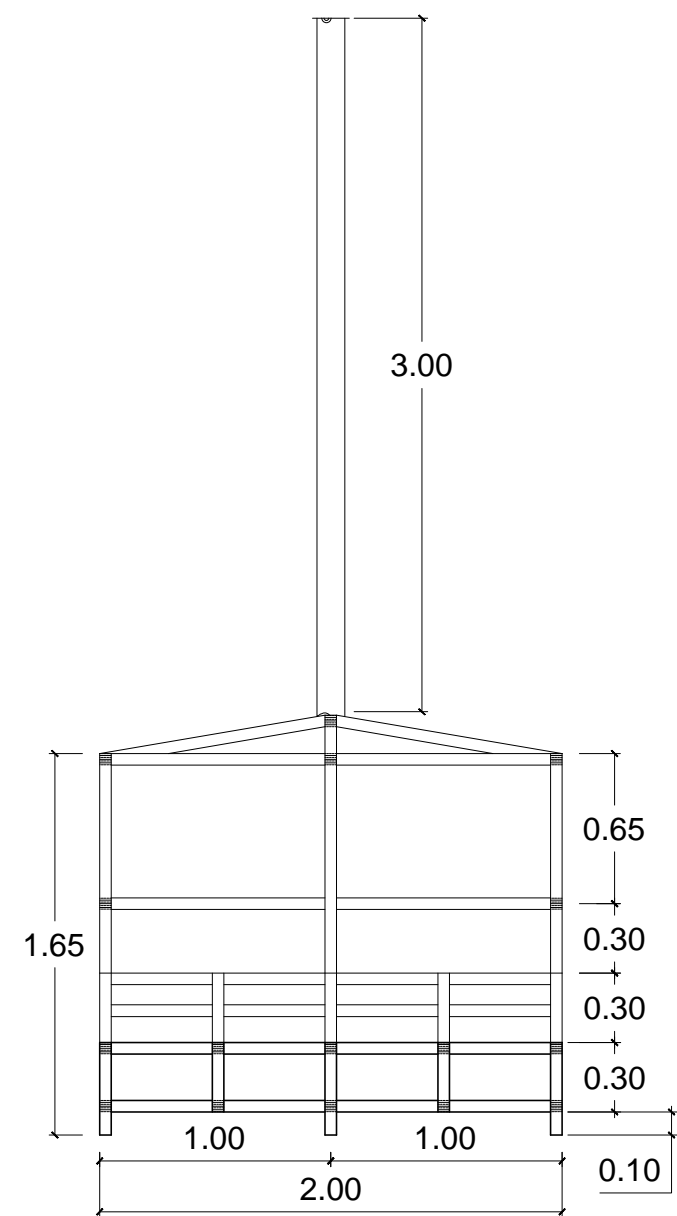
CARLOS ALEJANDRO ALEGRE ORDÓÑEZ

PLANO:

