

**PRÁCTICA DE ESPECIALIDAD  
MI-4404**

**ALFA COMPANY**



**PROYECTO:  
HORNO SOLAR PARA SECADO DE MADERA**

**INFORME DE PRÁCTICA DE ESPECIALIDAD PARA OPTAR POR EL TÍTULO  
DE INGENIERO EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL, GRADO LICENCIATURA**

**FABIÁN BONILLA CÁRDENAS**

**CARTAGO, 10 de Junio del 2015**



- Canadian Engineering Accreditation Board
- Bureau canadien d'accréditation des programmes d'ingénierie

Carrera evaluada y acreditada por:

**CEAB**

Estudiante en práctica:  
Fabián Bonilla Cárdenas

Asesor industrial:  
Ing. Jonathan Barquero Méndez

Profesor guía:  
Ing. Oscar Monge

## Agradecimientos

Quisiera en primer lugar dar mi agradecimiento a Dios todo poderoso, quien me ha dado las fuerzas para siempre seguir hacia adelante, ha sido mi guía y con sabiduría me ha llevado por el buen camino

Seguido a mis padres y a mi hermano que siempre han realizado todos los esfuerzos necesarios para que yo pueda llevar acabo mis estudios, además siempre han sido un apoyo incondicional durante este período de estudios y en todos mis años de vida. También le agradezco a mis amigos que siempre estuvieron pendientes del proceso de la realización de la práctica.

Le agradezco mucho a Alfa Company y a todo su personal por haberme dado su apoyo y colaboración para lograr terminar de la mejor manera este proyecto y siempre tener confianza en la realización de este proyecto por el bienestar de la empresa.

## Índices

### Contenido

Agradecimientos.....	iii
Índices de figuras .....	vii
Índice de tablas .....	viii
Índice de ecuaciones.....	ix
Resumen .....	10
Capítulo 1. Descripción de la empresa.....	11
Nombre de la empresa .....	11
Misión .....	11
Visión.....	11
Reseña histórica .....	11
Organización de la empresa .....	12
Descripción del proceso productivo .....	13
Capítulo 2. Conceptualización del Horno de Secado .....	14
Introducción .....	14
Objetivos.....	14
Objetivo general .....	14
Objetivos específicos .....	14
Antecedentes.....	15
Capítulo 3. Marco teórico .....	16
Características de la madera .....	16
Contenido de humedad.....	17
Secado de la madera.....	17
Tipos de sistema de secado de la madera .....	18
Secado natural de la madera.....	18
Sistemas de apilado de la madera secada al natural .....	21
Calidad del aire de secado natural .....	23
Duración del secado natural.....	24
Mejora del secado natural .....	24
Ventajas e inconvenientes del secado natural .....	24
Secado artificial .....	24
Cámaras para secado artificial de la madera .....	24
Características y componentes de una cámara de secado.....	25
Características y elementos básicos que debe poseer una cámara para secado de madera.....	25
Clasificación de las cámaras de secado por su eficiencia de secado.....	28
Presecadores .....	28
Presecador con calefacción .....	28
Presecador con calefacción y recirculación de aire.....	29
Secadores.....	29
Secadores Convencionales.....	30

Secadores continuos o túneles .....	31
Deshumidificadores .....	31
Clasificación de las cámaras de secado por su aporte de calor .....	33
ACPM y otros combustibles líquidos derivados del petróleo .....	33
Gas .....	34
Carbón y leña .....	34
Energía eléctrica .....	35
Energía solar .....	35
Sistemas mixtos .....	36
Secadores de vacío .....	36
Otros métodos de secado .....	36
Secadoras solares .....	37
Funcionamiento .....	39
Colector Solar .....	42
Secado en cámara mediante aire caliente climatizado .....	46
Características constructivas de las cámaras .....	47
Características y diseño del sistema de circulación del aire interior .....	53
Secado tradicional a temperatura media ( $\leq 80^{\circ}\text{C}$ ) .....	56
Descripción del método .....	56
Secaderos discontinuos .....	57
Secaderos tipo túnel o continuos .....	58
Control y operación de un secador .....	59
Conducción manual .....	62
Conducción semi-automática .....	63
Conducción automática .....	63
Capítulo 4 Descripción del horno de secado .....	65
Colector solar .....	65
Distribución energética .....	65
Constante y características de las superficies .....	66
Fórmulas .....	67
Balances de energía en diferentes puntos .....	70
Sistema de ventilación y cámara de secado .....	83
Sistema de Ventilación .....	83
Cámara de secado .....	87
Sistema eléctrico .....	93
Sistema alterno .....	95
Capítulo 5 Análisis Financiero .....	95
Colector solar .....	96
Sistema de ventilación y cámara de secado .....	97
Costo por mano de obra .....	99
Caso 1 Análisis de garantías .....	100
Caso 2. Análisis por consumo eléctricos .....	100
Caso 3 Solicitando préstamo .....	101
Caso 4 Secado exterior .....	101
Capítulo 6 Finalización .....	102

Limitaciones .....	102
Conclusiones .....	102
Bibliografía .....	103
Capítulo 7 Apéndices .....	104
Manual de Operación.....	104
Capítulo 8 Anexos .....	107
Capítulo 9 Glosario.....	108

## Índices de figuras

Figura 1. Apilado de madera rolliza .....	19
Figura 2. Disposición de las pilas de madera en el patio de secado .....	20
Figura 3. Sistemas principales de apilado de la madera .....	22
Figura 4. Vista Lateral de secador solar para maderas .....	38
Figura 5. Vista superior secador solar para madera.....	39
Figura 6. Gráfico de comparación de secado solar contra secado al aire libre .....	40
Figura 7. Comparación de curvas de secado solar y secado al aire de la especie Caoba hondureña, usando espesores de una pulgada y dos pulgadas .....	40
Figura 8. Pérdida de calor en un colector de placa plana.....	43
Figura 9. Tipos de Puerta.....	52
Figura 10. Tipos de sistemas de ventilación.....	55
Figura 11. Secador tradicional.....	58
Figura 12. Secador Tradicional continuo .....	59
Figura 13. Variación del contenido de humedad CH de la madera en función del tiempo.....	61
Figura 14. Solución a malos recorridos del aire y a tamaño insuficiente de pilas dentro de una cámara de secado.....	62
Figura 15. Distribución del calor en todas sus formas .....	65
Figura 16. Plano constructivo de colector solar .....	82
Figura 17. Estructura de Madera del colector y posición de los vidrios .....	82
Figura 18. Abanico principal .....	84
Figura 19. Abanicos de Distribución.....	85
Figura 20. Selección de Damper .....	86
Figura 21. Ubicación del sistema de ventilación en la cámara de secado.....	87
Figura 22. Detalle Lateral de la cámara de secado .....	88
Figura 23. Modulación de cargas de madera .....	89
Figura 24. Vista frontal de la cámara de secado y detalle de las ventilas .....	90
Figura 25. Modulación de cargas en diferentes circunstancias .....	91
Figura 26. Esqueleto de Madera, capa aislante y recubrimiento interno de metal .....	92
Figura 27. Interior de cámaras de secado .....	92
Figura 28. Esqueleto interior de la cámara de secado para colocar el recubrimiento .....	93
Figura 29. Diagrama de conexión eléctrica .....	94
Figura 30. Diagrama de Conexión entre el tablero principal y los motores .....	95
Figura 31. Costo de KWh Coopeguanacaste .....	101

## Índice de tablas

Tabla 1. Funciones y efectos de los instrumentos básicos que pueden encontrarse en un secador.....	60
Tabla 2. Temperatura del vidrio, placa y media en K y °C.....	71
Tabla 3. Características del aire a la temperatura media .....	72
Tabla 4. Número de Rayleigh a la temperatura correspondiente .....	73
Tabla 5. Número de Nusselt a la temperatura correspondiente .....	73
Tabla 6. Coeficiente de convección a la temperatura correspondiente .....	74
Tabla 7. Coeficiente de radiación entre la placa y el vidrio a la temperatura correspondiente.....	75
Tabla 8. Temperatura en la cámara interna de aire correspondiente a la temperatura ambiente .....	76
Tabla 9. Temperatura media entre el ambiente y la placa en K y °C .....	76
Tabla 10. Características del aire a la temperatura media .....	77
Tabla 11. Número de Rayleigh asociado a la temperatura correspondiente .....	78
Tabla 12. Número de Nusselt asociado a la temperatura correspondiente .....	78
Tabla 13. Coeficiente de convección entre el flujo de aire y el vidrio .....	79
Tabla 14. Coeficiente de convección entre la placa y el aire fluyendo .....	80
Tabla 15. Temperatura de la cámara de aire al hacer ingresar aire a temperatura ambiente.....	81

## Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Contenido de humedad de la madera.....	17
Ecuación 2. Coeficiente de Llenado .....	25
Ecuación 3. Formula de transferencia de calor por conducción .....	43
Ecuación 4. Formula general de la radiación térmica.....	44
Ecuación 5. Radiación térmica entre dos superficies planas.....	44
Ecuación 6. Transferencia de calor de una superficie pequeña a una superficie infinita.....	45
Ecuación 7. Formula general de convección.....	45
Ecuación 8. Formula general del Número de Rayleigh .....	46
Ecuación 9. Fórmula general del Nusselt .....	46
Ecuación 10. Longitud característica para cualquier superficie.....	67
Ecuación 11. Conducción en el vidrio .....	68
Ecuación 12. Conducción en la placa .....	68
Ecuación 13. Coeficiente de convección de la cámara de aire al vidrio .....	68
Ecuación 14. Coeficiente de convección de la placa a la cámara de aire .....	69
Ecuación 15. Coeficiente de conducción entre el vidrio y el exterior .....	69
Ecuación 16. Coeficiente de radiación del vidrio con el exterior.....	69
Ecuación 17. Coeficiente de radiación entre la placa y el vidrio.....	70

## Resumen

Este proyecto se concibió con el fin de diseñar un horno para secar madera utilizando una energía alternativa y aprovechándola al máximo. Para esto se decidió utilizar la energía solar ya que es abundante en la zona, y favorece a este horno con los diferentes requerimientos sugeridos por la empresa.

Con este diseño se pretende tener un horno solar para el secado de madera utilizando todos los conocimientos adquiridos en el ámbito universitario e investigados, con el fin de generar planos constructivos, mecánicos, eléctricos, demostrar temperaturas de trabajo y distribución de la irradiación solar en sus diferentes formas de calor y cómo son absorbidas o perdidas por el colector solar, conocer el sistema de automatización, el sistema de ventilación para el transporte del aire caliente, la cámara interna de secado de madera, la forma de acomodar la madera dentro de la cámara, la recirculación del aire caliente y ventilación y expulsión del aire frío en la cámara de secado

## Capítulo 1. Descripción de la empresa

### Nombre de la empresa

Alfa Company S.A

### Misión

“Buscamos seguir siendo una empresa costarricense líder en la construcción, con los más altos estándares de servicio, calidad, responsabilidad y seriedad, comprometidos con satisfacer y exceder las necesidades de nuestros clientes. Trabajamos para continuar siendo una empresa orgullosa de su producto. Una empresa confiable y honesta.”

### Visión

“Deseamos seguir siendo líder en el sector construcción, trabajando en una constante actualización, para lograr la máxima satisfacción de nuestros clientes. Buscando siempre las mejores técnicas y sistemas constructivos y ser una empresa que trascienda fronteras con excelencia, satisfaciendo las expectativas de nuestros clientes a través de la calidad, precios competitivos y plazos seguros.”

### Reseña histórica

Alfa Company, S.A. es una empresa dedicada a la construcción de obras civiles, acabados internos, remodelaciones, administración de proyectos y servicios de asesoría.

La empresa nació constituida por capital ciento por ciento costarricense, fue inscrita en el Registro Público desde el año 2009. Cuenta con profesionales con alta experiencia en la supervisión y dirección de proyectos de ingeniería civil de gran magnitud y complejidad, por medio de servicios de excelencia, alto nivel de cumplimiento y calidad en el servicio.

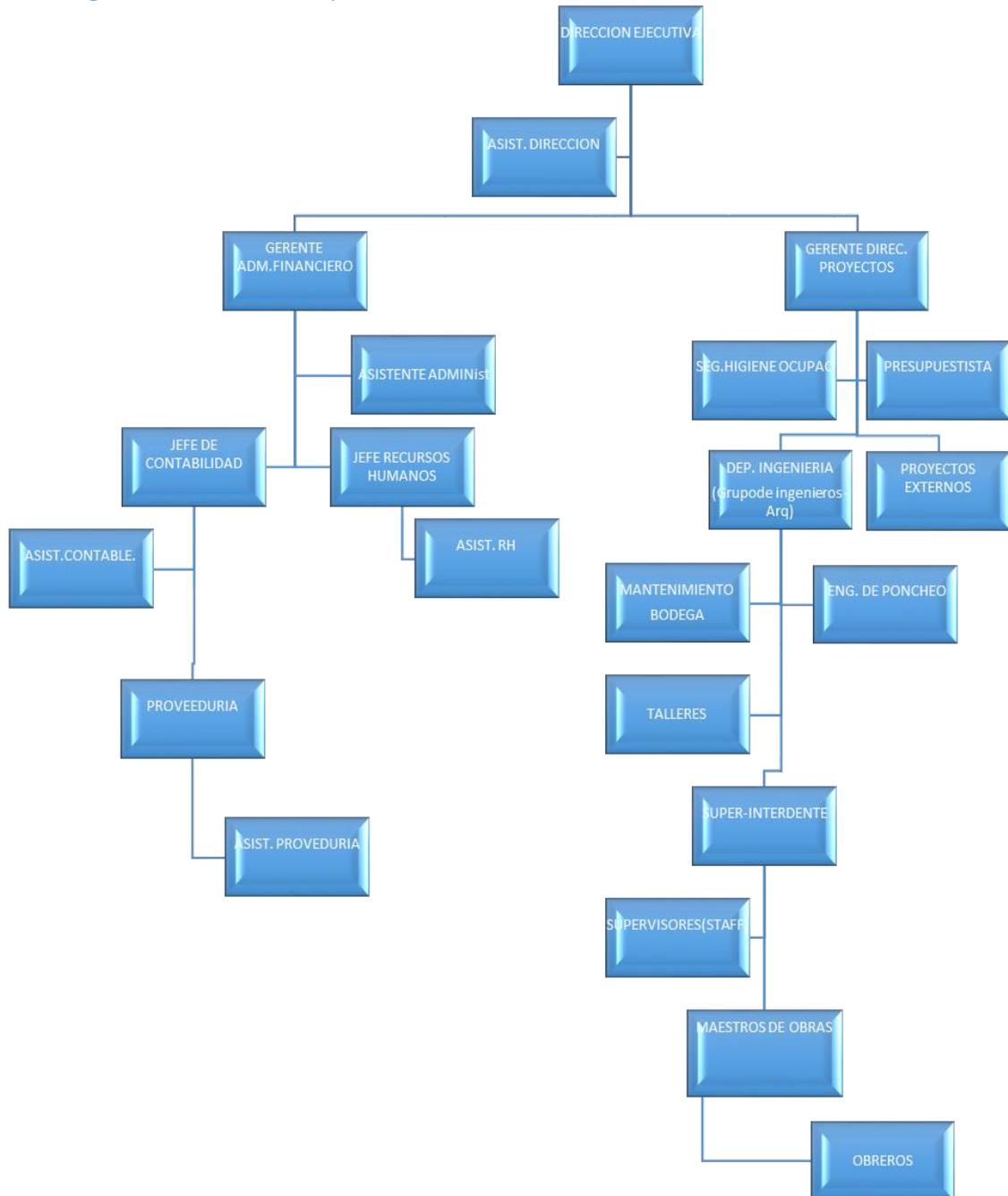
Dentro de las áreas de construcción desarrolladas por Alfa Company se encuentran: la construcción de edificios, viviendas de alto nivel, bodegas, obras de urbanización, etc.

Alfa Company, S.A siempre está mejorando aquellos aspectos que el avance de la tecnología así lo requiera, con el propósito de mantener el servicio que se ofrece en el campo de la construcción.

Ha adquirido un compromiso con la excelencia para satisfacer a sus clientes, construye bajo los estándares más altos de calidad, seguridad y cumplimiento, y su

personal se actualiza constantemente para cumplir con la filosofía la empresa. "**trabajando para construir sus sueños**"

Organización de la empresa



Fuente: ALFA COMPANY

Figura 1. Organigrama Alfa Company

#### Descripción del proceso productivo

Dicha empresa se dedica al levantamiento de edificaciones y habitaciones bajo el sistema de llave en mano y de garantía negociada con el cliente por un tiempo determinado, El proceso inicia con las fundaciones para soportar la edificación, seguido a esto se realiza lo que es la chorroa y levantamiento de paredes en conjunto con los elementos electromecánicos para el funcionamiento de la edificación hasta llegar al nivel superior donde se coloca el techo, Finalizado esto, inicia la etapa de los detalles relacionados con los cielo rasos, puertas, las ventanas, los muebles y la colocación de equipos. Se finaliza con la entrega de la casa. La empresa se responsabiliza por cualquier asunto relacionado con la construcción por medio de una garantía.

## Capítulo 2. Conceptualización del Horno de Secado

### Introducción

La conceptualización de realizar un secador solar para madera nace de la idea de aprovechar este tipo de energía como un recurso inagotable, siempre y cuando se descarte cualquier otra forma de secado que mejore el proceso de obtención de energía ya seleccionado. Hacer uso de la energía solar ayuda al medio ambiente en cuanto a que no hay emisión de gases para el secado de madera ni tampoco existe consumo eléctrico, por lo que nunca se va a incurrir en facturación eléctrica. Además, obtiene un grado de humedad menor en la madera y el proceso es más rápido y eficaz que el secado natural.

### Objetivos

#### Objetivo general

- Diseñar un sistema de secado para madera utilizando el calor del sol con base en los parámetros requeridos por Alfa Company.

#### Objetivos específicos

- Aprovechar la energía de la incidencia de los rayos solares para el sistema de secado.
- Diseñar un sistema alternativo en caso de no tener disponible la energía solar.
- Desarrollar un cuarto secador modular para obtener capacidad variable de madera dentro del secador.
- Edificar un sistema de construcción portátil para poder ser instalado en cualquier lugar del proyecto.
- Evaluar la factibilidad de la puesta en marcha del secador en cuanto a costo total y situación actual de la empresa.
- Juzgar el proceso de secado de madera más eficiente y que se acople de la mejor manera a las necesidades de Alfa Company.
- Diseñar el colector solar que supla las características requeridas para el funcionamiento óptimo del secador.
- Diseñar un manual de uso para el óptimo funcionamiento del secador

### Antecedentes

El problema de la madera nace en el momento en que las casas ingresan en el periodo de garantía, ya que para este tiempo la madera empieza a perder la forma dada en cualquiera de los productos. En otras palabras empieza a presentar reventaduras, se tuerce o simplemente se abre en algún punto, debido a que en el momento que se trabaja la madera, ella no está lo suficientemente seca (no ha alcanzado el 12% de Humedad Relativa límite impuesto por el desarrollador) o todavía continúa secándose y presenta estos problemas. Lo anterior le genera a la empresa incurrir en gastos extras sobre el precio inicial de la casa debido a que estos trabajos deben de ser cubiertos por la garantía adquirida, lo cual implica mandar a una persona a ver el problema, buscarle solución, mandar a pedir materiales para arreglarla, procesar la madera, buscar la persona realizar el trabajo. De no ser así este personal usado para las garantías puede ser utilizado en otros lugares de trabajo para generar avances (Ver sección de anexos para más detalles con respecto a la problemática con la madera)

## Capítulo 3. Marco teórico

### Características de la madera

La madera por ser una sustancia higroscópica retiene o cede cierta cantidad de agua, dependiendo de la humedad relativa del ambiente en que se encuentre.

El secado de la madera consiste en extraer el agua contenida en ella sin causarle grandes daños. El agua dentro de la madera se encuentra en dos formas: agua libre, que se encuentra en las cavidades celulares, y agua atada, la cual está unida a los constituyentes de la red celular. La primera es relativamente fácil de eliminar, mientras que el agua atada es necesario invertir cierta cantidad de energía adicional. En algunos casos, el agua contenida en la madera puede significar el 75% o más del peso total de la misma.