DISPOSICIÓN ESTRUCTURAL ACOTADA DE SECADOR SOLAR

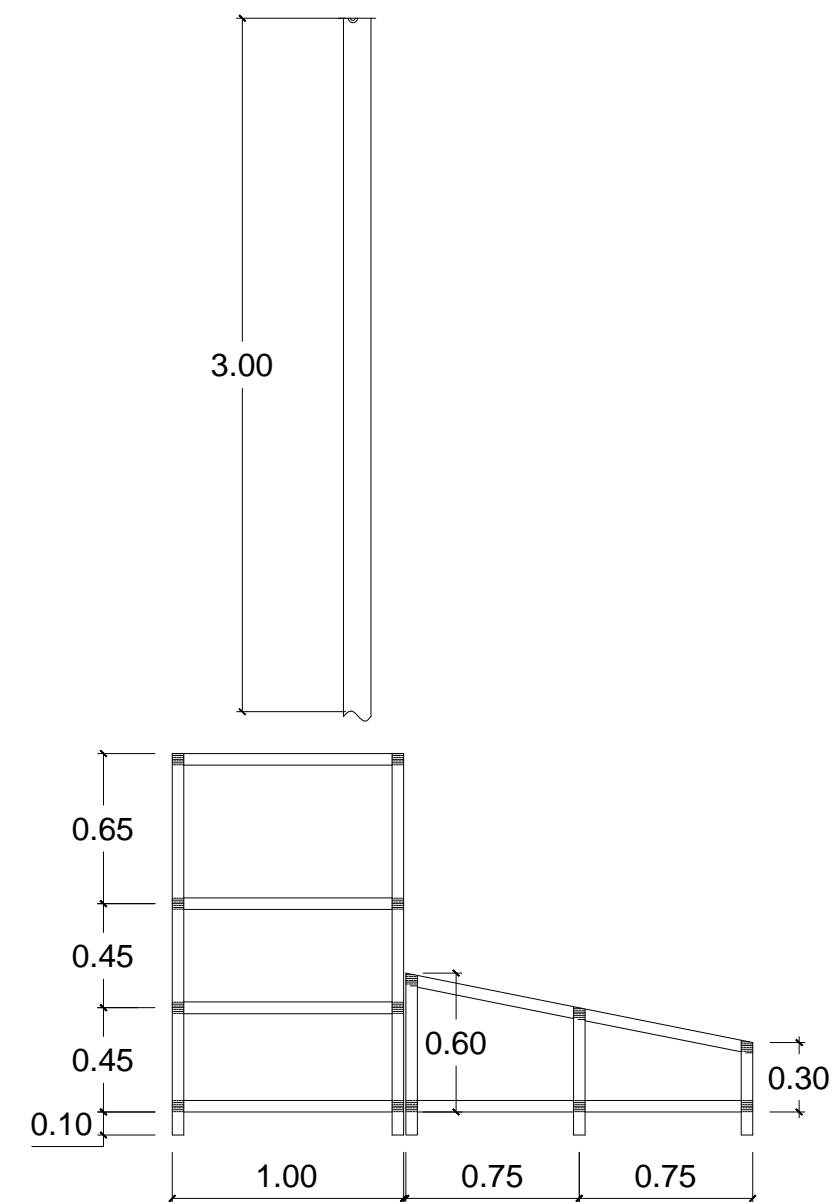
ESCALA 1:30

01 DE 03



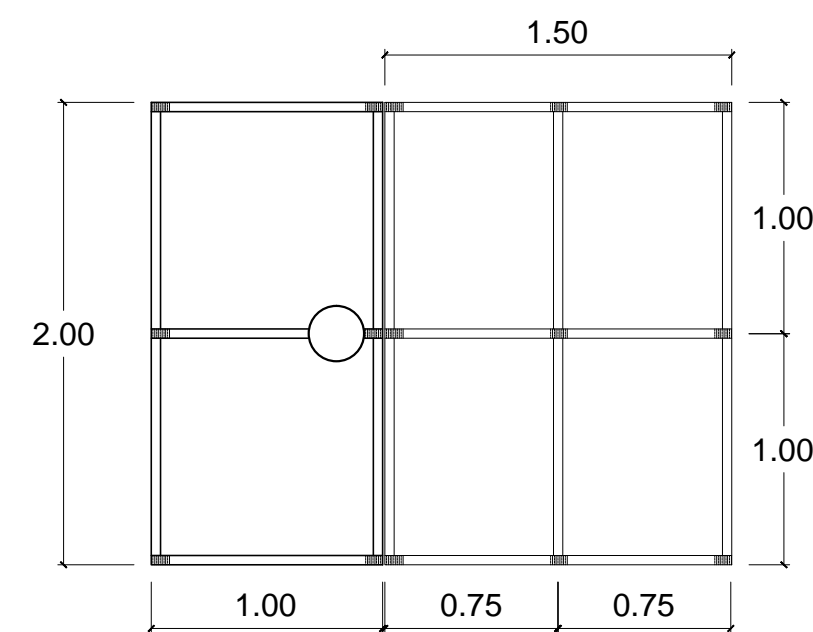
FRONTAL SECADOR SOLAR .-

ESCALA 1:30



LATERAL SECADOR SOLAR .-

ESCALA 1:30



PLANTA SECADOR SOLAR .-

ESCALA 1:30

Toda la estructura de soporte a utilizar es de madera de pino de sección 3" x 1 1/2" .-
El detalle de anclaje entre los elementos estructurales y la lámina está en el plano 03. Las unidades de medida de las dimensiones indicadas están en metros .-
La conexión de aire entre el colector solar y la cámara de secado es directa, permitiendo el paso directo entre ambos componentes .-