Algunas ventajas que se obtienen al secar la madera son las siguientes:

- **Disminución de peso**, lo que reduce considerablemente los costos por concepto de transporte de este material.
- **Estabilidad dimensional**, ya que la madera no sufrirá cambios apreciables en sus dimensiones, si se seca a un nivel de humedad similar al que tendrá en el ambiente en que se va a utilizar.
- **Mayor resistencia**, puesto que se ha comprobado que puede aumentar hasta un 33% más su resistencia con respecto a la madera verde.
- **Protección a la degradación**. La madera, sometida a un eficiente secado y mantenida con un bajo contenido de humedad (menos de 20%), nunca sufrirá el ataque de hongos. Además algunos insectos que atacan madera verde no atacarán la madera que haya sido secada adecuadamente.
- **Mejor preservación**. La madera seca podrá ser impregnada con sustancia perseverantes. Este efecto se logra de una forma más eficiente, cuando se usan productos no hidrosolubles o cuando el tratamiento se realiza bajo presión.
- **Aceptación y retención de acabados**. Conforme la madera posea un menor contenido de humedad tendrá mayor capacidad de aceptar y retener en buen estado cualquier todo de acabado.
- **Aumento de adhesividad**. La madera que se someten a un proceso de secado, obtendrá una mejora considerable en las propiedades adherentes, por lo que se obtendrán juntas más estables y de mayor resistencia.
- **Mayor trabajabilidad**. La madera con bajo contenido de humedad presenta mejores propiedades para ser trabajada, por lo que puede ser elaborada en forma más eficiente y se obtiene un producto final mejor terminado.
- **Mayor resistencia eléctrica**. El secado aumenta la resistencia eléctrica, lo

que permite utilizar la madera seca como aislante de la conductividad eléctrica.

- **Aumento de resistencia térmica.** Los espacios celulares e intercelulares de la madera seca se encuentran ocupados por aire, lo que reduce la transmisión de calor.

### Contenido de humedad

El contenido de humedad de la madera (C.H.) se define como el peso de la cantidad de agua presente, expresado como porcentaje con respecto al peso de la madera seca al horno (peso del material leñoso). Matemáticamente se expresa de la siguiente forma:

$$CH = \frac{Pv - Ps}{Ps} \times 100$$

Ecuación 1. Contenido de humedad de la madera

Fuente: (Eduardo Sibaja Arias, 1985)

Donde:

- CH=Contenido de humedad
- Pv= Peso verde
- Ps=Peso seco

Con éste parámetro, el C.H. de los árboles va desde un 30% hasta un 200% o más; lo que da una idea de la variabilidad de contenidos de humedad con que la madera llega a los centros de procesamiento.

El C.H. con que se debe trabajar la madera depende del uso que se le dará y de las condiciones climáticas de la región de que proceda el producto. Por ejemplo, para manufactura de muebles en Costa Rica se puede trabajar con un 15% de C.H. en promedio, mientras que, en algunas regiones de Estados Unidos, el C.H. no debe ser mayor de un 8%.

### Secado de la madera

Hay dos formas de extraer el agua de la madera: el secado natural o al aire, y el secado artificial o en hornos.

La velocidad de secado, ya sea natural o artificial, depende de los factores internos y externos. Los factores internos son los relacionados con la madera, entre los que se destacan la especie de madera, el tipo de madera, el espesor de madera, y el contenido de humedad inicial y final. Entre los factores externos están la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad o circulación del aire.

En el secado natural o al aire, los factores externos no pueden ser controlados, por lo que la duración del proceso de secado dependerá de las

condiciones ambientales. Se presentan variaciones de tiempo de secado desde un mes y medio hasta un año o más.

En el secado artificial, los factores externos pueden ser controlados y variados por el ser humano, con lo que se puede reducir el tiempo de secado hasta 20 veces con respecto al secado al aire. En este sistema existen varios métodos entre los que se pueden destacar el secado convencional o con fuente de calor y fuente de humedad, y el secado por deshumidificación cuyo principio se puede resumir en un sistema de recirculación de aire. Según este sistema, el aire se hace pasar por un condensador para condensar el agua existente en él. Una vez seco pasa a través de la madera donde, por transferencia de masa, el agua pasa al aire.

La industria de la madera en Costa Rica está compuesta principalmente por pequeñas empresas que, en la mayor parte de los casos, no pueden pagar ninguno de los dos sistemas, y trabajan la madera sin secar o con un contenido de humedad incorrecto para los usos que le dan. Una solución a este problema son las “secadoras solares”.

#### Tipos de sistema de secado de la madera

##### Secado natural de la madera

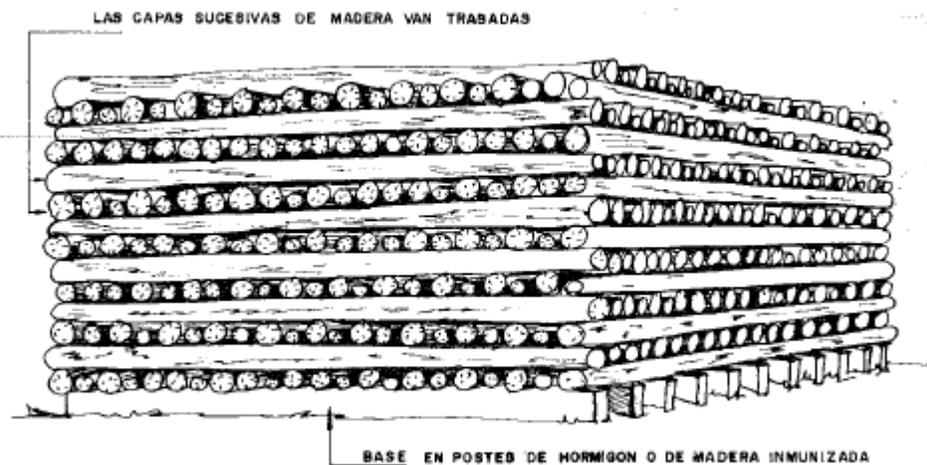
Es la forma más simple de secar la madera. Consiste en la exposición directa de la madera al medio ambiente. La temperatura, la humedad relativa, la velocidad y la presión del aire ambiente llevan a cabo el secado hasta el contenido de humedad de equilibrio CHE del lugar.

##### **Secado natural de la madera rolliza**

Desde el momento mismo de la tala la madera inicia su proceso de secado. Si la urgencia del aprovechamiento lo permite, las ramas y las hojas del árbol en tierra deben conservarse durante una o dos semanas con el fin de acelerar la salida de los líquidos que contiene la madera. El árbol descortezado presenta una mayor superficie de madera expuesta al aire libre, lo cual acelera el secado. Como la salida de humedad es más rápida en el sentido de las fibras, el tiempo de secado disminuye partiendo el tronco en longitudes tan cortas como lo permitan las dimensiones de la madera que se busca obtener. El corte del tronco en varios pedazos debe realizarse con precaución, puesto que aumenta la tendencia de la madera a rajarse. Ciertas maderas rollizas que han sido sometidas a flotación en agua alcanzan una distribución más homogénea de la humedad en su interior y su comportamiento mejora durante el proceso de secado.

### Apilado de la madera rolliza

La manera corriente de apilar la madera rolliza consiste en armar pilas conformadas por planos horizontales, de superficie determinada por la longitud de los trozos: El primer tendido se separa del piso por medio de durmientes; los siguientes tendidos se cruzan cada vez en ángulos rectos con el anterior, hasta una altura que permita transportar sin tropiezo las trozas que por lo general son pesadas. Entre las trozas de un mismo tendido horizontal se dejan separaciones de unos 5 cm para facilitar la formación de corrientes ascendentes de aire que contribuyen al secado.



Fuente: (Johnson, 1998)

Figura 2. Apilado de madera rolliza

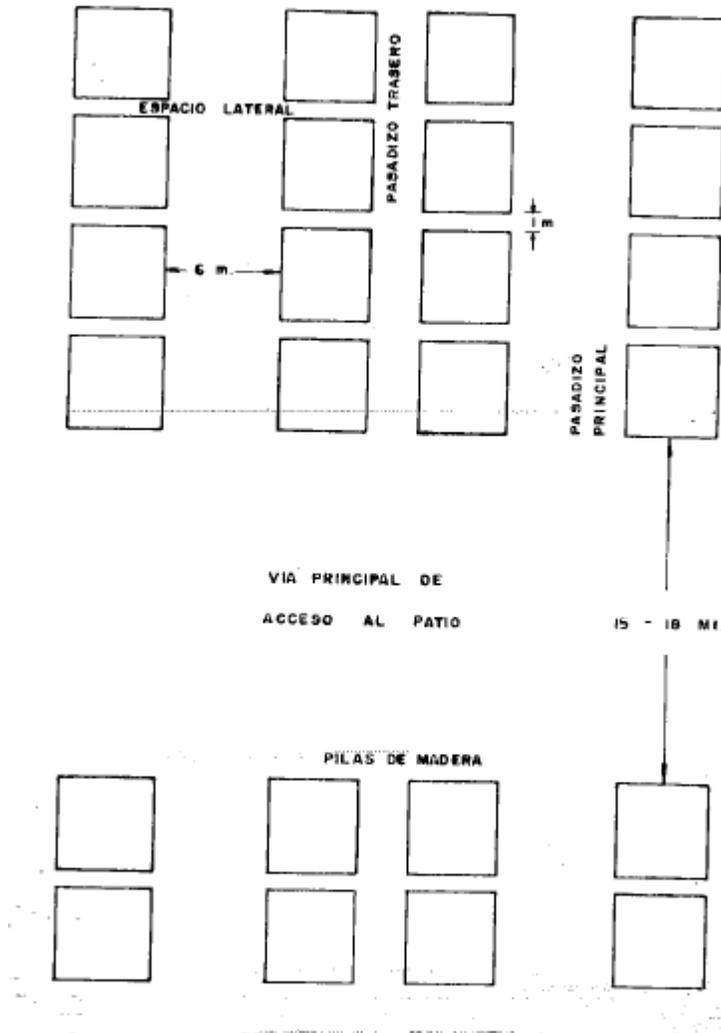
Otra modalidad de apilado de uso general en las plantas de secado e inmunizado de madera rolliza emplea separadores reutilizables entre los tendidos horizontales de trozas.

### Secado natural de la madera aserrada

El secado natural de la madera aserrada se realiza en patios de secado. Estos son terrenos planos, de piso duro y compactado, situados en lugares no inundables que poseen un buen drenaje, libre de obstáculos y de vegetación que impidan la libre circulación del viento.

En el patio de secado se dispone la madera en pilas. Un apilado correcto es fundamental para tener un buen resultado en el secado. Entre las pilas se dejan pasadizos de al menos 60cm y corredores suficientes para permitir la circulación de los medios de transporte de la madera. Si el sistema de transporte

lo permite, por ejemplo, cuando se utilizan montacargas es posible disponer una pila sobre otra conformando volúmenes de unos 4 metros de alto, por 1,20m de ancho por el largo de las piezas. Cuando las pilas son altas debe prevenirse el volcamiento utilizando riostras o diagonales que amarren las pilas unas con otras. Aunque existen varias formas de disponer las pilas en el patio de secado, la disposición mostrada en la figura 2 es la más utilizada, porque parece ajustarse mejor a las condiciones de secado al aire libre.



Fuente: (Johnson, 1998)

Figura 3. Disposición de las pilas de madera en el patio de secado

Cuando se va a secar en patio la madera bien aserrada y con alto contenido de humedad, es aconsejable no exponerla al sol directo para evitar grietas y decoloración. La madera muy húmeda debe tratarse con un baño de pentaclorofenato de sodio al 2% que la preserve contra el ataque de hongos. Para equilibrar la salida del agua que puede ser hasta 3 veces mayor en el sentido de

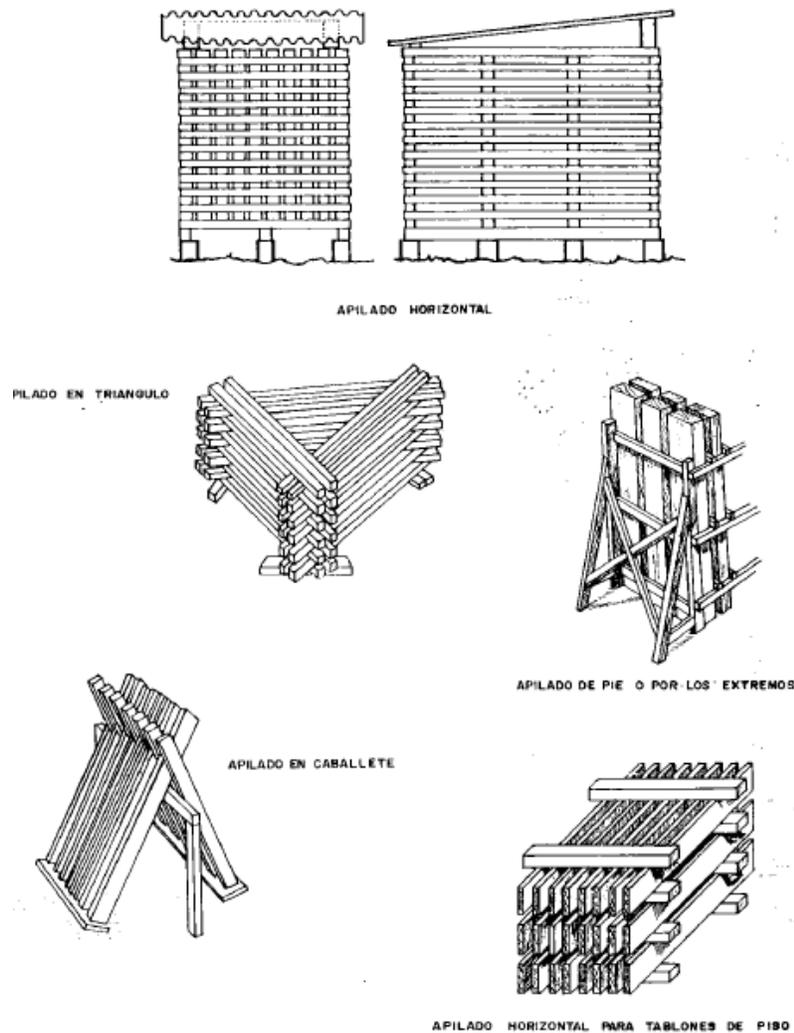
las fibras, las testas de las tablas se cubren con una capa de sellador para evitar rajaduras en los extremos y secado disperejo en las piezas de madera.

Las pilas deben hacerse sobre bases o fundaciones hasta de 50cm de alto según el tipo de piso, que las separen del terreno para evitar que la madera absorba la humedad del suelo y para crear corrientes ascendentes de aire que contribuyen al secado cuando no hay viento; además, las piezas deben separarse entre sí una distancia igual a su espesor.

Las pilas deben conformarse con madera de la misma especie, del mismo espesor y si es posible del mismo contenido de humedad.

#### Sistemas de apilado de la madera secada al natural

Existen 4 sistemas principales de apilado de la madera en el patio de secado: apilado horizontal, apilado en caballete, apilado por los extremos y apilado en triángulo.



Fuente:(Johnson, 1998)

Figura 4. Sistemas principales de apilado de la madera

**Apilado horizontal:** es el sistema más común, puesto que se presta al secado de todos los tipos corrientes de piezas de madera. Es simple, eficiente y ocupa poco espacio. Las pilas ocupan una superficie de 3 X 1,20 metros y su altura se limita a 2.5m cuando la pila se conforma a mano o a 4m. Cuando se utilizan montacargas. Las pilas se cubren con un techo que protege la madera de la lluvia y de los efectos nocivos del sol directo. El techo puede ser una estructura liviana con cubierta metálica o cualquier material que sobrepase los costados de las pilas unos 30cm y permita proteger las pilas; El techo se amarra para evitar que los vientos fuertes lo arrastren. Entre dos tendidos consecutivos de piezas de madera se disponen separadores, estos se fabrican de madera seca y recta de especies de poco valor comercial. Estos colocan a escuadra o en ángulo recto con respecto a la fibra de la madera y alineado en el sentido vertical para que transmitan directo al suelo el peso de las pilas.

Se deben colocar separadores en los extremos de las piezas de madera para reducir las rajaduras y las grietas en las testas. La dimensiones de los separadores y la distancia entre ellos debe ser consecuente con el espesor y la cantidad de piezas que soportan. Por ejemplo, para tablas de 3cm de espesor en una pila de 2m de altura pueden utilizarse separadores de 2.5 x 2.5cm colocados a 50cm de distancia. Las pilas deben disponerse en el patio de tal forma que queden perpendiculares a la dirección de los vientos de tal manera que éstos circulen por el túnel formado por dos separadores contiguos, atraviesen la pila y le extraigan la humedad a la madera.

**Apilado en caballete:** las tablas se colocan de canto, en posición casi vertical, de modo que se apoyen abajo en la base de las pilas y arriba descansen en una viga horizontal situada a una altura consecuente con la longitud de las piezas. Debe colocarse una tabla a un lado y la siguiente al lado contrario, de manera que los extremos de la tabla se crucen por encima del travesaño formando una X. Debido a los grandes espacios libres entre la tabla, este apilado puede reducir hasta la mitad el tiempo de secado de coníferas por encima del punto de saturación de las fibras PSF, respecto al tiempo de secado del apilado horizontal. Por debajo del PSF, las coníferas secadas en caballete tienen a deformarse. Este sistema de apilado no es adecuado para maderas propensas a deformarse después del aserrado.

El apilado en caballete es poco estable ocupa mucho espacio y proporciona un secado no uniforme sobre la longitud de la tabla, la cual es menos seca en la base que en la parte superior cercana al sitio donde forma la X.

**Apilado por los extremos:** llamado también “apilado de pie”. Las tablas descansan recostadas sobre un apoyo alto en posición casi vertical y separada del suelo por una plataforma.

**Apilado en triángulo:** se utiliza sobre todo para secar tablonos. Tres piezas de madera se cruzan una sobre otra en posición horizontal de manera que conformen un triángulo. Este sistema ocupa mucho espacio e impide el secado completo en la zona de apoyo de las piezas, que hacen las veces de separadores.

#### Calidad del aire de secado natural

Si el aire ambiente es muy húmedo se pueden producir hongos y coloraciones inconvenientes en la madera, grietas superficiales en los extremos y deformaciones en general. Cuando el viento es demasiado fuerte produce en la superficie de la manera una cimentación o costra que desmejora su calidad.

La madera que se seca al aire solo lleva a estabilizarse con el contenido de humedad de equilibrio CHE del lugar.

#### Duración del secado natural.

No existen registros fiables para estimar el tiempo que toma la madera para secarse al aire libre. La duración del secado natural depende de las variaciones climáticas del lugar y del contenido de humedad inicial de la madera. En términos generales se encuentran variaciones bastante importantes en la duración del secado al aire: Con tiempo seco y cálido puede secarse madera de un contenido de humedad inicial del 50% más o menos en 1 mes; si las condiciones son desfavorables, el secado puede prolongarse de 6 meses a 1 año.

#### Mejora del secado natural

Además de la cubierta de protección que se colocan sobre las pilas horizontales, en los lugares con viento demasiado fuerte; este puede controlarse anteponiendo a las pilas de madera mamparas con persianas regulables. Cuando esos sistemas elementales de secado poseen ventiladores y elementos de calefacción de aire, reciben el nombre de presecadores y constituyen los más simples de los sistemas de secado artificial que se conocen.

#### Ventajas e inconvenientes del secado natural

Entre las ventajas del secado natural pueden mencionarse su bajo costo de implementación y consumo nulo o muy bajo de energía. A pesar de la lentitud del proceso y de las diferencias de temperatura entre el día y en la noche, el secado es uniforme, la madera presenta pocos defectos y posee casi ninguna variación en su coloración si se toman las precauciones adecuadas.

Las mayores inconvenientes del secado natural son: su dependencia de las variaciones climáticas del lugar, su lentitud, y el requerir una superficie importante en patios. Puesto que la madera es propensa al ataque de hongos e insectos, pueden ocasionarse grandes pérdidas si no se toman las debidas precauciones. En el mejor de los casos, el secado natural permite llevar la madera solo hasta el contenido de humedad de equilibrio.

#### Secado artificial

##### Cámaras para secado artificial de la madera

La cámara de secado es el recinto en el cual se coloca la madera que se va a secar. Dentro de la esta, deben controlarse ciertas condiciones del aire que circula a través de las pilas, con el fin de variarlas de acuerdo con un programa de secado adecuado a la madera.

### Características y componentes de una cámara de secado

Las condiciones de trabajo del secador pueden ser extremas: temperaturas de aire cercano a 100 ° C y humedad relativa del 100%; paredes de la cámara atacadas por los componentes químicos que libera la madera (ácido acético, ácido fórmico, taninos). La cámara debe entonces poseer ciertas características de construcción que le permitan resistir estas condiciones difíciles de trabajo. Además para lograr un control de los factores que condicionan el proceso, el secador debe contar con los siguientes elementos básicos: la cámara, el sistema de circulación del aire, el dispositivo de calentamiento y los medios de control de las condiciones de secado.

### Características y elementos básicos que debe poseer una cámara para secado de madera

#### Dimensiones

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

Para obtener un mayor aprovechamiento del volumen de la cámara, éste debe ser tan cercano como sea posible al volumen de la carga de madera que sea secada. Una forma de medir este aprovechamiento es por medio del valor de la relación llamada “Coeficiente de llenado”, el cual es igual al cociente entre el volumen de madera  $V_m$  y el volumen de la cámara  $V_c$ .

$$C. LL = \frac{V_m}{V_c}$$

**Ecuación 2. Coeficiente de llenado**

**Fuente: (Johnson, 1998)**

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

#### Materiales de construcción

Las cámaras de secado deben construirse con materiales capaces de soportar los choques que pueden ocurrir durante los procesos de carga y descarga de la madera, además de asegurar que se cumpla las otras

características requeridas para un correcto secado (aislamiento térmico, hermeticidad y resistencia a la corrosión).

Los materiales más utilizados son la mampostería de ladrillo o de bloques de cemento (para lo cual no debe utilizarse morteros de cemento con cal adicional), los perfiles y láminas metálicas, (que deben cubrirse con pinturas anticorrosivas para evitar que sean atacados por la corrosión), y la madera. El piso debe resistir el peso de las cargas y facilitar el drenaje del agua. Las juntas entre el techo y los muros deben impedir el paso del aire y el calor.

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

### **Aislamiento térmico**

El aislamiento de las cámaras de secado tiene por objeto evitar que el calor de secado se fugue hacia el ambiente exterior. Para efectos de aislamiento e impermeabilización, las cámaras deben considerarse como una edificación y resolver conforme a los principios de arquitectura y construcción.

Si la cámara está situada en el exterior, deben tenerse en cuenta los efectos de la intemperie y de los vientos dominantes; Estas condiciones son más benignas en la cámaras de secado situadas en el interior de un edificio.

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

### **Hermetismo**

Las fugas de aire deben evitarse para lograr una mayor eficiencia de la circulación del mismo dentro de la cámara a través de la madera. En las paredes,

el techo y los puntos de contactos entre ambos no deben existir sitios por donde el aire se escape al exterior. Las puertas de acceso, los postigos de ventilación controlada y los puntos de paso de las tuberías, cables y ductos de aire, deben llevar empaques adecuados que permitan el movimiento relativo de las partes cuando éste debe existir, pero impida el libre paso del aire hacia el exterior.

### **Ventilación controlada**

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

### **Circulación del aire**

El aire es el vehículo que transporta la humedad que sale del interior al exterior de la madera. Para que el aire efectúe su trabajo en forma adecuada, debe poseer una presión suficiente que lo haga circular dentro de la cámara a cierta velocidad y la permita vencer los obstáculos que encuentra en su recorrido. Este efecto se logra por medio del viento en el secado natural y de manera más efectiva por medio de ventiladores en el secado artificial.

Las características que más nos interesa determinar en un ventilador son su caudal y su presión estática. El caudal es el volumen del aire que el ventilador impulsa por unidad de tiempo y se mide en  $m^3$  o  $pie^3$ , por minuto, o segundo; el caudal implica que el aire circule a través de la madera con suficiente velocidad. La presión estática es la ejercida por el aire sobre las paredes de la cámara y es un indicativo de la fuerza que el aire debe aplicar sobre las superficies que se oponen a su libre circulación. La unidad más común para medir la presión estática de un ventilador es la "longitud de columna de agua"(metro de columna, o pulgadas de columna).

Existen dos tipos de ventiladores que pueden utilizarse en las cámaras de secado de madera: los centrífugos y axiales. Los centrífugos se componen de una carcasa metálica en forma de caracol, donde gira una rueda compuesta de palas o aspas. Los axiales tienen forma cilíndrica y están compuestos por una hélice formada de varias aspas curvas que giran alrededor de un eje. La hélice se encuentra en el interior de una carcasa.

Los ventiladores centrífugos proporcionan bajos caudales a presiones estáticas altas. Por el contrario, los ventiladores axiales suministran altos caudales a presiones estáticas bajas. El secado de madera en general necesita altos caudales y bajas presiones, por esta razón, y por que en principio es menos costosos, es más corriente que se utilicen los ventiladores axiales para impulsar el aire dentro de las cámaras de secado. Los ventiladores centrífugos se usan en general, donde por razones de ahorro de espacio, el diseño de las cámaras así lo requieran.

Los secadores se pueden ordenar de varias formas por su sistema de aporte de calor o por su eficiencia de secado como se va a explicar a continuación

### Clasificación de las cámaras de secado por su eficiencia de secado

La clasificación de las cámaras de secado puede hacerse en función de las posibilidades de lograr dentro de ellas un efectivo control de las condiciones de aire de secado. Convengamos en llamar presecadores a las cámaras simples de control de aire, de forma poco estricta o inexistente; mientras que los secadores, en cambio, son cámaras en las cuales las condiciones de aire pueden ser controladas completamente para garantizar el correcto seguimiento de un programa de secado.

#### Presecadores

Son cámaras simples y económicas, a menudo transportables, en las cuales es corriente encontrar fugas de aire y pérdidas de calor. En las más elementales, el aire no circula sino que atraviesa las pilas de madera y sale luego al exterior. En otro modelo de presecadores recirculan el aire y poseen ventilas que son accionadas periódicamente para evacuar el aire húmedo y reemplazarlo por aire del ambiente. A menudo, la recirculación del aire es dispareja y el control de temperatura y humedad relativa HR es apenas parcial. Para mayores producciones, los presecadores son un paso previo al secado propiamente dicho. Estos pueden entonces considerarse como aparatos que realizan un secado al aire libre aceleradamente, en los cual la temperatura del aire puede llegar hasta los 50°C. A continuación, se describen las variantes más corrientes de los presecadores.

#### Presecador con calefacción

Cualquiera de los sistemas descritos en el apartado anterior pueden hacerse más eficientes al implementar una fuente de calor que aumente la temperatura del aire propulsado por los ventiladores. El calor puede obtenerse por

diferentes medios, el más corriente debido a su simplicidad, aunque tal vez el más desfavorable en términos de costo y consumo energético, consiste en colocar resistencias eléctricas próximas a los ventiladores. El presecador con calefacción reduce el tiempo de secado pero genera también mayores costos, sobre todo si se tiene en cuenta que en esos aparatos el sistema de calefacción trabaja con bajos rendimientos debido a las pérdidas de calor.

Un caso particular de presecador con calefacción es el túnel de secado, en el cual el aire caliente penetra por uno de los extremos, y a medida que recorre el túnel en el sentido de la longitud pasando a través de pilas sucesivas de madera dispuesta en vagonetas sobre rieles, se va humedeciendo paulatinamente hasta abandonar el secador por el extremo opuesto, con una humedad relativa HR cercana a la saturación. Las vagonetas se desplazan en sentido opuesto al flujo de aire y presentan un grado de sequedad escalonado desde madera seca, a la salida, hasta madera húmeda a la entrada del túnel del tren de vagonetas.

#### Presecador con calefacción y recirculación de aire

Si a los presecadores con calefacción se les implementa un sistema de recirculación del aire dentro de la cámara, se obtiene un secador con el cual es posible lograr un mejor control de las condiciones de secado y por consiguiente someter a la madera a un programa de secado. En la medida en que este tipo de cámara permita una calidad aceptable de secado, prácticamente se convierte en un secador, aparato con el cual puede garantizarse el control completo de un programa de secado.

#### Secadores

Los secadores son cámaras en las cuales puede lograrse un control efectivo, un rendimiento considerable y una buena calidad de la madera seca. Un secador debe cumplir con los siguientes principios de diseño: la cámara debe ser hermética (que no permita fugas de aire) y aislada térmicamente; la circulación del aire debe ser pareja y regular; y debe poseer un control estricto de la humedad relativa HR y de la temperatura del aire.

En el secado convencional existen dos maneras de controlar las condiciones del aire. La primera, más simple, barata y común, consiste en evacuar el aire saturado o casi saturado y reemplazarlo por aire menos húmedo a temperatura ambiente. La principal desventaja de este procedimiento consiste en que el aire húmedo evacuado es caliente, o sea hay forzosamente una fuga de calor que debe ser recuperada en el proceso de calentamiento del aire de reemplazo que viene del ambiente. Cuando el aire ambiente es muy frío o muy húmedo se requiere mayor cantidad de energía para lograr las condiciones estipuladas por el programa de secado y disminuye en consecuencia el

rendimiento del proceso. La segunda forma de controlar el aire en el proceso de secado convencional consiste en condensar el vapor de agua contenido en el aire de secado para convertirlo en líquido, el cual se saca del secador. El aire así purgado de su humedad, recircula indefinidamente hasta el final del proceso de secado. Con base en este principio funcionan los secadores de madera llamados deshumidificadores, los cuales se describen en el apartado de secadores convencionales.

#### Secadores Convencionales

Los secadores convencionales operan a temperatura del orden de 40°C a 80°C al inicio del secado y del 70°C a 93°C al final del secado. La velocidad del aire va de 1.5 m/s por segundo a 2.5 m/s. El proceso de secado toma de 6 a 10 días para obtener madera entre el 18% y el 20% de CH.

La cámara de secado debe responder a las características ya estudiadas en características y componentes d una cámara de secado y, en particular, deben soportar las máximas temperaturas de operación cercanas a 100°C. Los ventiladores pueden colocarse en la parte superior de la cámara o en los costados laterales y, como se ha dicho, pueden ser axiales o centrífugos. La opción más común consiste en colocar ventiladores axiales en la parte superior y separados de las pilas de madera por medio de un cielo raso. Cuando la cámara tiene ancho un ancho mayor de 2.5 metros, es aconsejable utilizar ventiladores reversibles que inviertan el sentido del flujo del aire a través de la pila de madera.

Los secadores tradicionales poseen un sistema de humidificación del aire de secado para evitar que las temperaturas relativamente altas que pueden alcanzarse deterioren la madera al propiciar en ella una pérdida de humedad demasiado rápida. Los medios de humidificación empleados son el mismo vapor producido por la caldera, que se inyecta directamente a la cámara de secado, o la inyección de agua fría pulverizada por medio de un aspersor. En general, el sistema de humidificación del aire se encuentra después del sistema de calentamiento, en el sentido de flujo del aire.

Finalmente, la variación de la humedad relativa HR del aire dentro del secador se logra mediante el control de postigos o chimeneas de evacuación del aire que se sitúan en la zona de presión de los ventiladores. Las chimeneas de admisión de aire se colocan en la zona de succión de los ventiladores.

Las ventajas de los secadores convencionales consisten en el empleo de fuentes de energías baratas y fáciles de obtener, la posibilidad de acondicionamiento de la madera y el tiempo razonable que emplea el proceso de secado. Las desventajas de estos secadores son: el mantenimiento de la caldera y el tratamiento necesario del agua; cierta dificultad para controlar la humedad

relativa HR del aire, que depende de las condiciones del aire ambiente; la posibilidad de generar defectos en la madera debido a las altas temperaturas; y la necesidad de renovar el aire, proceso en el cual hay pérdidas de calor hasta de un 75% por concepto de calentamiento del aire ambiente de reemplazo.

#### Secadores continuos o túneles

Referente a los presecadores, un túnel de secado permite un proceso continuo en el cual periódicamente una vagoneta con madera sale del túnel y es reemplazada por una vagoneta con madera húmeda que entra por el costado opuesto al de salida de la cámara de secado. El aire circula en el sentido opuesto al desplazamiento de las vagonetas. Los secadores continuos son túneles de hasta 40 metros de longitud en los cuales se disponen, a lo largo, los elementos de calefacción y los ventiladores encima de un cielo raso; la evacuación y el reemplazo del aire se efectúan por medio de chimeneas. En túneles de menor longitud es frecuente encontrar un solo ventilador en el extremo por cual entra el aire. Debido a sus condiciones de trabajo, en las cuales entra el aire atraviesa y no recircula, es difícil lograr un control homogéneo de la temperatura y la humedad relativa HR sobre toda la longitud del túnel. En efecto, sólo las condiciones del aire a la entrada son controlables con exactitud. Para lograr un mejor control de las condiciones del aire en los túneles largos, se han ideado comportamientos sucesivos separados la longitud total por medio de cortinas metálicas. Asimismo, para remediar en parte las limitaciones del sistema, se agregan secciones iniciales que precalientan la madera por medio del aire húmedo y caliente que evacúen las chimeneas del túnel y, al final, una sección de acondicionamiento con sus condiciones independientes de circulación del aire y temperatura. Los túneles de secado continuo son una solución adecuada cuando se dispone de gran cantidad de madera de las misma especie y con las mismas características, puesto que se trata de un sistema de secado con limitaciones de control que nos e adapta a una producción compuesta por maderas de diferente tipo.

#### Deshumidificadores

Los deshumidificadores son secadores de madera que trabajan con base en una máquina refrigeradora que es la parte fundamental de la unidad de secado. Básicamente, se compone de cuatro elementos, entre los cuales circula un gas refrigerante como el freón 12 o freón 22. Los cuatro componentes son: el compresor (que es la fuente de potencia del sistema), el condensador (o batería caliente), la válvula reductora de presión y el evaporador (o batería fría). El circuito se inicia en el compresor, que aumenta la presión del gas este pasa luego al condensador, donde se convierte en líquido a presión y libera calor; luego el líquido a presión se dirige a la válvula reductora de presión, allí disminuye su presión y se convierte en líquido a baja presión; seguidamente pasa al evaporador, allí se evapora tomando calor del medio ambiente; y, por último, el

circuito se cierra con el regreso del gas a baja presión al compresor desde donde inicia un nuevo ciclo.

En un deshumidificador, el circuito de aire de secado húmedo llega por la parte inferior y entra en contacto con el evaporador frío. El aire de secado pierde en esta operación el agua que contiene. Luego, el aire seco entra en contacto con el condensador y se calienta. Antes de regresar a la cámara de secado por la parte superior de la máquina el aire puede calentarse más utilizando resistencia eléctricas que se sitúan después del ventilador que succiona el aire a través de la unidad.

En resumen, el aire servido de la cámara pasa por la máquina donde se purga el agua, la cual se recoge en un recipiente y se lleva al exterior por medio de una manguera. El aire se calienta luego y regresa a la cámara para realizar un nuevo ciclo a través de la madera. El deshumidificador recicla entonces el mismo aire de secado y no precisa de ventilas para intercambio de aire con el exterior; no obstante, algunos de estos secadores tienen forma de intercambiar aire con el exterior, lo cual funciona de forma similar a un secador convencional.

A parte de la singularidad que representa el no intercambio de aire con el exterior, la construcción de la cámara de un deshumidificador debe poseer las características y los componentes que se presentaron en la sección “características y componentes de una cámara de secado”. La ventilación suele realizarse por medio de ventiladores axiales situado en la parte superior de la cámara de secado; algunos modelos de deshumidificadores funcionan con un ventilador único, se trata del ventilador principal de la máquina la que cumple además la función de propulsar el aire de secado a través de la madera. Es corriente que la unidad se encuentra al interior de la cámara de secado, con la desventaja de que está entonces en contacto directo con el aire de secado cargado de sustancias químicas. En modelos más elaborados, la unidad de secado está separada de la cámara por medio de una pared y la circulación del aire se realiza por medio de ductos que conectan la cámara con la entrada y la salida del aire al sistema.

Los deshumidificadores funcionan a temperaturas relativamente bajas. Se comienza con un período de precalentamiento con hasta unos 25°C durante 3 o 4 horas; seguidamente, el secado de la madera verde que contiene entre un 25% o 30% de contenido de humedad CH se realiza a temperaturas entre 25°C y 50°C. Puesto que la temperatura y la humedad relativa HR del aire son controlables, en los deshumidificadores se cuantifica la eficiencia en términos de una capacidad precisa de evacuación del agua de la madera, es decir, de una velocidad o rata de secado propia del aparato, que suele ser entre el 2% y el 3% de reducción diaria del contenido de humedad CH de la madera. En estas condiciones, un lote de madera verde al 60% de contenido de humedad CH tomará entre 15 y 22 días para secar hasta un contenido de humedad CH de 15%.

Respecto a la potencia del compresor, se pueden hacer las siguientes aproximaciones: para un promedio de 45 litros de agua evacuados diariamente, se requiere un compresor de 1 HP (HP = caballo de potencia); para secar un volumen de 2.4 m<sup>3</sup> de madera, se precisa un compresor de 0.6 HP si el secado es lento y las piezas de madera tiene un espesor menor de 5 centímetros; si la madera es más gruesa se requiere alrededor de 1 HP, si el secado es rápido se necesita una potencia de compresor de 2 HP para secar las 2.4 mts<sup>3</sup> de madera delgada. En algunos deshumidificadores se lleva a cabo un acondicionamiento final del orden de 24 horas a 70°C, para el cual se requiere una pequeña caldera que suministre vapor. En otros aparatos se efectúa un acondicionamiento menos fuerte, por medio de aspersores que pulverizan agua a temperatura ambiente.

Si no es necesario utilizar a menudo las resistencias eléctricas adicionales, el deshumidificador consume sólo la energía eléctrica que requieren el compresor y los ventiladores, de ahí que su consumo sea razonable en términos de energía eléctrica, lo cual lo convierte en una solución de secado interesante y práctica.

#### Clasificación de las cámaras de secado por su aporte de calor

El secado artificial de la madera requiere el aporte de energía en forma de calor. Este debe ser suministrado de forma suficiente para elevar la temperatura del aire dentro de la cámara, romper los enlaces químicos entre las moléculas de agua y de madera, y luego evaporar el agua; además de compensar las pérdidas de calor por las paredes, piso, techos, por las chimeneas y otros dispositivos de la cámara que estén en contacto con el exterior. La forma corriente de aportar el calor necesario consiste en calentar directamente el aire de secado, o calentarlo de manera indirecta poniéndolo en contacto con superficies calientes llamadas "intercambiadores de calor". Como se verá enseguida, estas dos formas de calentar el aire dependen de la fuente de producción de calor que se utiliza para realizar el secado.

#### ACPM y otros combustibles líquidos derivados del petróleo

Existen dos maneras de utilizar estos combustibles para calentar el aire de secado. La más simple consiste en producir la combustión por medio de un quemador que calienta superficies metálicas de intercambio, las cuales a su vez calientan el aire de secado cuando éste entra en contacto con ellas. Se trata de un método indirecto de calentamiento, puesto que los gases de combustión de estos combustibles son tóxicos y no pueden ser dirigidos directamente a la madera para realizar el secado. Este sistema es de bajo rendimiento térmico y presenta riesgos de incendio.

La otra forma de utilizar estos combustibles consiste en alimentar calderas. Las calderas trabajan por medio de una combustión a presión mayor que la de la atmósfera, que permite un mejor rendimiento térmico de la combustión. Los gases de combustión entran en contacto con una serie de tuberías de intercambio por la que circula un fluido (en general, agua o aceite) a presión más o menos alta según el tipo de calderas; Estas tuberías llegan hasta lugares estratégicos de la cámara de secado, donde por medio de superficies de intercambio calientan el aire de secado, y el fluido frío regresa a la caldera donde reinicia el ciclo de calentamiento.

Los intercambiadores se componen de tubos y aletas fabricadas en metales resistentes a la corrosión. Su forma está determinada por el tipo de fluido que circula en su interior, y las superficies calientes que realizan el intercambio de calor se reparten de manera adecuada en relación con las corrientes de aire que circulan dentro de la cámara.

Las calderas son aparatos costosos y complejos compuestos por una serie de equipos como motobombas eléctricas de circulación, válvulas de seguridad, trampas de vapor, tanque de almacenamiento del fluido de circulación y de combustible, de controles eléctricos, etc. A pesar de su costo y de la necesidad de mano de obra calificada para operar y dar mantenimiento al sistema, los secadores de madera con base en calderas son bastante comunes debido a su rendimiento y a la seguridad de funcionamiento, los cuales son relativamente buenos. Sin embargo los humos que resultan de la combustión son una fuente de polución.

### Gas

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

### Carbón y leña

Estas calderas requieren gran cuidado en su fabricación y mantenimiento, por esto, su utilización es limitada. La aplicación común del carbón y la leña como fuentes energéticas se hace por medio de estufas más o menos simples que permiten una combustión directa del combustible y poseen un sistema de intercambio para calentar aire limpio de secado. Aunque estas estufas son

sistemas de menor rendimiento térmico, debido a la combustión directa y al sistema de intercambio, son aparatos simples y fáciles de implementar; Al ser el carbón un combustible corriente y barato, y la leña o el retal de madera un sobrante común y a menudo incómodo para los procesadores de madera, es razonable utilizarlos como fuentes energéticas para el secado. La combustión directa acarrea riesgos de incendio que deben considerarse al posicionar estas estufas en la planta de producción. La combustión del carbón y de la leña produce gases que constituyen una fuente de polución.

### Energía eléctrica

La manera más eficiente de utilizar la energía eléctrica para calentar el aire de secado consiste en energizar un aparato llamado “bomba de calor”, que es en esencia un circuito frigorífico similar al de las neveras corrientes, las cámaras de secado de madera basadas en este principio se conocen con el nombre de “deshumidificadores”.

La energía eléctrica puede, también en forma más simple e inmediata, calentar el aire de secado al ponerlo en contacto con una serie de resistencias eléctricas. Esta es una solución cómoda y fácil de instalar si se dispone de un buen suministro de electricidad, pero es costosa, tanto en la instalación que requiere un transformador de gran potencia, como en la operación que genera un gran consumo de energía.