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN ENERGÍA Y AMBIENTE

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE SECADO SOLAR DE LEÑA PARA SU USO COMO BIOCOMBUSTIBLE

OCTUBRE DE 2015

OBSERVACIONES

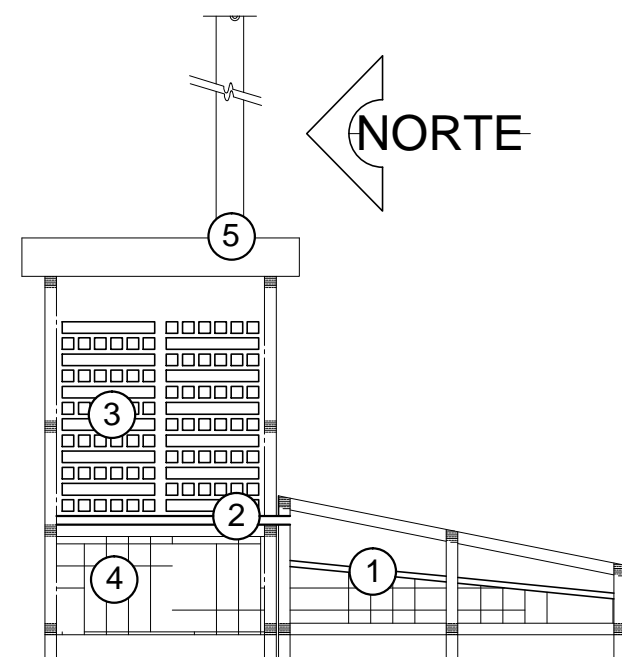
CARLOS ALEJANDRO ALEGRE ORDÓÑEZ

PLANO:

DETALLES GENERALES DE SECADOR SOLAR

ESCALA INDICADA

03 DE 03



DETALLE DE FLUJO DE AIRE

ESCALA 1:30

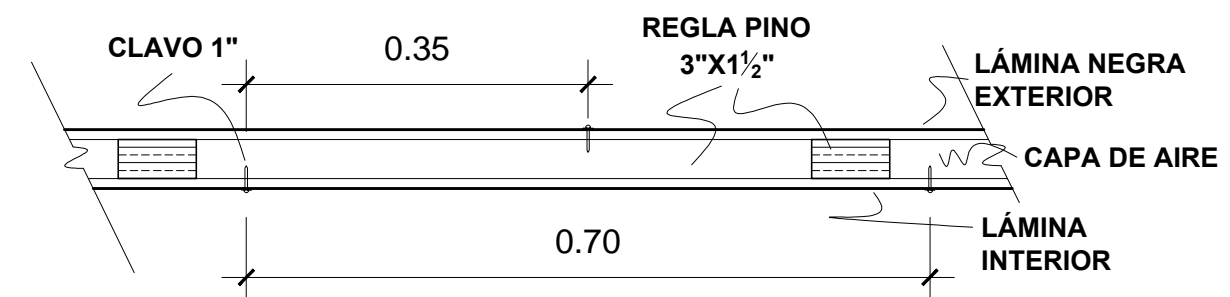
(1) El aire hmedo ingresa al colector solar proveniente del ambiente. En el interior del colector se produce un incremento de la temperatura del aire debido al efecto invernadero que ocurre en su interior por la influencia del sol .-

(2) El aire con mayor temperatura, debido a la física de gases en diferentes ambientes de presión y temperatura, por medio de ventanas pasa a la cámara de secado en donde incrementará gradualmente la temperatura interna .-

(3) El aire con mayor temperatura pasa entre las trozas de leña hmedas dispuestas en la cámara de secado. Se realiza entre ellas una transferencia de calor por convección, reduciendo así el contenido de humedad de las trozas. el agua retirada y condensada precipita y el aire caliente sigue su flujo hacia las áreas de menor temperatura y mayor presión en la cámara de secado .-

(4) Capa de aire en el interior de la cámara de secado. Su función es mantener la temperatura interna de la cámara y el dren del agua precipitada hacia su salida .-

(5) Ventilador de aire hmedo. Se retira cuando su humedad es mayor a la del ambiente .-