### Energía solar

Por medio de colectores solares es posible calentar aire, que se conduce directamente a la cámara de secado. Un colector solar de aire es un aparato diseñado para atrapar el calor del sol y utilizarlo en el calentamiento del aire. Su principio básico consiste en lograr el calentamiento de una superficie buena conductora de calor, que a su vez transfiere ese calor al aire. Existen varios diseños de colectores solares de aire que varían en costo y en la efectividad para lograr el calentamiento del aire. Un colector de aire simple puede lograrse adaptando el techo de una edificación, mientras que; uno de mayor eficiencia consta por ejemplo de una buena superficie de intercambio de calor colocado en una caja aislada térmicamente del exterior, cuya superficie superior es un vidrio. El colector solar puede ser parte integral de la cámara de secado o estar construido aparte y unido a la cámara por medio de túneles o ductos que conducen el aire. Existen pues, también, varios modelos de cámara de secado solares, dependiendo de la colocación de los componentes y de la forma como circula el aire de secado. En secadores solares se estudian los modelos más conocidos de cámara solares para el secado de la madera.

### Sistemas mixtos

Es posible combinar varias fuentes de calor para obtener un sistema mixto de aporte de calor. Por ejemplo, la energía solar puede calentar el aire en el día, y una estufa de carbón o de leña, una caldera, un quemador o un sistema eléctrico, puede suplir el calor necesario durante la noche. A pesar de que los sistemas mixtos introducen complejidad en el diseño y generan aumento en los costos de construcción del secador solar, son soluciones adecuadas para adaptarse a las facilidades energéticas de un lugar, o de un método determinado. Esta concepción de un secador mixto se adapta también a los cambios progresivos de una producción creciente de madera seca que debe ir aumentando de manera escalonada su capacidad de secado.

### Secadores de vacío

El secado al vacío logra mayor rapidez en la evacuación del agua de la madera, así como su ebullición a temperaturas relativamente bajas. Se realiza en cámaras cilíndricas de acero, con tapas esféricas, que resisten a la presión atmosférica cuando se hace el vacío al interior; disponen de un medio de aporte de calor (resistencias o intercambiadores), de un dispositivo para eliminar el agua y de los controles para regular el proceso de secado.

Existen secadores de vacío hasta de unos 20m<sup>3</sup> de capacidad, a los cuales se introduce la madera por medio de rieles que soportan vagonetas. Este sistema sofisticado puede reducir el tiempo de secado en una quinta parte, respecto al tiempo empleado en los secadores convencionales.

### Otros métodos de secado

El secado por medio de micro-ondas se lleva a cabo en aparatos que funcionan en forma similar a los hornos micro-ondas que se utilizan en las cocinas, con base en ondas electromagnéticas de alta frecuencia.

El secado se comporta de manera similar al secado clásico con aire caliente y húmedo, pero el tiempo de secado se reduce de manera significativa.

El secado químico presenta sobre todo un interés técnico de poca utilidad práctica. Se basa en la utilización de productos hidrófilos (que absorben el agua) como ciertas soluciones de cloruro de sodio; que entra en contacto con la madera, aceleran la salida de agua.

El secado a alta presión consiste en lograr la evacuación del agua prensando la madera. Es un procedimiento poco práctico que tiene, como el secado químico, un interés ante todo técnico.

El secado a alta frecuencia se efectúa colocando un cuerpo resistente al paso de la corriente (como la madera) entre dos electrodos conectados a un generador de alta frecuencia. El cuerpo se constituye en un condensador dieléctrico que se calienta desde el centro hacia afuera por efecto de una fuerte agitación molecular. Estos secadores se utilizan para secado de hormas de madera, cachas de armas y otras piezas especiales.

El secado por radiación infrarroja y por radiación electromagnética consiste en el calentamiento de maderas sometida al efecto de estas radiaciones, las cuales no son visibles. Son procedimientos poco desarrollados que pueden reducir a algunas horas el proceso de secado.

Finalmente, el secado por efecto Joule consiste en hacer pasar una corriente eléctrica a través de la madera húmeda, entre dos electrodos llamados ánodo y cátodo. El resultado es variables según la humedad en la madera y la proximidad al ánodo y electrodo positivo. Es un método experimental de reducida utilización.

### Secadoras solares

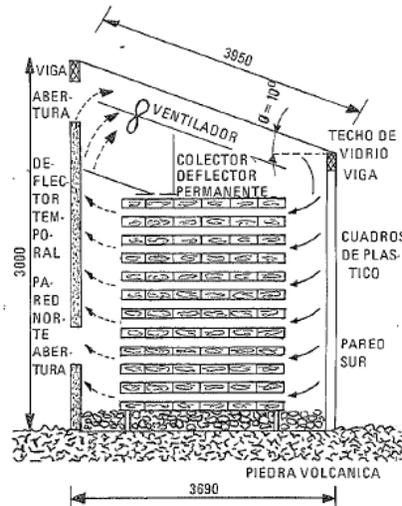
Desde 1960. se viene investigando sobre la energía solar para secar madera. Se han llevado a cabo investigaciones en Puerto Rico, Filipinas, Austria, India, Japón, África del Sur, Madagascar, Uganda, Estados Unidos, Brasil, etc.

Las secadoras solares son de una construcción muy sencilla. En la mayoría de los casos, su estructura puede ser construida de madera. Los rayos solares inciden en un colector plano que convierte la energía de radiación en energía térmica. Un flujo de aire proveniente de abanicos internos se encarga de transportar el calor hasta la madera, el agua existente en la misma pasa al aire, saturando después de cierto tiempo el ambiente de humedad. De acuerdo con el programa de secado, el aire saturado es renovado por medio de unas compuertas que se accionan manualmente.

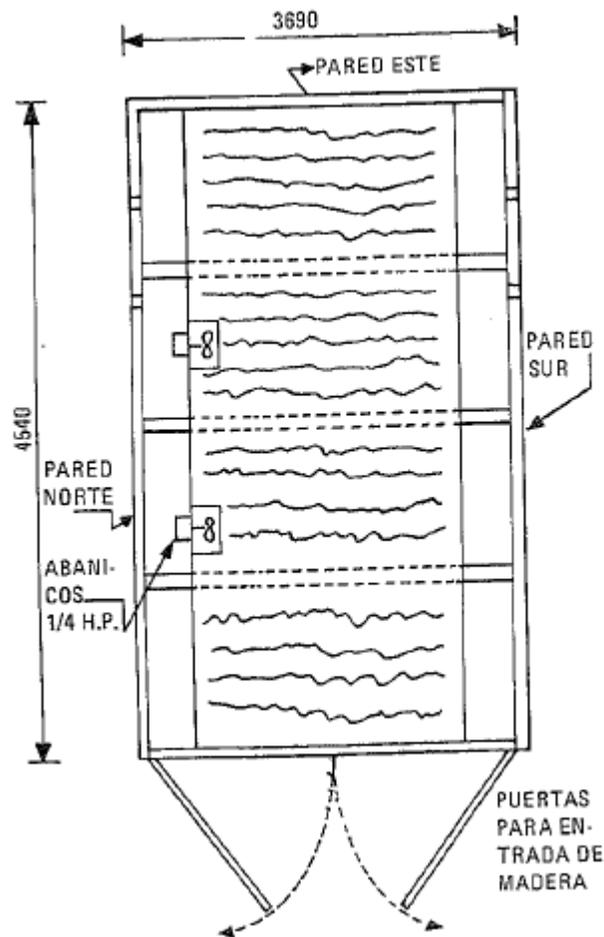
Existen varios diseños de secadoras, basadas en el mismo principio. Uno de los diseños que más rendimiento y mayor facilidad de construcción tiene es el que se ha adoptado en Costa Rica.

Según las pruebas realizadas en otras partes del mundo, la secadora solar de maderas puede aumentar de 4 a 5 veces la velocidad de secado con respecto al secado al aire. Esta secadora es ideal para pequeñas industrias y puede ser

utilizada en casi toda Centroamérica, ya que la radiación solar en sus límites inferiores alcanza valores que pueden perfectamente ser aprovechados para secar madera.



Fuente: (Eduardo Sibaja Arias, 1985)  
Figura 5. Vista lateral de secador solar para maderas



Fuente: (Eduardo Sibaja Arias, 1985)

Figura 6. Vista superior de secador solar para madera

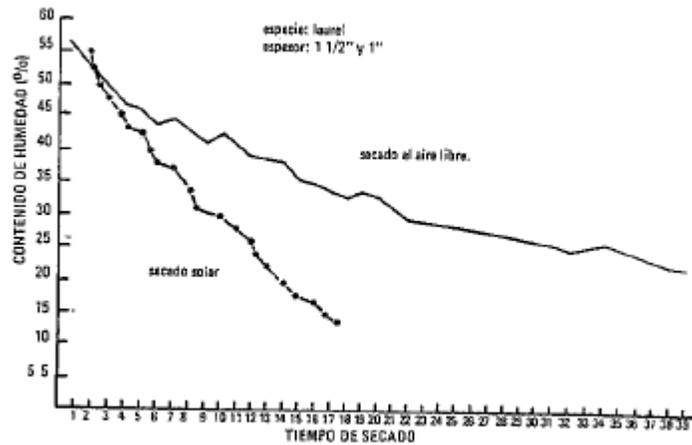
### Funcionamiento

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

- Captación eficiente de energía solar, ya que esta es la única fuente de energía necesaria para estimular el secado.
- Orientación de la cámara. Es necesario diseñarla para que el ángulo de incidencia de los rayos sea el menor posible; así se evita la reflexión de los mismos y, por consiguiente, aumenta el índice de refracción. Conforme los rayos solares tiendan a incidir más normalmente en el secador, mayor será el número de rayos que pase a la superficie transparente y que llegue al colector. Es por esto que el colector y las caras transparentes deben estar orientadas hacia el sur, pues nuestro país se encuentra en el hemisferio

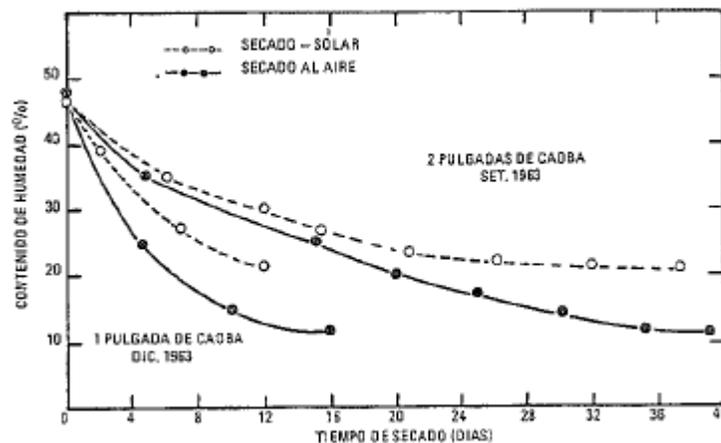
norte.

- La inclinación del colector debe escogerse de tal forma que el ángulo de incidencia no varíe más de  $47^\circ$  en las diferentes épocas del año. En los diferentes diseños, se ha estudiado cuál es la inclinación óptima, sin embargo, han habido diferentes opiniones al respecto. Los cálculos indican que la inclinación mejor para esta zona de Costa Rica es la misma que la latitud ( $\sim 10^\circ\text{N}$ ).



Fuente: (Eduardo Sibaja Arias, 1985)

Figura 7. Gráfico de comparación de secado solar contra secado al aire libre



Fuente: (Eduardo Sibaja Arias, 1985)

Figura 8. Comparación de curvas de secado solar y secado al aire de la especie Caoba hondureña, usando espesores de una pulgada y dos pulgadas

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede afirmar que las secadoras solares pueden ser usadas en la mayor parte de Centroamérica con buenos resultados.

En relación con los estudios realizados se puede afirmar que el costo de secado en secadora solar puede resultar, en la mayoría de los casos, más barato que secar al aire libre. Además, este es mucho más rápido y llega a contenidos de humedad menores que el secado al aire libre.

Al usar energía solar se tiene un recurso fijo y que no variará en suministro ni en precio en función del tiempo.

Este modelo o modelos similares podrían ser usados por pequeñas y medianas industrias como secadoras propias de producción, ya sea en forma única o como batería de secadoras. En las grandes industrias puede funcionar como presecadora.

Existen tres tipos básicos de secadores solares para madera. Los dos primeros son aparatos simples y limitados que deben clasificarse más bien como presecadores; mientras que el tercer tipo, más complejo, es el único que puede clasificarse como un secador propiamente dicho, según la clasificación establecida en el apartado. “La clasificación de las cámaras de secado”. Los secadores solares son una solución interesante para producción de madera hasta de unos 20 m<sup>3</sup> por mes. El primer tipo de secador solar, el más simple de todos, tiene el colector solar integrado a la cámara de secado y un circuito único de ventilación que propulsa el aire a través de la madera. Cuando las condiciones de humedad o temperatura del aire son inaceptables, éste se cambia por aire ambiente accionando un sistema de ventilas. Con respecto al secado al aire-libre, este secador ha reducido el tiempo de secado a la mitad en verano (quince días en lugar de un mes) y a una tercera parte en invierno (un mes en lugar de tres).

El segundo tipo de secador consiste en una cámara separada del colector solar (el cual puede implementarse, por ejemplo, adaptando un techo cercano). Un sistema único de ventilación lleva el aire caliente del colector a la cámara y lo propulsa a través de la cámara una sola vez (túnel) o lo recircula regresándolo al colector para calentarlo de nuevo, (en este último caso, es necesario purgar la humedad del aire seco). Estos presecadores llegan a rendimientos del 20% al 30% mejor que; los de los secadores simples es posible acoplar el colector solar con otra fuente energética diferente para poder obtener un secador mixto.

El tercer tipo de secador solar permite un control completo de las condiciones de secado y puede también convertirse en un secador mixto, al acoplarle otra fuente energética adicional. Este secador posee tres circuitos independientes de circulación del aire; el circuito interno que circula el aire en la cámara a través de la madera, el circuito solar que desplaza el aire a través del

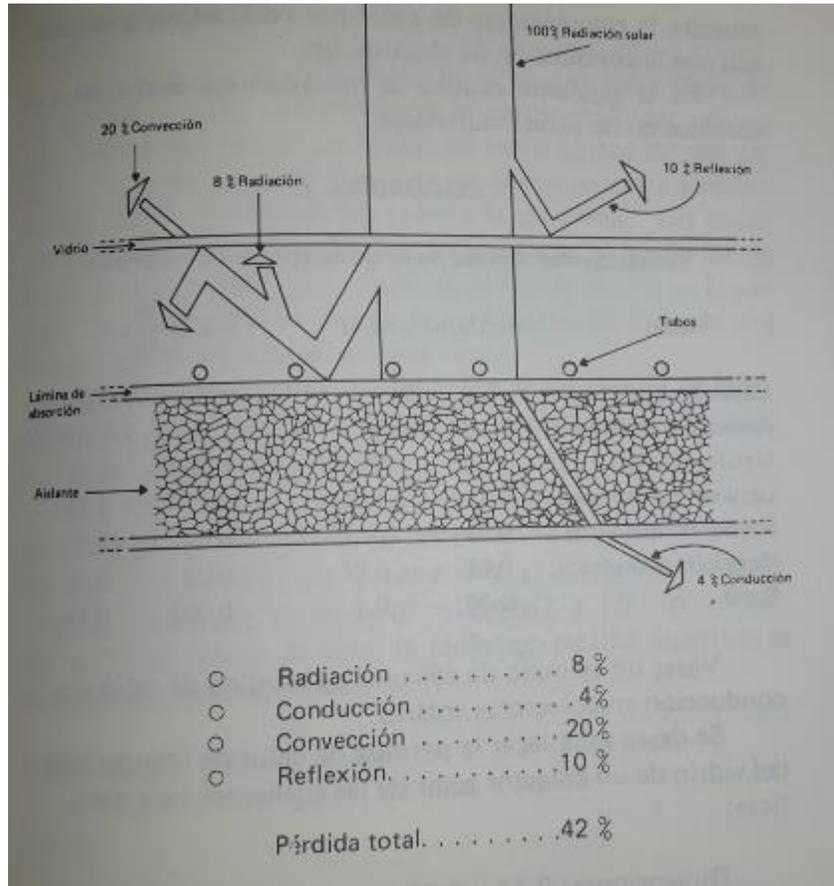
colector solar, y el circuito de intercambio de aire con el exterior, que permite extraer de la cámara el aire cargado de humedad y reemplazarlo por aire ambiente. Por medio de un proceso automático, un control que regula las condiciones del secado arranca o detiene los circuitos de ventilación. Este tipo de secador acoplado a una fuente de calor permite continuar el secado durante la noche, lo cual es tan efectivo como los deshumidificadores y los secadores convencionales.

#### Colector Solar

En un secador solar el aprovechamiento de la irradiación solar se convierte en su motor y utiliza los principios de transferencia de energía. La determinación del régimen de transferencia del calor a una específica diferencia de temperatura, es la clave para determinar el tamaño del colector necesario para proveer una determinada temperatura, el calor se transfiere de tres modos diferentes:

- Conducción: o transferencia de calor debida a la vibración y rotación molecular
- Radiación: o transferencia de calor por fotones o cuantos de energía
- Convección: o transferencia de calor debido al movimiento de fluidos. Este modo es, además, una forma de conducción

Las pérdidas de calor en un colector solar del tipo de placa plana, están representadas en la figura 9. Como se ve, la mayoría de las pérdidas son por causa de convección. Por supuesto, el porcentaje de incidencia de cada uno de los factores (radiación, conducción y convección) depende de la temperatura del colector, los materiales que se utilizan y las características ambientales.



Fuente: (Eduardo Sibaja Arias, 1985)

Figura 9. Pérdida de calor en un colector de placa plana

### Conducción

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

$$Q_{cond} = \frac{KxA}{X} (T_1 - T_2)$$

Ecuación 3. Fórmula de transferencia de calor por conducción  
Fuente: (Eduardo Sibaja Arias, 1985)

Donde:

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

La conducción de calor es muy parecida a la conducción eléctrica, pues en ambas se requiere una diferencia de temperatura (en electricidad, la diferencia es de voltaje) y una vía material de transmisión. Las propiedades de los conductores de electricidad y del calor son similares (los metales conducen muy bien, mientras que los plásticos ofrecen gran resistencia). Las vías cortas y anchas conducen mejor que las vías largas y angostas. La razón del flujo depende de la diferencia en la temperatura entre los dos puntos

### Radiación térmica

La radiación es un proceso en el cual el calor fluye de un cuerpo a otro. Esta la emite cualquier cuerpo que tiene calor, como las ondas de radios parten de una antena. El flujo de calor depende de la temperatura ambiente del objeto, sin tomar en cuenta la distancia. Un colector solar está normalmente más caliente que el medio que lo rodea y va a irradiar calor hacia afuera de la lámina de absorción. En sistemas solares debe tomarse en cuenta la irradiación, pero no se puede controlar en forma tan sencilla como la convección y la conducción.

La radiación o intensidad de calor que emite una superficie está en función de la temperatura a la cuarta potencia por la emisividad de la superficie y por la constante de Stefan Boltzman ( $5,667 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ ). La radiación de una superficie se obtiene de la siguiente manera:

$$E = \epsilon \cdot \sigma \cdot T_e^4$$

**Ecuación 4. Fórmula general de la radiación térmica**  
Fuente: (Eduardo Sibaja Arias, 1985)

Donde:

- $\epsilon$  = emisividad de la superficie
- $\sigma$  = constante de Estfan Boltzman
- $A$  = área efectiva
- $T$  = temperatura absoluta

Con respecto al caso especial del colector solar, hay dos casos especiales cuyos cálculos se realizan en forma más simplificada.

El primer caso especial es cuando se quiere establecer la radiación térmica entre 2 superficies planas paralelas a infinito. En este caso, la fórmula aplicable es la siguiente:

$$Q = Ax \frac{\sigma x (T_2^4 - T_1^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + (\frac{1}{\epsilon_2} - 1)}$$

**Ecuación 5. Radiación térmica entre dos superficies planas**  
Fuente: (Cengel, Tercera Edición)

Donde:

- $\epsilon$  = emisividad de la superficie
- $\sigma$  = constante de Estfan Boltzman
- $A$  = área efectiva

El segundo caso especial es cuando una superficie pequeña (colector solar) está rodeada por una superficie grande (como el cielo). En este caso, la fórmula es la siguiente:

$$Q = Ax\epsilon\sigma(T_{\text{cielo}}^4 - T_{\text{colector}}^4)$$

**Ecuación 6. Transferencia de calor de una superficie pequeña a una superficie infinita**  
Fuente: (Cengel, Tercera Edición)

Donde:

- $\epsilon$  = emisividad de la superficie
- $\sigma$  = constante de Stefan Boltzman
- A = área efectiva
- $\Delta T$  = diferencia de temperatura entre el cielo y el colector

### Convección

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

$$Q = AxHx(T_1 - T_2)$$

**Ecuación 7. Fórmula general de convección**  
Fuente: (Cengel, Tercera Edición)

Donde:

- H = coeficiente de transferencia de calor W/m<sup>2</sup>°C
- A = área de sección transversal (m<sup>2</sup>)
- $\Delta T$  = diferencia de temperatura entre los puntos

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

La convección natural que existe entre dos placas es de gran importancia en el estudio de colectores de energía solar de placa plana. Para hacer un estudio de este régimen de transferencia de calor, hay que establecer correlaciones entre varios parámetros adimensionales, con el propósito de determinar el valor de  $h$  lo que nos permitiría conocer la transferencia de calor por convección. Dos de esas relaciones son los números de Nusselt (NU) y Rayleigh (Ra).

$$Ra = \frac{g \beta \Delta T L^3}{\nu^2} \times Pr$$

**Ecuación 8. Fórmula general del Número de Rayleigh**  
**Fuente: (Cengel, Tercera Edición)**

Donde:

- $g$  = gravedad ( $m/s^2$ )
- $\beta$  = Coeficiente de expansión volumétrica ( $1/K$ )
- $L$  = longitud ( $m$ )
- $\Delta T$  = Cambio de Temperatura
- $Pr$  = Número de Prandtl
- $\nu$  = viscosidad cinemática ( $m^2/s$ )

$$Nu = 1 + \left[ 1,44x \left( 1 - \frac{1708}{Ra \cos \theta} \right) \right] + \left[ 1 - \left( \frac{1708x(\sin(1.8x\theta)^{16})}{Ra \cos \theta} \right) \right] + \left[ \left( \frac{Ra \cos \theta}{5830} \right) - 1 \right]$$

**Ecuación 9. Fórmula general del Nusselt**  
**Fuente: (Cengel, Tercera Edición)**

Donde:

- Ra: número de Rayleigh
- $\theta$ : ángulo de inclinación respecto al sol

### Secado en cámara mediante aire caliente climatizado

En este método el aire, que ha sido convenientemente climatizado y que se encuentra a la presión atmosférica, actúa como agente secante al forzar su paso por las pilas de madera. El secado se realiza en el interior de cámaras especiales denominadas cámaras de secado.

El aire climatizado se obtiene impulsando el aire en el interior de las cámaras mediante ventiladores que fuerzan su paso a través de las baterías de calefacción y utilizando los sistemas de humidificación y/o deshumidificación.

Los posibles métodos para secar la madera en cámara mediante aire caliente climatizado son:

- secado tradicional a temperatura media ( $\leq 80^{\circ}\text{C}$ ).
- secado a alta temperatura ( $>100^{\circ}\text{C}$ ) y
- secado con bomba de calor.

Los secadores que se utilizan constan, de forma general, de los siguientes elementos y dispositivos:

- cámara de secado.
- sistema de circulación del aire y
- dispositivos de climatización del aire interior.

Las características constructivas de las cámaras y el diseño del sistema de circulación del aire interior son comunes para todos los métodos y se detallan en el siguiente apartado. Algunos métodos de secado presentan características especiales en los sistemas de circulación del aire y en los dispositivos de climatización del aire interior que se recogen de forma particular en los correspondientes métodos de secado. En estos secadores el aire, convenientemente climatizado, actúa como agente secante, relacionado con la presión atmosférica.

#### Características constructivas de las cámaras

Las cámaras de secado son, en casi la totalidad de los casos, células prefabricadas autoportantes, vendidas directamente por el fabricante.

Dichas células deben incorporar un aislante térmico, adecuado a las condiciones de trabajo, para disminuir las pérdidas térmicas desde su interior, deben ser estancas al vapor de agua, para permitir trabajar en condiciones de fuerte higrometría y, finalmente, deben ser resistentes a la corrosión por los ácidos de la madera que se liberan en el curso del secado.

El industrial interesado en la adquisición de una cámara de secado ha de fijarse en los siguientes detalles:

#### A) Estabilidad constructiva, estanqueidad y resistencia a la corrosión.

La construcción debe ser sólida, es decir, deben evaluarse tanto las características constructivas de los paneles de cierre (material, espesor de las chapas) como de la estructura de sujeción.

Los paneles laterales suelen tener la altura del secadero y una anchura de 90 a 120 cm. Las caras laterales de estos paneles suelen estar fabricadas o de chapa galvanizada o de chapa de aluminio. En el primer caso suelen incorporar pinturas al fuego y en el segundo lacas transparentes. Estas chapas suelen incorporar en su interior sistemas de anclaje del aislante.

En el caso de los secaderos que trabajan a temperaturas bajas y medias ( $\leq 80^{\circ}\text{C}$ ), estos paneles suelen ser del tipo sándwich, los cuales incorporan en el alma espuma de poliuretano o de poliestireno de alta densidad que actúa como aislante térmico. La unión entre paneles se suele efectuar mediante el sistema de ranura y lengüeta de material aislante, para evitar la presencia de puentes térmicos y la aparición de puntos de rocío. Los paneles se fijan a la estructura metálica, que quedará visible al exterior. Las uniones entre paneles serán tratadas interiormente con masillas para evitar las fugas de vapor de agua.

Cuando se trabaja con temperaturas elevadas ( $>100^{\circ}\text{C}$ ), el aislante debe ser lana de vidrio o lana de roca, pero preferiblemente la segunda cuando se trabaja entre  $120\text{-}130^{\circ}\text{C}$ . Ambos materiales tienen tendencia a deslizarse y acumularse en la parte inferior. Para evitar este problema, que comprometería gravemente el aislamiento térmico de la cámara, se aconseja colocar nervios transversales, cada 80 cm a 1 m, a los que se fijará el aislante. Estos nervios suelen a su vez fijarse a la estructura metálica y todo el conjunto se reveste exteriormente. Todas las juntas interiores deberán ser tratadas con siliconas o masillas de caucho resistentes a la temperatura máxima de trabajo.

El espesor medio del material aislante puede oscilar entre 60 y 120 mm según zonas y tipos de secaderos.

Cuando el secadero vaya a ser colocado en el exterior, deberá asegurarse que en el cálculo de su estructura y de los paneles laterales se han tenido en cuenta las posibles sobrecargas (nieve, viento, etc.), que puedan afectarle.

El suelo debe ser de hormigón, estable y resistente a las cargas, tanto fijas como de paso de los elementos mecánicos de carga y descarga. Deberán

preverse juntas de dilatación para evitar que las dilataciones térmicas produzcan su agrietamiento y levantamiento. Será aconsejable incorporar un aislante de 50 a 60 cm de espesor para evitar las fugas térmicas.

Todos los materiales expuestos (paredes interiores, estructura de apoyo, poleas y mecanismos, tornillos, etc.) deberán incorporar el tratamiento o ser de un material adecuado a las condiciones altamente corrosivas que para los metales suelen reinar dentro de los secaderos, especialmente los que trabajan a alta temperatura. A este respecto el aluminio es un material ideal por su resistencia a la corrosión y ligereza.

## B) Tamaño de la cámara

El tamaño óptimo de la cámara depende de los siguientes factores:

### -La calidad de secado requerida

La calidad del secado depende de la factibilidad de obtención de condiciones higrotérmicas homogéneas a lo largo de todo el frente de aire que atraviesa la madera, lo que se traduce en gradientes de humedad reducidos en el seno de las pilas. A este respecto, las cámaras pequeñas ( $50\text{m}^3$ ), donde el volumen de aire que es necesario mover y la longitud del frente de madera son reducidos, presentan una mayor homogeneidad que los grandes secaderos.

### -La velocidad del proceso.

La velocidad del secado depende en cierta medida del tamaño de la cámara. Los secaderos grandes presentan una mayor inercia, por lo que tardan más tiempo en alcanzar las condiciones iniciales del secado, lo cual aumenta el tiempo tal requerido para el proceso.

Por otra parte, dada la peor homogeneidad del contenido de humedad que se consigue en ellos, será necesario un secado más largo para alcanzar una buena homogeneidad, indispensable para la buena calidad.

### -El coste de la operación.

La amortización del equipo y el coste de la energía empleada son dos factores fundamentales a la hora de la determinación del coste de la operación. Normalmente, el coste por m<sup>3</sup> de capacidad útil decrece con el tamaño del secadero. De ahí que si el secadero se emplea a plena capacidad y el tiempo total de la operación no difiere significativamente del necesario en un secadero pequeño, la tasa de amortización por m<sup>3</sup> de madera seca es menor en los secaderos grandes que en los pequeños.

Con respecto al coste energético, el coste de la energía eléctrica necesaria para el movimiento del aire interior es un aspecto de gran trascendencia. En los secaderos grandes, el coste de esta energía por m<sup>3</sup> de madera es menor, por lo que si el secadero se emplea a plena capacidad el coste total de este apartado será menor en los secaderos grandes que en los pequeños. Esto será tanto más cierto cuanto más largo sea el secado de la madera (frondosas poco permeable).

Como resumen de todo lo anterior debe afirmarse que siempre que el secadero vaya a ser empleado a plena capacidad, un secadero grande resulta más económico que varios pequeños.

### -La flexibilidad de empleo.

La flexibilidad de empleo depende en gran medida de la capacidad y la forma geométrica del secadero.

La capacidad útil necesaria de un secadero es función de la organización interna de la empresa. Cuando la empresa alquila su prestación a terceros, suele ser recomendable que la capacidad útil del secadero corresponda a la de uno o dos envíos por camión de madera seca, es decir, 30 o 60 m<sup>3</sup>. Esta capacidad suele ser también adecuada si la madera destinada al secado llega por camión. Esta suele ser una de las razones por las cuales estos tamaños son los más habituales.

Si la empresa asierra y/o transforma por sí misma la madera que seca, la elección es algo más complicada, ya que deben evaluarse la producción diaria de madera verde y las necesidades diarias de madera seca, la existencia o no de almacenamientos temporales, tanto de madera, verde como seca; así como la diversidad de maderas y espesores que se emplean, lo que se traduce en duraciones del secado distintas. En cualquier caso, un conjunto de

secaderos pequeños aporta mucha más elasticidad al funcionamiento interno de la empresa que uno grande, pues evita la poco recomendable mezcla de especies y/o espesores.

### C) La forma geométrica del secadero

Los criterios que deberán considerarse son los siguientes:

#### -La anchura del secadero

La anchura del secadero se corresponde con la dirección del flujo de aire que atraviesa a las pilas. Debe elegirse de forma que se consiga la máxima homogeneidad en el secado, por ellos se aconseja emplear anchuras de pila de 3m, si el sistema de ventilación incorpora la posibilidad de inversión del sentido del flujo de aire. La recomendación anterior es válida para el caso de coníferas desde estado verde, pues si se considera secar frondosas o madera oreadas, la anchura de las pilas puede duplicarse.

#### -La altura del secadero

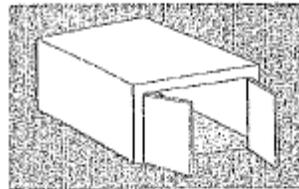
Es función de la altura máxima de las pilas que garantice su estabilidad y del sistema de carga empleado (vagonetas, toros, etc.) Para asegurar la estabilidad se aconseja emplear alturas de 3.5 a 4 m. Si se considerará necesario de acuerdo con el diseño elegido, la altura total interior del secadero deberá calcularse añadiendo a la altura de las pilas antes citada el espacio interior necesario para la ubicación de los elementos auxiliares (ventiladores, intercambiadores, etc.) que, por término medio, requiere de 1 a 1,5 metros. En cualquier caso, deberá asegurarse una distancia mínima de 20 cm entre el tope de la pila superior y el techo (o falso techo) del secadero.

#### -La longitud del secadero

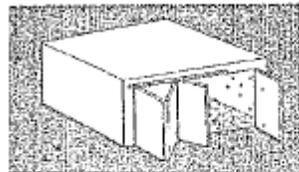
Esta medida será función de los largos con los que habitualmente se corte la madera, así como de la capacidad útil total que se quiera dar al secadero. Debe considerarse siempre un espacio adicional para la ubicación de pasillos laterales, cuya anchura mínima será de 1 metro por pasillo.

#### D) Tipo de puerta

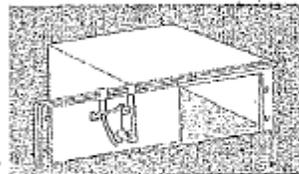
Los tipos de puerta existentes en el mercado se recogen en la figura 10



- Batientes



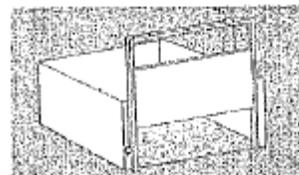
- De fuelle



De corredera



- De corredera con varias secciones



- De guillotina

---

Fuente: (Juan Ignacio Fernandez-Golfín Seco, 1998)  
Figura 10. Tipos de puertas

#### -Batientes

Es el sistema más simple e incorpora una o dos hojas. Se emplea para anchuras de hasta 5 m. Sus grandes desventajas son la necesidad de mucho espacio libre alrededor, el riesgo de ser

golpeadas por los medios de carga y descarga, la fuerte resistencia al viento que ofrecen y, con el tiempo, la dificultad de su correcto cerrado.

- De fuelle

Se compone de varias hojas, de menor tamaño que las anteriores, que cierran en forma de acordeón. Cuando el vano total es grande (hasta 13 m) es un sistema más recomendable que el de puertas batientes pero sigue teniendo sus mismos inconvenientes.

- De corredera

La puerta se desliza por un riel superior colocado paralelo y a seguido de la pared del secadero donde va la puerta. Este sistema es muy conveniente cuando se dispone de una batería de secaderos adosados entre sí. Aporta una buena estanqueidad.

- De corredera con varias secciones

Idéntico al anterior pero con la puerta compuesta por varios paneles que se deslizan por su carril, disponiéndose todos, cuando la puerta está abierta, en un lateral del secadero. Es una buena solución cuando el secadero está aislado y se dispone de poco espacio. La estanqueidad resulta peor que en el caso anterior.

- De guillotina

En esta solución la puerta sube y baja. Se emplea para grandes aberturas (hasta 14 m), pero ofrece mucha resistencia al viento y su ajuste debe ser siempre muy preciso e incorporar sistemas de seguridad contra la caída repentina.

#### Características y diseño del sistema de circulación del aire interior

La calidad del secado depende de la homogeneidad en el contenido final de humedad (dentro de cada pieza y entre las piezas) y este, a su vez, depende de la homogeneidad de las condiciones higrotérmicas a lo largo de todo el flujo de aire que atraviesa las pilas de madera.

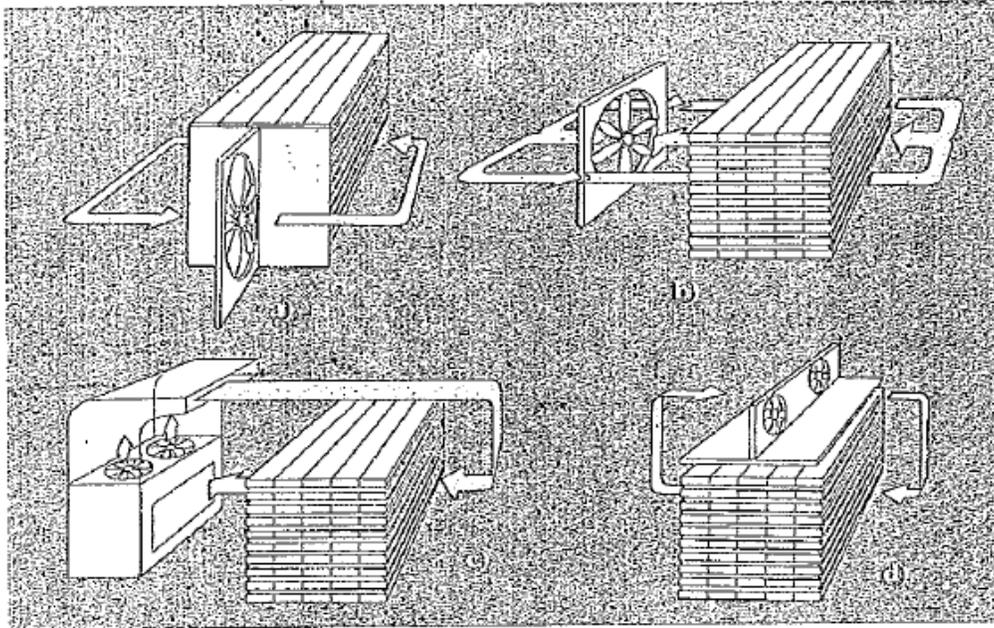
De acuerdo con lo anterior, puesto que el diseño del sistema de circulación del aire interior es fundamental a la hora de conseguir una buena homogeneidad en las condiciones higrotérmicas a lo largo del flujo de aire, este incidirá de forma marcada en la calidad final del secado.

En el secado por convención, el aire actúa como agente secante, por lo que su velocidad y caudal deben ser regulados de forma que, por un lado, permita la adecuada transferencia calorífica a la madera y, por otro, que evacúe el vapor de agua emergente de la madera y mantenga las condiciones homogéneas a lo largo de todo el flujo de aire.

El aire interior se mueve mediante ventiladores colocados en el interior de las cámaras, bien en una pared lateral (ubicación aconsejada para cámaras pequeñas en las que el flujo de aire sólo atraviesa una o dos pilas de madera), perpendicularmente a las pilas en su longitud o, lo que es más frecuente, en el techo (colocación indicada para los grandes secaderos). Normalmente, son de transmisión directa, si bien, en ocasiones, los motores van colocados al exterior o descentrados respecto de su eje y la transmisión se efectúa mediante poleas y correas. Su diámetro, velocidad de giro, número y potencia, así como su emplazamiento exacto son parámetros que deben ser cuidadosamente analizados en función de la geometría del secadero y el caudal requerido.

Cuando los motores eléctricos que los accionan van ubicados en el interior de la cámara, que es la ubicación más frecuente, deben incorporar toda clase de sistemas de protección contra los ambientes corrosivos y agresivos existentes dentro de las cámaras, así como estar contruidos con materiales de probada resistencia a estos ambientes.

La ubicación más habitual de los ventiladores es en el techo, por encima de las pilas, bien alineados, o por encima de un falso techo. Cuando se hace uso de sistemas basados en bomba de calor, los ventiladores suelen ir colocados en el exterior.



Fuente: (Juan Ignacio Fernandez-Golfín Seco, 1998)

Figura 11. Tipos de sistemas de ventilación

El aire impulsado por los ventiladores atraviesa las baterías de calefactores y los sistemas de humidificación y/o deshumidificación, los cuales quedan convenientemente climatizados. Posteriormente es dirigido hacia las pilas de madera, atravesándolas por los espacios libres que dejan entre sí las sucesivas capas, por efecto de los rastreles. Para un caudal constante, la velocidad del aire medida en el espacio que dejan entre sí las capas será tanto mayor conforme menor sea el tamaño del rastrel.

El caudal de los ventiladores debe calcularse en función de la pérdida máxima de carga esperada (función de la anchura total de las pilas, del espesor mínimo de rastreles y del coeficiente de rugosidad de la madera) entre la cara de entrada del aire en la pila y la cara de salida y la velocidad máxima teórica del aire en el interior del secadero.

Para optimizar la calidad y el coste del secado, a veces es conveniente poder hacer variar la velocidad del aire en función de los siguientes parámetros:

-Espesor de la madera. La velocidad intercapas crece, a igualdad de caudal, al disminuir el espesor del rastrel y éste con el de la madera.

-Contenido de humedad de la madera. La velocidad será máxima en la fase de precalentamiento, rápida en la primera etapa del secado y leca (40-50% de la inicial) cuando la humedad de la madera esté por debajo del 30%.

-Tarifa horaria. Horas pico y valle.

En las cámaras de gran capacidad es altamente conveniente que el sentido del giro de los ventiladores pueda cambiarse a intervalos regulares. Esta solución, aunque más cara, es necesaria para mejorar la homogeneidad del contenido de humedad de la madera dentro de las pilas.

Como sistema de control de la velocidad del aire se suelen emplear los anemómetros, especialmente los de aletas, introducidos en el espacio libre entre dos capas consecutivas de madera. La velocidad de aire recomendada debe ser tanto mayor conforme el método de secado sea más rápido. En la Tabla 4.3 se aportan datos medios de las velocidades de aire aconsejadas para los diferentes métodos de secado.

### Secado tradicional a temperatura media ( $\leq 80^{\circ}\text{C}$ )

#### Descripción del método

El aire, impulsado por los ventiladores, atraviesa el sistema de calefacción donde, si es necesario, se calienta hasta la temperatura de consigna; seguidamente atraviesa el sistema de humidificación que permite, si es necesario, humedecerlo. Una vez convenientemente climatizado de la forma expuesta, el aire es dirigido hacia las pilas, atravesándolas por los espacios libres que dejan entre sí las diferentes capas de madera. Conforme el aire atraviesa la madera va incrementando su humedad relativa con el vapor de agua procedente de la madera y disminuyendo su temperatura, puesto que al actuar como fluido térmico cede calor a la madera para que ésta evapore su exceso de humedad. Por lo tanto a la salida de las pilas, el aire está más frío y húmedo que a la entrada.