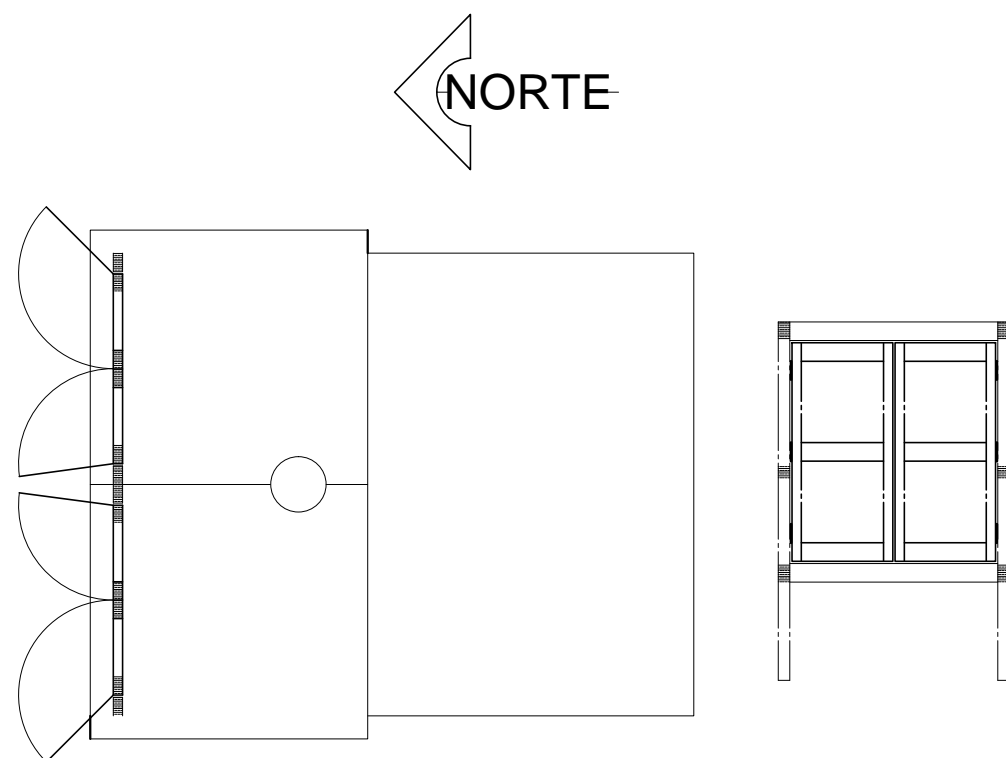
DETALLE ANCLAJE DE LÁMINA

SIN ESCALA

La vista es en planta, las distancias están en metros. En elevación, sobre las piezas de estructura de madera, se colocarán tornillos para anclaje de piezas en forma transversal .-

El aislante a utilizar es aire. En la unión entre las láminas de conformación de muros se colocará silicona de uso general .-

Entre las láminas de conformación de muros no se colocará traslape, dejando los mismos a ras y colocando silicona de uso general entre ambas .-



DETALLE DE PUERTA DE CÁMARA

ESCALA 1:30

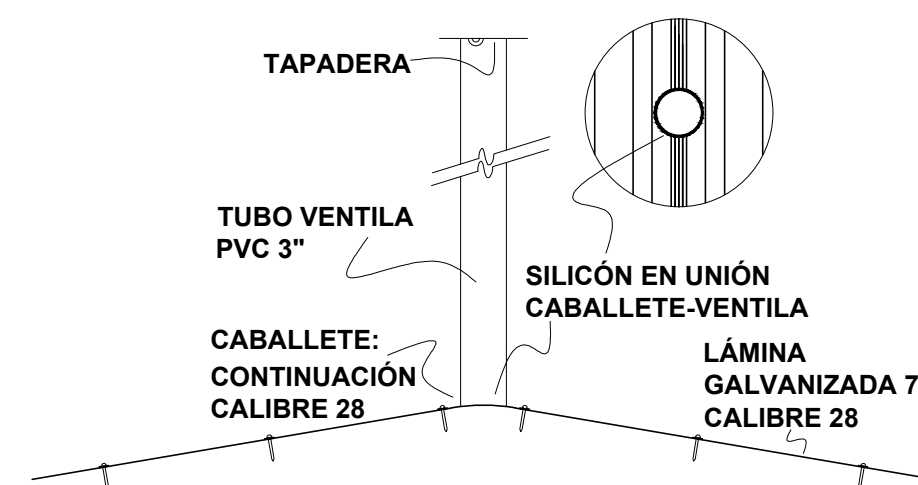
En la cara norte del secador se colocarán dos hojas de puerta para colocación de las trozas a secar .-

Las puertas serán de estructura de madera de pino de sección 3" x 1 1/2", cubierta con doble lámina de aluminio calibre 28 (de color negro mate y natural en exterior e interior respectivamente), distribuidas como se muestra en la imagen .-

Ambas puertas serán sostenidas por medio de 03 bisagras 3" x 2" abatibles hacia afuera .-

El límite de los marcos de todas las hojas se recubre con hule para mejorar su aislamiento .-

Con fin de confinamiento, entre las 04 hojas, atraviesa transversalmente una pieza de madera de pino de 3" x 2" que funciona como tope en el abatimiento de las hojas .-



DETALLE DE TECHO EN CÁMARA

SIN ESCALA

Los clavos a utilizar son de 1" (mismos a utilizar en todo el secador) .-

El silicón a utilizar en juntas de lámina y contactos externos es el de uso general (mismo a utilizar en todo el secador) .-

En el sentido perpendicular a la vista en elevación, la distribución de clavos coincidirá en donde haya estructura de soporte .-

El anclaje de la ventila PVC 3" será sobre la estructura de madera, quedando la misma en donde su posición sea favorable .-