Una vez que el aire, frío y húmedo, se encuentra al otro lado de la carga de madera, este absorbido por los ventiladores para completar el recorrido y volver a repetir el proceso anterior. En el circuito de retorno, parte del aire cargado de humedad es expulsado al exterior por las tranquilas de ventilación que, en ocasiones, incorporan pequeños extractores de aire. Al mismo tiempo que se expulsa parte del aire se da entrada a aire procedente del exterior, el cual se mezcla con el aire interno el cual se dirige hacia los ventiladores y se cierra el circuito. La entrada del aire exterior, más frío y seco que el interior hace bajar la temperatura y humedad relativa del secadero.

Debe señalarse que aunque el aire exterior tenga una humedad relativa muy alta, su elevación térmica en el sistema de calefacción hace que baje fuertemente su humedad, por lo que permitirá hacer descender la humedad relativa del secadero. La regulación del caudal de aire que entra y sale del secadero permite, a su vez, la regulación del exceso de humedad relativa interna.

En ocasiones, para minimizar las pérdidas caloríficas del secadero, el aire saliente (caliente) se le hace pasar por un intercambiador de calor, que permite precalentar el aire entrante (frío) y disminuir la energía necesaria para su elevación térmica hasta la temperatura de consigna.

Cuando la humedad relativa del aire interior se encuentra por debajo del valor de consigna, el sistema de regulación cierra todo intercambio con el exterior y activa el sistema de humidificación del aire interior. Este sistema de humidificación puede estar basado o en la pulverización de agua (micro ionizado) o en la inyección de vapor (saturado) procedente del sistema de calefacción.

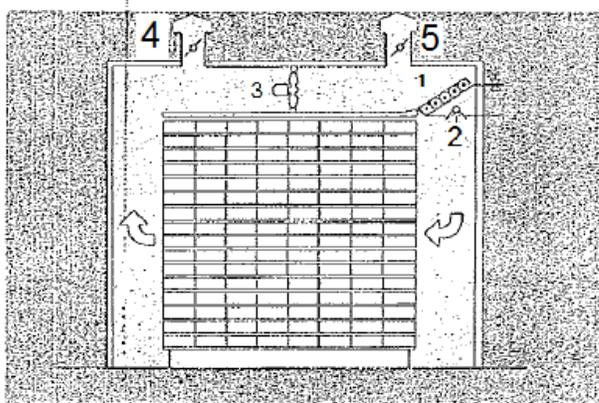
Cuando la temperatura en el secadero cae por debajo del valor de consigna, la regulación activa el sistema de calefacción. Si por contra la temperatura supera la de consigna, la regulación desactiva la calefacción y, eventualmente, puede ordenar la apertura del sistema de intercambio de aire con el exterior.

Dentro de este método general se pueden considerar dos tipos diferentes de secaderos:

#### Secaderos discontinuos

En los que la madera apilada en su interior permanece inmóvil y las condiciones ambientales van variando a lo largo del proceso de secado.

Este tipo es el más habitual, pues permite una elasticidad de uso muy superior, y es el más recomendable cuando existe poca homogeneidad (especies, espesores) en el suministro de materia prima al secadero.



- 1-Sistema de calefacción
- 2 -Sistema de humidificación
- 3 -Ventiladores sobre falso techo
- 4 -Trampilla de admisión de aire exteriormente
- 5 -Trampilla de expulsión de aire

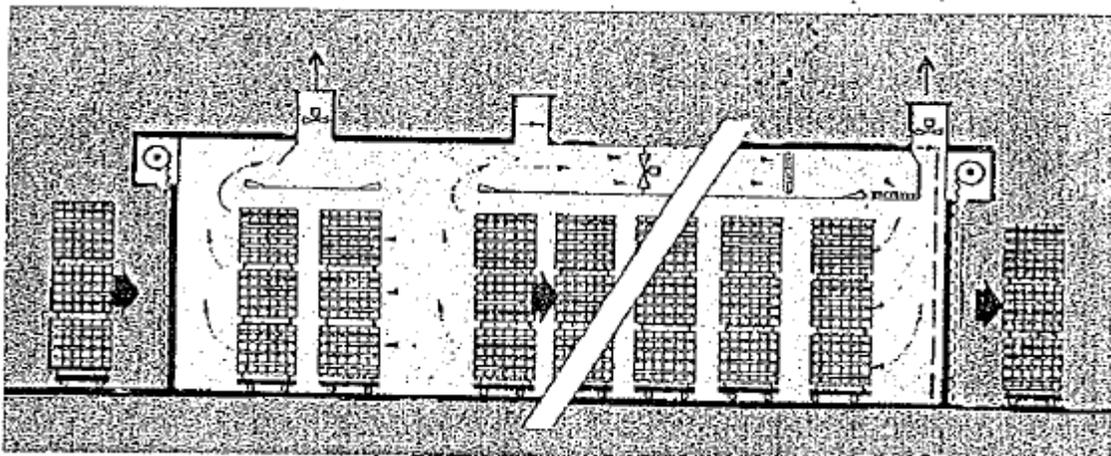
Fuente: (Juan Ignacio Fernández-Golfín Seco, 1998)  
Figura 12. Secador tradicional

#### Secaderos tipo túnel o continuos

En estos secaderos, la madera apilada avanza a lo largo del secadero pasando por sucesivas condiciones ambientales (de acuerdo con el programa previamente aprobado). Están constituidos, en realidad, por un conjunto de secaderos (tantos como etapas de regulación se consideren) colocados en serie, provistos de un sistema de avance de la madera (normalmente vagonetas).

Exigen trabajar con una gran homogeneidad en la materia prima (especie, espesores, humedades) para que sea posible la regulación de las distintas etapas.

El principio de funcionamiento se basa en hacer circular la madera en sentido contrario al flujo interno del aire (Figura 12). El aire interior, a medida que va atravesando a la madera se va enfriando y cargando de humedad, por lo que la madera, conforme avanza, se encuentra con un aire cada vez más seco y caliente. A la salida de las pilas el aire se climatiza de la forma general expuesta en la descripción general del método.



Fuente: (Juan Ignacio Fernández-Golfín Seco, 1998)  
Figura 13. Secador Tradicional continuo

Dado que en ambos casos el principio del método de regulación es el mismo, constarán de los mismos equipos de climatización del aire interior, si bien diseñados con criterios diferentes.

#### Control y operación de un secador

En el desarrollo de secado, es necesario controlar condiciones relacionadas con la cámara de secado, los medios disponibles para llevar a cabo el proceso, la madera y la operación del secador.

La velocidad y la presión del aire dentro del secador se fijan al escoger los ventiladores; por razones de simplificación del diseño y economía, estas características no son variables. La temperatura se mide por medio de termómetros (de mercurio, alcohol, tensión de vapor, resistencia eléctrica) y su lectura puede ser directa o a distancia, por medio de aguja indicadora o digital. Para medir la humedad relativa HR del aire se utiliza un psicrómetro o un higrómetro.

Los factores que deben tenerse en cuenta para realizar el secado son: el tiempo disponible, la humedad relativa HR del aire ambiente utilizado, la cantidad y continuidad de la energía disponible, la uniformidad en el recorrido del aire al interior de la cámara y la precisión de las medidas que controlan el proceso. La tabla 1 presenta los tres instrumentos básicos que pueden encontrarse en un secador, cuál es su función y cómo afectan el proceso de secado.

**Tabla 1. Funciones y efectos de los instrumentos básicos que pueden encontrarse en un secador**

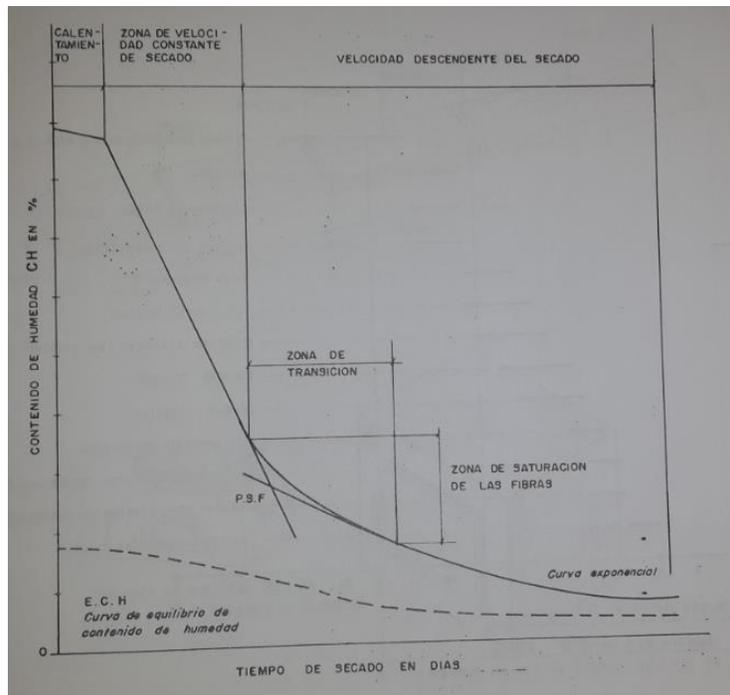
Fuente: (Johnson, 1998)

Instrumento	Función	Efecto
Regulador de calor	Controlar la temperatura	Al admitir aire ambiente, la temperatura disminuye
Ventilas y medios de evacuación de aire	Evacuar el aire húmedo	Al admitir aire ambiente, la temperatura disminuye
	Admitir aire ambiente	Si el aire ambiente está húmedo, la HR aumenta Hay pérdida importante de calor por las ventilas y medios de evacuación de aire
Humidificación con vapor húmedo	Aumenta la HR	Si el vapor es caliente la temperatura aumenta Si el vapor es frío, la temperatura disminuye

El cuarto de control de secado, anexo a la cámara o tan cerca de esta como sea posible, debe contener: una mesa de trabajo, la mufla, la balanza, serrucho y otras herramientas manuales para fabricar las muestras, la documentación necesaria (los formatos de control de secado, los programas de secado, las tablas de depresión psicométrica, humedad relativa HR del aire y contenido de humedad de equilibrio CHE de la madera, un diagrama del aire húmedo), y un archivo para la información ya procesada.

Respecto a la madera, debe conocerse bien su especie, espesor, tipo de aserrado (radial o tangencial), su calidad (cantidad de nudos y rajaduras) y la calidad que debe tener la madera seca: si se aceptan o no tensiones internas, qué dispersión se tolera en el contenido de humedad CH final del lote de madera y en la variación del contenido de humedad CH entre el interior y el exterior de una pieza de madera y también, cuál es el porcentaje de defectos como (rajaduras, torceduras, coloraciones, etc.) que pueden presentarse en la madera. Cualquiera que sea el método empleado, el secado de la madera presenta cuatro fases o etapas características. La primera fase es la de precalentamiento, que comprende: el aumento de la temperatura del aire dentro de la cámara, el calentamiento de la madera hasta el propio centro de las piezas, y la estabilización del contenido de humedad CH de la madera. Durante el precalentamiento la madera aún no seca y, en cambio, puede llegar a humedecerse durante la estabilización. La segunda fase es el secado, que comprende los tres períodos: desde verde hasta el punto de saturación de las fibras PSF, el paso por la zona de PSF, y el secado hasta contenidos de humedad CH inferiores al punto de saturación de las fibras PSF. En la tercera fase, llamada de equilibrio, se iguala el

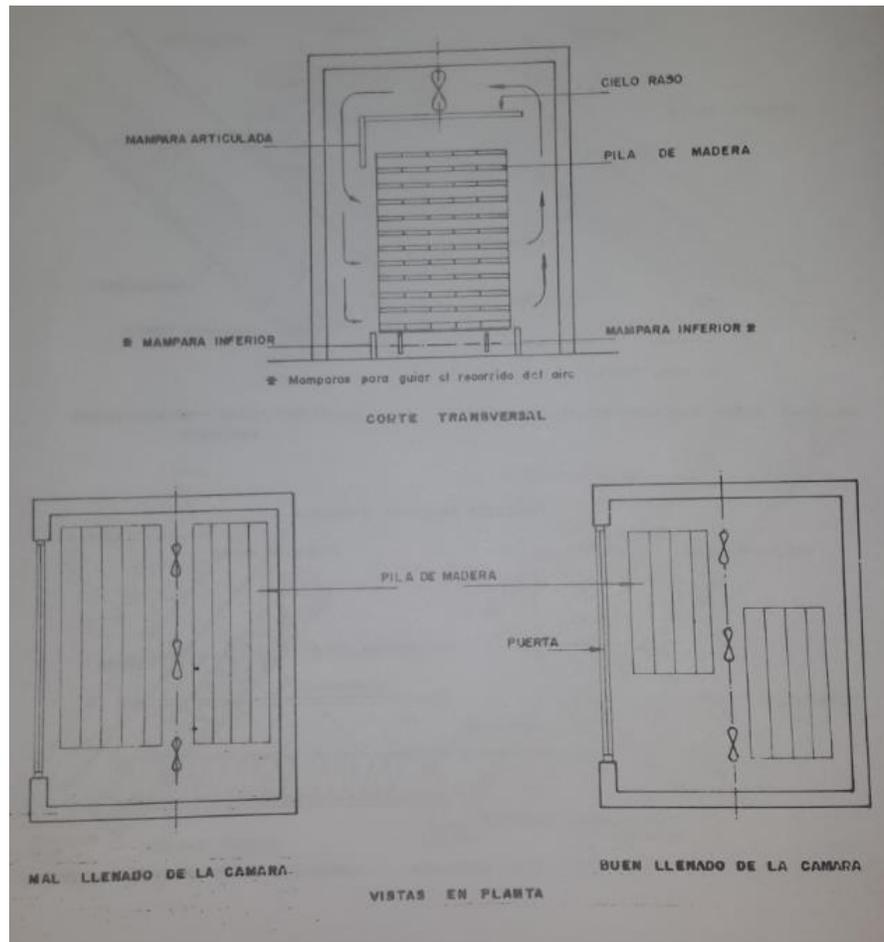
contenido de humedad CH entre el interior y el exterior de las piezas de madera. La cuarta fase se llama enfriamiento y en ella se logra la estabilización de la madera mejorando el equilibrio en el contenido de humedad CH. En climas fríos, esta última fase se hace más necesaria, para evitar los choques térmicos que se producen al sacar de la cámara la madera caliente y ponerla en contacto con el aire exterior frío.



Fuente: (Johnson, 1998)

Figura 14. Variación del contenido de humedad CH de la madera en función del tiempo

La conducción correcta del secado requiere un buen apilado. Los separadores gruesos, por ejemplo, facilitan la circulación del aire, pero disminuyen su velocidad y reduce la carga de madera en el secador. La distancia entre los separadores debe aumentarse hasta donde lo permita el peso de la madera sin que se produzcan deflexiones o arqueaduras de las piezas. Las dimensiones de las pilas dependen del volumen disponible dentro del secador, de las dimensiones de la madera, de la altura permisible sin comprometer la estabilidad de la pila, de la forma como debe realizarse la manipulación de cargue y descargue del secador, y de la búsqueda de una circulación uniforme del aire a través de la pila. Finalmente debe tenerse en cuenta el acceso a las muestras testigos para controlar el programa de secado. La figura 14 presenta dos esquemas que ilustra cómo deben cortarse los recorridos inconvenientes del aire y la forma de llenar la cámara de secado cuando el espacio disponible en esta es bastante mayor que la longitud de las pilas de madera.



Fuente: (Johnson, 1998)

Figura 15. Solución a malos recorridos del aire y a tamaño insuficiente de pilas dentro de una cámara de secado

#### Conducción manual

La conducción manual de un secador de madera se resume en los cinco pasos siguientes:

Paso 1. Posicionar las pilas de madera en la cámara y escoger un programa de secado adecuado a la especie y a las dimensiones de la madera.

Paso 2. Medida del contenido de humedad CH de la madera por el método de doble pesada o por medio de un medidor eléctrico.

Paso 3. Distribuir las muestras testigos en la pila de madera. Deben pesarse periódicamente; en principio, una o dos veces por día.

Paso 4. Cerrar la cámara y operar los controles según lo requiera el programa de secado.

Paso 5. A medida que avanza el secado, el control del programa requiere la vigilancia del contenido de humedad CH de las muestras testigos, utilizando para ellos los formatos adecuados. Debe también vigilarse la posible aparición de defectos por medio de la observación de la madera y, en particular, de las probetas de tenedor, para controlar estos problemas cuando aún sea tiempo de hacerlo.

#### Conducción semi-automática

Esto se presenta cuando los controles de los instrumentos de calentamiento, humidificación y ventilación se hacen con ayuda de personal y dispositivos motorizados como válvulas magnéticas, neumáticas, o eléctricas. El operario escoge los valores de temperatura y humedad relativa HR correspondiente al programa de secado y la automatización se encarga de mantener invariables estos valores; cuando el chequeo de las muestras testigo indique un cambio en los valores de temperatura y humedad relativa, el operario realiza el ajuste. Se procede entonces por pasos sucesivos según el programa de secado. En general, el control del proceso se logra por medio de un psicrómetro, en el cual se leen las temperaturas del bulbo seco y húmedo, y su diferencia permite conocer la humedad relativa HR y el equilibrio del contenido de humedad ECH correspondientes. Muchas de las válvulas de control utilizadas en la conducción semiautomática de un secador, son aparatos simples que trabajan solos en dos posiciones límites (abiertas o cerradas), lo cual resta exactitud al control de secado. La evolución de las muestras de control debe seguirse en permanencia desde el exterior, por medio de sondas eléctricas similares a las utilizadas para medir el contenido de humedad CH.

#### Conducción automática

En la conducción automática, el secado se lleva a cabo sin necesidad de operarios. En sus orígenes, la conducción automática, basada en un programa de secado establecido en forma experimental, controlaba la temperatura y la humedad relativa HR del aire mediante la aplicación de uno de los dos criterios siguientes: el primero, establecer escalas de variación cada cierto tiempo y, el segundo, establece escalas de variación cada que el gradiente de secado alcance ciertos valores determinados (el gradiente de secado es el cociente entre el contenido de humedad de la madera CH y el equilibrio de contenido de humedad (ECH) del ambiente dentro de la cámara). Aunque el segundo criterio es más exacto que el primero, ambos logran resultados irregulares en el control de secado.

Los primeros medios utilizados para estos controles automáticos fueron discos de cartón graduados que se montaban en mecanismos giratorio, sobre las escalas graduadas de los discos. Estos se graficaban continuamente los valores de la temperatura seca y de la depresión psicométrica. Una forma corriente de lograr el control automático basado en cambios escalonados cada cierto tiempo, consiste en calibrar el disco a razón de una vuelta completa cada hora, y, con cada giro, aumentar la temperatura del aire (por ejemplo, aumentar  $0.25^{\circ}\text{C}$  cada hora). Este procedimiento propicia una diferencia de temperaturas entre el aire y la madera que es conveniente para el proceso de secado y para prevenir tensiones en la madera, pero, como se dijo antes, los resultados obtenidos son irregulares y además, se requiere disponer de una potencia alta para lograr el calentamiento escalonado del aire.

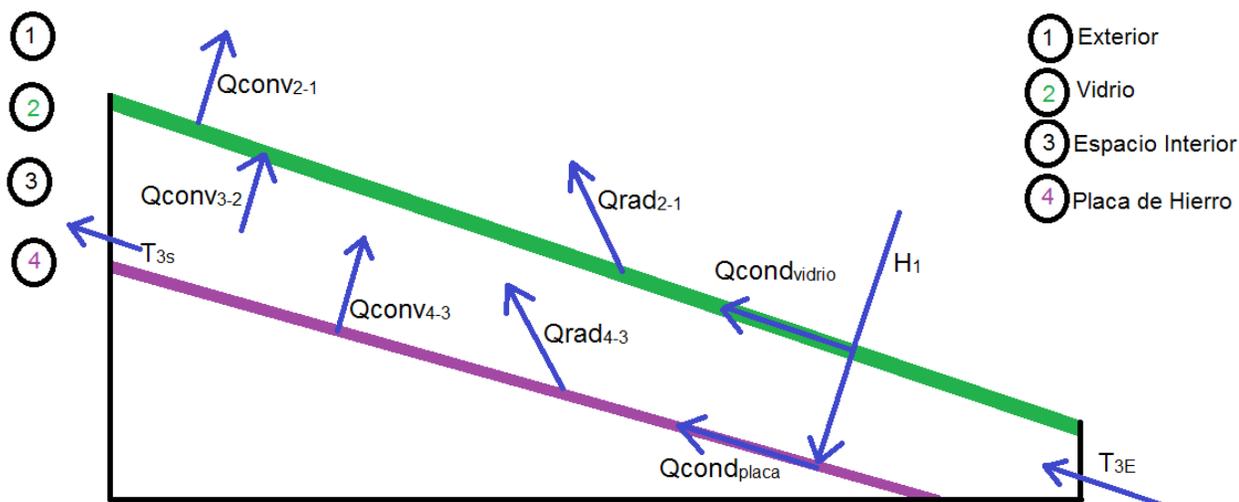
En la actualidad, los computadores permiten establecer un extraordinario intercambio de información para adaptar el proceso al tipo de secador, al tipo de madera y a sus características particulares; además, por medio de sondas que vigilan en todo momento el aire de secado y la madera, el computador puede adaptar el proceso según las variaciones que se presenten a medida que el secado avanza. Así mismo, por medio de un solo computador es posible controlar simultáneamente varias cámaras de secado.

## Capítulo 4 Descripción del horno de secado

### Colector solar

El colector solar es la pieza fundamental del horno, ya que va a ser la pieza que va a transformar la irradiación solar en energía calórica para aplicarla en aire caliente sobre la madera. Este fenómeno se analiza de la siguiente manera con el fin de obtener la temperatura final que va a ser aplicada sobre la madera

### Distribución energética



Fuente: Elaboración propia, Paint

Figura 16. Distribución del calor en todas sus formas

### Donde:

- $Q_{conv2-1}$ : calor por convección del vidrio al exterior.
- $Q_{conv3-2}$ : calor por convección del espacio interior al vidrio.
- $Q_{conv4-3}$ : calor por convección del espacio interior al vidrio.
- $H_1$ : irradiación solar directa.
- $Q_{cond_{vidrio}}$ : calor de conducción en el vidrio.
- $Q_{cond_{placa}}$ : calor de conducción en la placa.
- $Q_{rad2-1}$ : calor de radiación reflejada por el vidrio.
- $Q_{rad4-3}$ : calor de radiación reflejada por la placa.
- $T_{3E}$ : temperatura de entrada del aire.
- $T_{3s}$ : temperatura de salida del aire.

### Constante y características de las superficies

#### Constantes

- Gravedad:  $9,28 \text{ m/s}^2$
- Stefan Boltzman:  $\sigma=5.67 \times 10^{-8} \text{ (W/m}^2 \times \text{K}^4)$
- Irradiación horaria máxima:  $H_1 = 920 \text{ (W/m}^2)$

#### Características de la placa de hierro:

- Área:  $A_p=A_{\text{efec}}= 24.4 \text{ m}^2$
- Espesor:  $E_p=0,003 \text{ mm}$
- Coeficiente de conductividad:  $K_p= 79,2 \text{ W/mK}$
- Emisividad:  $\epsilon= 1$  \*\*
- Absortividad:  $\alpha= 1$  \*\*
- Transmisividad:  $\tau = 0,92$
- Longitud característica:  $L_{cp}= 0,8573 \text{ m}$
- Irradiación máxima en la placa:  $H_{1p} = 22448 \text{ (W)}$

\*\* Se considera un cuerpo negro, por el recubrimiento de pintura negra que se le va a colocar a dicha placa

#### Características del vidrio:

- Área:  $A_v= 29,95 \text{ m}^2$
- Espesor:  $E_v= 0,004 \text{ m}$
- Coeficiente de conductividad:  $K_v= 0,8 \text{ w/mK}$
- Emisividad:  $\epsilon= 0,92$
- Absortividad:  $\alpha= 0,1$
- Longitud característica:  $L_{cv}= 1.0215 \text{ m}$

Fórmulas

Número de Rayleigh

$$Ra = \frac{g \beta \Delta T L^3}{\nu^2} \times Pr$$

Donde:

- $g$  = gravedad ( $m/s^2$ )
- $\beta$  = Coeficiente de expansión volumétrica ( $1/K$ )
- $L$  = longitud (m)
- $\Delta T$  = Cambio de Temperatura
- Pr = Número de Prandtl
- $\nu$  = viscosidad cinemática ( $m^2/s$ )

Número de Nusselt

$$Nu = 1 + \left[ 1,44x \left( 1 - \frac{1708}{Ra \cos \theta} \right) \right] + \left[ 1 - \left( \frac{1708x(\sin(1,8x\theta)^{1,6})}{Ra \cos \theta} \right) \right] + \left[ \left( \frac{Ra \cos \theta}{5830} \right) - 1 \right]$$

Donde:

- $Ra$  = Número de Grashof
- $\theta$  = inclinación del colector solar ( $^\circ$ )

Longitud característica (Lc)

$$L_c = \frac{A_s}{P}$$

Ecuación 10. Longitud característica para cualquier superficie

Fuente: (Cengel, Tercera Edición)

Donde:

- $A_s$  = Area de la superficie ( $m^2$ )
- $P$  = Perímetro de la superficie (m)

Calor de conducción absorbida por el vidrio

$$H_1 \times \alpha_1 \times A_v$$

Ecuación 11. Conducción en el vidrio  
Fuente: Elaboración propia

Donde:

- $H_1 =$  *Irradiación Solar Directa (W/m<sup>2</sup>)*
- $\alpha_1 =$  *Absortividad del vidrio*
- $A_v =$  *Area del vidrio (m<sup>2</sup>)*

Calor de conducción absorbido por la placa

$$H_1 \times \tau_2 \times \alpha_2 \times A_p$$

Ecuación 12. Conducción en la placa  
Fuente: Elaboración propia

Donde:

- $H_1 =$  *Irradiación Solar Directa (W/m<sup>2</sup>)*
- $\alpha_2 =$  *Absortividad de la placa de hierro*
- $A_p =$  *Area de de la placa (m<sup>2</sup>)*
- $A_p =$  *Tramisividad*

Coefficiente de convección del interior de cámara

$$H_{con_{3-2}} = \left[ \frac{Nu \times K}{Lc} \right]$$

Ecuación 13. Coeficiente de convección de la cámara de aire al vidrio  
Fuente: Elaboración propia

Donde:

- $K =$  *Conductividad Térmica (W/m x K)*
- $Nu =$  *Número de Nusselt*
- $A_v =$  *Longitud característica (m)*

Coeficiente de conducción de la placa al interior de la cámara

$$H_{con_{4-3}} = \frac{Nu \times K}{Lc}$$

Ecuación 14. Coeficiente de convección de la placa a la cámara de aire  
Fuente: Elaboración propia

Donde:

- $K =$  Conductividad Térmica ( $W/m \times K$ )
- $Nu =$  Número de Nusselt
- $A_v =$  Longitud característica (m)

Coeficiente de conducción del vidrio con el exterior

$$H_{con_{2-1}} = [2,8 + (3.0 \times V_{viento})]$$

Ecuación 15. Coeficiente de conducción entre el vidrio y el exterior  
Fuente: Elaboración propia

Donde:

- $V_{viento} =$  velocidad del viento (m/s)

Coeficiente de radiación reflejada del vidrio al exterior

$$H_{rad_{2-1}} = \sigma \varepsilon_2 (T_2^2 + T_1^2) (T_2 + T_1)$$

Ecuación 16. Coeficiente de radiación del vidrio con el exterior  
Fuente: Elaboración propia

Donde:

- $\varepsilon_2 =$  emisividad del vidrio
- $\sigma =$  Constante de Stefan Boltzman ( $W/m^2 \times K^4$ )
- $T_2 =$  Temperatura del vidrio (K)
- $T_1 =$  Temperatura del exterior (K)

Coeficiente de radiación reflejada por la placa hacia el vidrio

$$Hrad_{4-2} = \frac{\sigma \times (T_4^2 - T_2^2) \times (T_4 + T_2)}{\frac{1}{\epsilon_4} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$$

Ecuación 17. Coeficiente de radiación entre la placa y el vidrio

Fuente: Elaboración propia

Donde:

- $\epsilon_4$  = emisividad de la placa
- $\epsilon_2$  = emisividad del vidrio
- $\sigma$  = Constante de Stefan Boltzman ( $W/m^2 \times K^4$ )
- $T_2$  = Temperatura del vidrio (K)
- $T_4$  = Temperatura de la placa (K)

Balances de energía en diferentes puntos

Balance de energía en el vidrio (1)

$$\begin{aligned} Q_E &= Q_s \\ Qrad_{p-v} + Qconv_{Ain-v} + Qrad_{Sol} &= Qconv_{v-ex} + Qrad_{v-ex} \\ (A_v \times H_1 \times \alpha_1) + (A_p \times Hrad_{4-3} \times (T_4 - T_3)) + (A_{efec} \times Hconv_{3-2} \times (T_3 - T_2)) \\ &= (A_{efec} \times Hrad_{2-1} \times (T_2 - T_1)) + (A_v \times Hcov_{2-1} \times (T_2 - T_1)) \end{aligned}$$

Balance de energía en el flujo de aire (2)

$$\begin{aligned} Q_E &= Q_s \\ Qconv_{Ain-v} + Qconv_{p-v} &= Qconv_{Flujo de aire} \\ (Hconv_{3-2} \times (T_3 - T_2) \times A_v) + (Hconv_{4-3} \times (T_4 - T_3) \times A_p) &= (m \times C_p \times (T_{3F} - T_{3I})) \end{aligned}$$

Balance de energía en la superficie de la placa (3)

$$\begin{aligned} Q_E &= Q_s \\ Qconv_p &= Qconv_{v-ex} + Qrad_{v-ex} \\ H_1 \times \tau_4 \times \alpha_4 \times A_p &= (A_p \times Hrad_{4-3} \times (T_4 - T_3)) + (A_{efec} \times Hconv_{3-2} \times (T_2 - T_3)) \end{aligned}$$

Para poder conocer la temperatura a la cual se va a estar calentando la madera, se deben analizar dos escenarios. El primero es para conocer la temperatura de la cámara de aire entre la placa y el vidrio donde está totalmente cerrado. El segundo escenario es cuando, una vez conocida esa temperatura de operación de la cámara de aire cerrada, se debe analizar con el flujo de aire necesario y conocer la temperatura requerida

Se quiere conocer inicialmente la temperatura interior  $T_3$ , la cual es necesaria para seguidamente conocer la temperatura a la cual saldría el aire  $T_{3s}$

Se suponen las siguientes temperaturas, ya que las mismas no pudieron ser diagnosticadas en el campo, temperatura del vidrio es 15°C más que la temperatura ambiente, al igual que la temperatura de la placa y la temperatura de la placa es 45°C más que la temperatura ambiente. Esto para iniciar a iterar los datos en los rangos de temperatura mínima ambiental hasta la máxima ambiental en el transcurso del día donde en el lugar de operación la temperatura mínima en el día es de 24°C y una máxima de 35°C. Todos los datos que se presentan a continuación reflejan cómo se realiza el cálculo utilizando como base dicha temperatura mínima y en cuadros los resultados para las demás temperaturas. Por comodidad se analiza la placa desde el punto de vista energético

Se averigua la longitud característica tanto de la placa como del vidrio

$$L_{cp} = \frac{A_p}{P} = \frac{24,4}{(2 \times 12,2) + (2 \times 2,03)} = 0,85737364 \text{ m}$$

$$L_{cv} = \frac{A_v}{P} = \frac{29,9}{(2 \times 12,2) + (2 \times 2,46)} = 1,021487 \text{ m}$$

Para conocer las características del aire en esta recámara entre el vidrio y la placa se saca la temperatura promedio

$$T_m = \frac{T_p + T_v}{2} = \frac{39 + 69}{2} = 61,5^\circ\text{C}$$

**Tabla 2. Temperatura del vidrio, placa y media en K y °C**  
Fuente: Elaboración propia

Temperatura Del vidrio °C	Temperatura del vidrio K	Temperatura de la placa °C	Temperatura de la placa K	Temperatura Media °C	Temperatura media K
39	312	84	357	61,5	334,5
40	313	85	358	62,5	335,5
41	314	86	359	63,5	336,5
42	315	87	360	64,5	337,5
43	316	88	361	65,5	338,5
44	317	89	362	66,5	339,5

45	318	90	363	67,5	340,5
46	319	91	364	68,5	341,5
47	320	92	365	69,5	342,5
48	321	93	366	70,5	343,5
49	322	94	367	71,5	344,5
50	323	95	368	72,5	345,5

Basado en la Tabla A-15 se obtienen las siguientes características del aire

**Tabla 3. Características del aire a la temperatura media**  
Fuente: (Cengel, Tercera Edición)

$\beta$	$\nu$ ( $m^2/s$ )	Pr
0,002989537	1,91E-05	0,719825
0,002980626	1,92E-05	0,719575
0,002971768	1,93E-05	0,719325
0,002962963	1,94E-05	0,719075
0,00295421	1,95E-05	0,718825
0,002945508	1,96E-05	0,718575
0,002936858	1,97E-05	0,718325
0,002928258	1,98E-05	0,718075
0,002919708	1,99E-05	0,717825
0,002911208	2,00E-05	0,7177
0,002902758	2,01E-05	0,72306
0,002894356	2,02E-05	0,7228

Se saca el número de número de Rayleigh

$$Ra = \frac{9,81 \times 0,002989537 \times (342 - 297) \times 0,004^3}{(1,91 \times 10^{-5})^2} \times 0,719825 = 1639461400$$

**Tabla 4. Número de Rayleigh a la temperatura correspondiente**  
Fuente: Elaboración propia

Ra
1.639.461,400
1.617.206,807
1.595.353,045
1.573.891,071
1.552.812,090
1.532.107,541
1.511.769,097
1.491.788,653
1.472.158,319
1.460.416,455
1.444.806,471
1.425.603,312

Con el número de Rayleigh se utiliza para obtener el número de Nusselt

$$Nu = 1 + \left[ 1,44x \left( 1 - \frac{1708}{1639461x \cos 10} \right) \right] + \left[ 1 - \left( \frac{1708x(\sin(1.8x10)^{16})}{1639461x \cos 10} \right) \right] + \left[ \left( \frac{1639461x \cos 10}{5830} \right) - 1 \right] = 90615880.1$$

**Tabla 5. Número de Nusselt a la temperatura correspondiente**  
Fuente: Elaboración propia

Nus
90.615.880,06
89.385.806,91
88.177.888,77
86.991.625,87
85.826.532
84.682.134,09
83.557.971,81
82.453.597,15
81.368.574,03
80.719.568,63
79.856.761,46
78.795.349,48

Se ingresa el número de Nusselt para obtener el coeficiente de convección entre la placa y el vidrio

$$H_{con_{4-3}} = \frac{90615880.06 \times 0.024}{1.021487} = 2129034.474 \text{ (W m}^2\text{/K)}$$

**Tabla 6. Coeficiente de convección a la temperatura correspondiente**  
Fuente: Elaboración propia

$H_{con_{4-3}}$ (W m <sup>2</sup> /°C)
2.129.034,474
2.100.133,71
2.071.753,481
2.043.882,046
2.016.507,981
1.989.620,171
1.963.207,8
1.937.260,342
1.911.767,552
1.896.519,067
1.876.247,276
1.851.309,233

Para despejar la temperatura de la zona 3, también se ocupa conocer el coeficiente de radiación entre la placa y el vidrio

$$H_{rad_{4-2}} = \frac{5,67 \times 10^{-8} \times (357^2 - 312^2) \times (357 + 312)}{\frac{1}{0.98} + \frac{1}{0.10 - 1}} = 2.98287126 \text{ (W m}^2\text{/K)}$$

Tabla 7. Coeficiente de radiación entre la placa y el vidrio a la temperatura correspondiente  
Fuente: Elaboración propia

$H_{rad\ 4-3}$ ( $W\ m^2 / ^\circ C$ )
2,980287126
1,137302084
1,144091932
1,150901988
1,157732252
1,164582724
1,171453403
1,178344291
1,185255386
1,19218669
1,199138201
1,20610992

Una vez despejados las variables incógnitas, procede a despejar la temperatura de la cámara de aire interna

$$\begin{aligned}
 Q_E &= Q_s \\
 Q_{conv_p} &= Q_{conv_{V-ex}} + Q_{rad_{V-ex}} \\
 H_1 \times \tau_4 \times \alpha_4 \times A_p &= (A_p \times H_{rad_{4-2}} \times (T_4 - T_2)) + (A_{efec} \times H_{conv_{4-3}} \times (T_4 - T_3)) \\
 H_1 \times \tau_4 \times \alpha_4 \times A_p &= (A_p \times H_{rad_{4-2}} \times (T_4 - T_2)) + (A_{efec} \times H_{conv_{4-3}} \times (T_4 - T_3)) \\
 (H_1 \times \tau_4 \times \alpha_4 \times A_p) - (A_p \times H_{rad_{4-2}} \times (T_4 - T_2)) &= (A_{efec} \times H_{conv_{4-3}} \times (T_4 - T_3)) \\
 \frac{(H_1 \times \tau_4 \times \alpha_4 \times A_p) - (A_p \times H_{rad_{4-2}} \times (T_4 - T_2)) - (A_{efec} \times H_{conv_{4-3}} \times T_4)}{(A_{efec} \times H_{conv_{4-3}})} &= T_3 \\
 \frac{(22448 \times 0,99 \times 0,98 \times 24,4) - (24,4 \times 0,72026 \times (342 - 312)) - (29,95 \times 39,5171 \times 342)}{(29,95 \times 39,51)} &= T_3 \\
 T_3 &= 311,99\ K \\
 T_3 &= 38,99\ ^\circ C
 \end{aligned}$$

**Tabla 8. Temperatura en la cámara interna de aire correspondiente a la temperatura ambiente**

Fuente: Elaboración propia

$T_3 K$	$T_3 ^\circ C$
311,9922002	38,99
312,992093	39,99
313,9919849	40,99
314,9918757	41,99
315,9917656	42,99
316,9916545	43,99
317,9915423	44,99
318,9914292	45,99
319,9913151	46,99
320,9912454	47,99
321,991151	48,99
322,991032	49,99

Una vez obtenido la temperatura de dicha recámara de aire caliente generada entre el vidrio y la placa sin que exista un flujo de aire entrando a la cámara, ahora se procede a analizar la cámara de aire con un flujo de aire pasando por la misma con una temperatura inicial ambiental y una temperatura de salida que debe ser mayor por el paso por la cámara la cual se procede a despejarse

Se inicia un procedimiento igual anterior, para saber las características del aire. Se saca una temperatura media entre la temperatura ambiental y la placa, ya que son los elementos que se va a analizar

$$T_m = \frac{T_P + T_A}{2} = \frac{69 + 24}{2} = 46.5^\circ C$$

**Tabla 9. Temperatura media entre el ambiente y la placa en K y °C**

Fuente: Elaboración propia

Temperatura Ambiente °C	Temperatura Ambiente K	Temperatura de la Placa °C	Temperatura de la Placa K	Temperatura media °C	Temperatura media K
24	297	69	342	46,5	319,5
25	298	70	343	47,5	320,5
26	299	71	344	48,5	321,5
27	300	72	345	49,5	322,5
28	301	73	346	50,5	323,5
29	302	74	347	51,5	324,5
30	303	75	348	52,5	325,5
31	304	76	349	53,5	326,5
32	305	77	350	54,5	327,5
33	306	78	351	55,5	328,5

34	307	79	352	56,5	329,5
35	308	80	353	57,5	330,5

Con esta temperatura media, basado en la Tabla A-15, se obtienen las características del aire

**Tabla 10. Características del aire a la temperatura media**  
Fuente: (Cengel, Tercera Edición)

B	$\nu$ ( $m^2/s$ )	Pr
0,00312989	1,77E-05	0,72358
0,00312012	1,78E-05	0,72332
0,00311042	1,79E-05	0,72306
0,00310078	1,80E-05	0,7228
0,00309119	1,81E-05	0,72254
0,00308166	1,82E-05	0,72228
0,0030722	1,83E-05	0,72202
0,00306279	1,84E-05	0,72384
0,00305344	1,85E-05	0,7215
0,00304414	1,86E-05	0,72124
0,0030349	1,87E-05	0,72098
0,00302572	1,88E-05	0,72072

Con estos datos se busca obtener el número de Rayleigh

$$Ra = \frac{9,81 \times 0,00313 \times (342 - 297) \times 0,003^3}{(1,62 \times 10^{-5})^2} \times 0,72756 = 122,3314516 \text{ } m^2/s$$

**Tabla 11. Número de Rayleigh asociado a la temperatura correspondiente**  
Fuente: Elaboración propia

Ra
86,2396759
85,0145937
83,8126018
82,6331551
81,4576977
80,3044377
79,1728501
78,2873883
76,9726654
75,9030909
74,8532327
73,8226357

El número de Rayleigh se utiliza para obtener el número de Nusselt

$$Nu = 1 + \left[ 1,44x \left( 1 - \frac{1708}{86.2396x \cos 10} \right) \right] + \left[ 1 - \left( \frac{1708x(\sin(1.8x10)^{16})}{86.2396x \cos 10} \right) \right] + \left[ \left( \frac{86.2396x \cos 10}{5830} \right) - 1 \right] = 1676,8633$$

**Tabla 12. Número de Nusselt asociado a la temperatura correspondiente**  
Fuente: Elaboración propia

Un
1.676,86337
1.676,58625
1.676,30455
1.676,0183
1.675,72288
1.675,42279
1.675,11804
1.674,87216
1.674,49458
1.674,1759
1.673,85259
1.673,52466

Con los números de Nusselt correspondientes se procede a despejar los coeficiente de convección entre en el flujo de aire calentado con el vidrio

$$H_{con_{2-3}} = \frac{1676,86337 \times 0.024}{1.021487} = 39,3981 \text{ (W m}^2\text{/K)}$$

**Tabla 13. Coeficiente de convección entre el flujo de aire y el vidrio**  
Fuente: Elaboración propia

$H_{con_{2-3}}$ (W m <sup>2</sup> /K)
39,3981709
39,3916599
39,3850414
39,3783157
39,3713748
39,3643242
39,3571639
39,3513871
39,3425157
39,3350282
39,327432
39,3197274

Se vuelve a encontrar la convección entre la placa y la sección de aire calentado. Las temperaturas medias de los valores que se van a trabajar cambiaron, ya que se está haciendo ingresar el aire a la recámara, a diferencia de los cálculos anteriores donde esto no se hacía y se tomaba como una área cerrada sin pérdidas

$$H_{con_{4-3}} = \frac{46.9411 \times 0.024}{0,857344} = 46,94118 \text{ (W m}^2\text{/K)}$$

Tabla 14. Coeficiente de convección entre la placa y el aire fluyendo  
Fuente: Elaboración propia

$H_{con_{4-3}}$ ( $W m^2 / K$ )
46,94117864
46,93342103
46,92553536
46,917522
46,90925229
46,90085172
46,89232061
46,88543777
46,87486795
46,86594691
46,8568964
46,84771661

Una vez obtenidos estos coeficiente, se procede a hacer el análisis correspondiente con el flujo de aire ingresando

$$\begin{aligned}
 Q_E &= Q_s \\
 Q_{conv_{Ain-v}} + Q_{conv_{p-v}} &= Q_{conv_{Flujo\ de\ aire}} \\
 (H_{conv_{3-2}} \times (T_3 - T_2) \times A_v) + (H_{conv_{4-3}} \times (T_4 - T_3) \times A_p) &= (m \times C_p \times (T_{3F} - T_{3I})) \\
 (39,3981 \times (311,99 - 317) \times 29,95) + (46,9411 \times (357 - 311,99) \times 24,4) &= (139,69 \times 1007 \times (T_{3F} - 312)) \\
 &= (139,69 \times 1007 \times (T_{3F} - 312)) \\
 (39,3981 \times (311,99 - 317) \times 29,95) + (46,9411 \times (357 - 311,99) \times 24,4) &+ (139,69 \times 1007 \times (312)) = (139,69 \times 1007 \times (T_{3F})) \\
 ((T_{3F})) & \\
 = \frac{(39,3981 \times (311,99 - 317) \times 29,95) + (46,9411 \times (357 - 311,99) \times 24,4) + (139,69 \times 1007 \times (312))}{139,69 \times 1007} & \\
 T_{3F} &= 301,7572\ K \\
 T_{3F} &= 28,75\ ^\circ C
 \end{aligned}$$

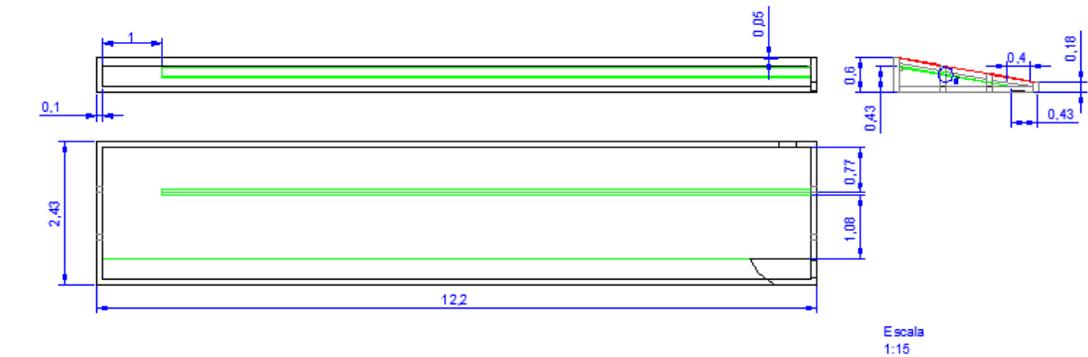
Tabla 15. Temperatura de la cámara de aire al hacer ingresar aire a temperatura ambiente  
Fuente: Elaboración propia

$T_{3F}$ K	$T_{3F}$ °C
301,7572845	28,7572845
302,7565001	29,7565001
303,7557027	30,7557027
304,7548924	31,7548924
305,7540561	32,7540561
306,7532066	33,7532066
307,7523439	34,7523439
308,7516482	35,7516482
309,7505789	36,7505789
310,7496759	37,7496759
311,7487602	38,7487602
312,7478318	39,7478318

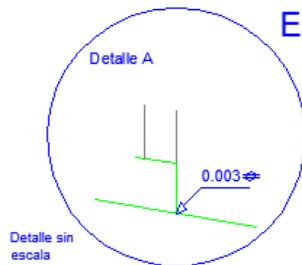
Cabe destacar que dichos análisis se realizaron tomando en cuenta las siguientes prevenciones:

- No se toma en cuenta la humedad relativa del aire exterior
- Se utiliza un valor promedio de irradiación solar a nivel nacional, no específico ya que no pudo ser observada en campo
- Siempre se utiliza la radiación máxima solar debido a que la misma no se pudo tomar en campo

Una vez hecho este análisis matemático se procede a realizar los planos constructivos de dicho colector que se detallan a continuación



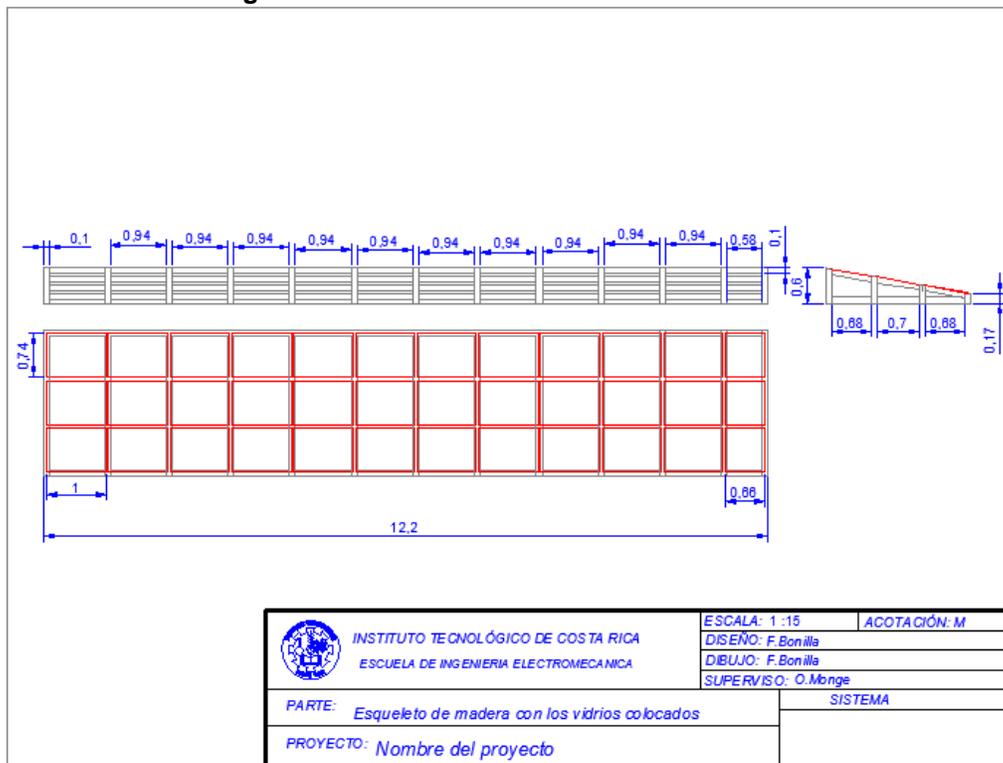
Estructura exterior y placa



	INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA	ESCALA: Indicada	ACOTACIÓN: M
	ESCUELA DE INGENIERIA ELECTROMECANICA	DISEÑO: F. Bonilla	
		DIBUJO: F. Bonilla	
		SUPERVISOR: O. Monge	
PARTE: Estructura Exterior y Placa		SISTEMA	
PROYECTO: Homo solar para secar madera			

Fuente: CAD Elaboración propia

Figura 17. Plano constructivo de colector solar



	INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA	ESCALA: 1:15	ACOTACIÓN: M
	ESCUELA DE INGENIERIA ELECTROMECANICA	DISEÑO: F. Bonilla	
		DIBUJO: F. Bonilla	
		SUPERVISOR: O. Monge	
PARTE: Esqueleto de madera con los vidrios colocados		SISTEMA	
PROYECTO: Nombre del proyecto			

Fuente: CAD Elaboración propia

Figura 18. Estructura de madera del colector y posición de los vidrios

El colector consta de 33 vidrios de medida 0.74cm de ancho por 1m de largo y 3 vidrios de 0,74cm de ancho y 0,66cm de largo

Sistema de ventilación y cámara de secado

Sistema de Ventilación

Una vez encontrada la temperatura la cual va a ser atacada la madera, el aire caliente debe ser en causado hacia la cámara de secado de la madera, esto se hace con una tubería cuadrada de 30cm de ancho por 30cm de alto durante una trayectoria de 10m. Dichos ductos de ventilación se van a construir con lámina lisa de hierro calibre 24.

BOBINAS DE LÁMINA LISA									
Espesor (mm)	Calibre	Ancho Total (m)	Dureza del acero	Acabado					
				•	•	•	•	•	
1.80	18	1220	suave	•					
1.50		1220	suave	•					
1.20		1220	suave	•					
0.95	19	1220	suave	•					
0.80	20	1220	suave	•					
0.70	22	1220	suave	•	•	•			
0.53	24	914	suave	•					
		1220	suave	•	•				
0.44	26	914	duro	•	•				
		1220	suave	•	•	•			
		1200	duro	•	•		•	•	
		1200	suave	•	•	•	•		
		914	suave	•	•	•	•	•	
0.32	28	914	duro	•					
		914	suave	•					
		1200	duro	•					
0.30	28	914	suave	•					
		914	duro	•					
0.27	30	914	suave	•					
		914	duro	•					

Nota: Se ofrece servicio de corte en flejes, para cualquiera de los productos de lista. Consultar con nuestro equipo los pedidos especiales que podemos producir.

Fuente: Metalco

Figura 19. Selección de Lámina para Tuberías

Para conocer el tipo de abanico que se va a utilizar se procede a ver la caída de presión que se va a tener a causa de la trayectoria. Esta se resumen en el siguiente cuadro:

Tramo	Fricción ducto (pulg H2O / 100 pies)	Longitud del ducto (pies)	K	Caída presión (pulg H2O)
A-B	0,1	6,56		0,00656
Trifurcación 1	0,1		0,91	0,0208
Tramos C-D	0,1	7,87		0,00787

Trifurcación 2	0,1		0,88	0,0208
Damper	0,1			0
Tramo E-F	0,1	9,84		0,00984
Trifurcación 3	0,1		0,91	0,1179
Tramo G-H	0,1	3,93		0,00393
Trifurcación 4	0,1		0,79	0,1179
Tramo I-J	0,1	3,93		0,00393
Trifurcación 5	0,1		0,74	0,478
Total				0,78753
Total + 10%				0,866283

Una vez obtenidas dichas caídas de presión, se procede a seleccionar los ventiladores adecuados con la velocidad y que cumplan con la caída de presión anterior.

Ventilador 1, es el que supe todo el volumen de aire total para la distribución y se ubica en la salida del colector solar. Este debe suplir un caudal de 1144, 206 CFM, Con base el catálogo de Greenheck se obtiene que el modelo S1-12436-G, que tiene 12 pulgadas de diámetro en sus aspas, motor de 0,1HP y 1300 rpm, cumple con lo necesario.

Model Number	Motor HP	Fan RPM	Max BHP	Sones @ F.A.	CFM/Static Pressure in Inches WG											
					0.00	0.05	0.10	0.125	0.15	0.20	0.30	0.375	0.50	0.625	0.75	
<b>S1 Performance Limits</b>																
S1-8-424-G		1350	28W	3.2	300	263	190									
S1-8-426-D	1/80	1550	39 W	3.7	310	282	231	190	140							
S1-8-428-P	1/40	1650	53 W	3.9	329	302	266	237	214	149						
S1-8-440-E	1/100	1050	50 W	1.5	311	224	126	100								
S1-8-440-G	1/40	1350	55 W	3.5	399	354	256	198	174	138						
S1-8-440-D	1/25	1550	75 W	4.9	459	419	351	307	255	198	167	115				
S1-10-424-D	1/50	1550	45 W	4.6	575	525	462	407								
S1-10-426-P	1/30		55 W	4.8	590	551	502	468	428							
S1-10-428-P	1/20	1650	78 W	5.2	606	573	536	511	484	407	272	249	213			
S1-10-440-E	1/40	1050	105 W	3.2	626	533	361									
S1-10-440-G	1/20	1350	135 W	4.9	804	738	655	615	564							
S1-10-440-D	1/12	1550	170 W	5.9	924	869	800	763	726	641						
S1-12-426-D		550	105 W	6.6	1113	1055	975	929	877	748	609	428				
S1-12-436-G	1/10	350	120 W	7.5	1269	1202	1101	1048	973	779	359					
S1-12-432-E	1/20	1050	125 W	4.3	981	877	744	678	622	463	383					
S1-12-432-G	1/12	1350	170 W	6.0	1262	1185	1097	1037	986	886	798	721	540			
S1-12-432-D		1550	190 W	7.5	1449	1382	1309	1271	1224	1129	1042	952	860	614	478	
S1-12-432-C8	1/8	860	0.03	4.0	804	664	511	438	348	248						
S1-12-432-B6	1/6	1160	0.07	4.8	1084	991	872	816	755	660	503	431				
S1-12-432-A4	1/4	1750	0.27	8.7	1636	1577	1515	1481	1447	1365	1282	1207	1085	947	706	585

Fuente: (Greenheck, 2009)

Figura 20. Abanico principal

Los otros diez abanicos deben mover el mismo caudal 288.84 CFM. En ellos varía la caída presión, pero es mínima, por lo tanto, se puede seleccionar uno que es funcional para todos. Del catálogo anterior se selecciona el modelo S1-8-440-D, con un diámetro de aspas de 8 pulgadas, 0.04 HP y 1550 RPM

Model Number	Motor HP	Fan RPM	Max BHP	Sones @ F.A.	CFM/Static Pressure in Inches WG												
					0.00	0.05	0.10	0.125	0.15	0.20	0.25	0.30	0.375	0.50	0.625	0.75	
<b>S1 Performance Limits</b>																	
S1-8-424-G	1/80	1350	28W	3.2	300	263	190										
S1-8-426-D		1550	39 W	3.7	310	282	231	190	140								
S1-8-428-P	1/40	1650	53 W	3.9	329	302	266	237	214	149							
S1-8-440-E	1/100	1050	50 W	1.5	311	224	126	100									
S1-8-440-G	1/40	1350	55 W	3.5	399	354	256	198	174	138							
S1-8-440-D	1/25	1550	75 W	4.9	459	419	351	307	255	198	167	115					
S1-10-424-D	1/50	1550	45 W	4.6	575	525	462	407									
S1-10-426-P	1/30	1650	55 W	4.8	590	551	502	468	428								
S1-10-428-P	1/20		78 W	5.2	606	573	536	511	484	407	272	249	213				
S1-10-440-E	1/40	1050	105 W	3.2	626	533	361										
S1-10-440-G	1/20	1350	135 W	4.9	804	738	655	615	564								
S1-10-440-D	1/12	1550	170 W	5.9	924	869	800	763	726	641							

Fuente: (Greenheck, 2009)

Figura 21. Abanicos de Distribución

En medio de las cámaras de secado se va a ubicar un damper para poder separar el flujo de aire en caso de solo utilizar la primera cámara de secado, este damper va a ser cerrado y todo el flujo de aire va a ser dirigido hacia la primera cámara de secado que albergaría las cargas de madera de longitudes corta, el damper se selecciona bajo el mismo manual de Greenheck, para este fin se selecciona el HTD- 640

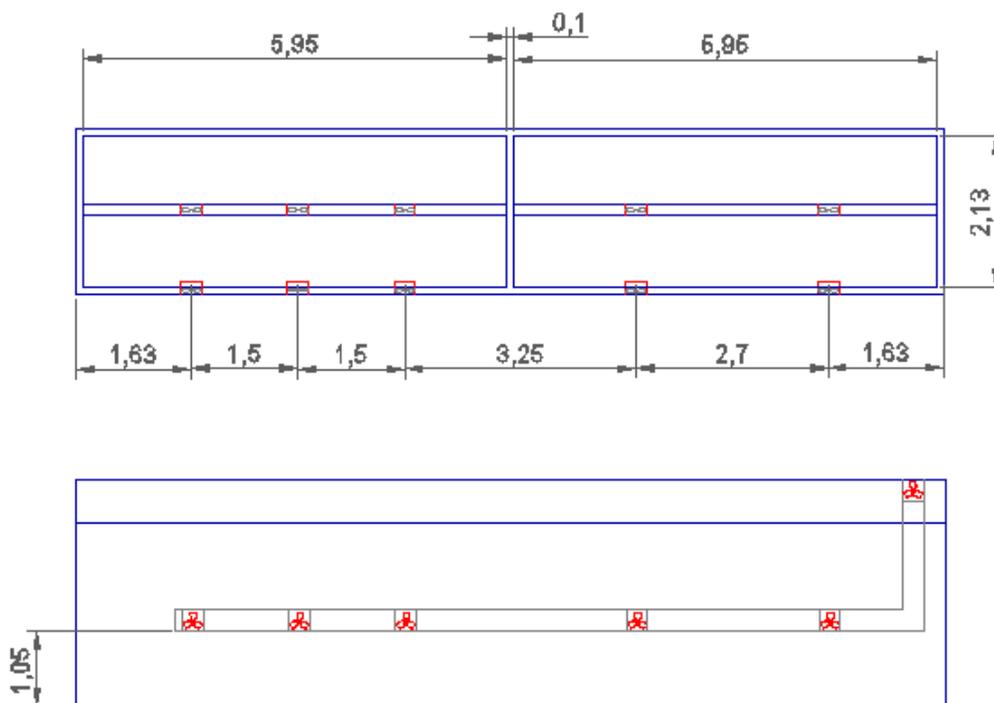
		HTD-630	HTD-636	HTD-640
Pressure in. wg (kPa)	Maximum	24 (6)	24 (6)	12 (3)
Velocity ft/min. (m/s)	Maximum	4000 (20.3)	4000 (20.3)	4000 (20.3)
Leakage		8 cfm/sq. ft. @ 4 in. wg (128cmh/sq. m @ 1 kPa)	8 cfm/sq. ft. @ 4 in. wg (128cmh/sq. m @ 1 kPa)	8 cfm/sq. ft. @ 4 in. wg (128cmh/sq. m @ 1 kPa)
Blade Deflection	Standard	L/180	L/180	L/180
	Optional	L/360	L/360	L/360
Frame	Galvanized Steel	●	●	●
	304SS	○	○	○
	316SS	○	○	○
Frame Gauge	14 ga. (2mm)	○	○	○
	12 ga. (2.7mm)	●	●	●
	10 ga. (3.5mm)	○	○	○
	1/4 in. (6mm)	○	○	○
Frame Depth	8 in. (203mm)	○	-	○
	10 in. (254mm)	○	-	○
	12 in. (305mm)	●	●	●
Blade Profile	Fabricated Airfoil	●	-	-
	Extruded Airfoil	-	-	●
	Fire Rated Airfoil	-	●	-
Blade Material	Galvanized Steel	●	●	-
	Aluminum	-	-	●
	304SS	○	○	-
	316SS	○	○	-
Blade Thickness	16 ga. (1.5mm)	○	●	-
	0.080 (2mm)	-	-	●
	14 ga. (2mm)	○	○	-
	12 ga. (2.7mm)	●	○	-
	10 ga. (3.5mm)	○	○	-
Blade Seals	Silicone	●	●	●
	Stainless Steel	○	-	-
Jamb Seals	Stainless Steel	●	●	●
Certifications	Operation	250°F (121°C) Continuous; 482°F (250°C) for 2 hours	752°F (400°C) for 2 hours	250°F (121°C) Continuous; 482°F (250°C) for 1 hour
	Standards	NFPA 130, 502; UL 555S	NFPA 130, 502; UL 555S; BS476	NFPA 130, 502; UL 555S
	Fatigue Cycles	8 million reverse cycles at 24 in. wg (6 kPa)		-

● = Standard ○ = Optional

Fuente: (Greenheck, 2009)

Figura 22. Selección de damper

Con el equipo seleccionado que se va a utilizar, se procede a realizar los planos constructivos que se detallan a continuación.



 <p>INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA ESCUELA DE INGENIERIA ELECTROMECANICA</p>	ESCALA: 1:15	ACOTACIÓN: M
	DISEÑO: F. Bonilla	
	DIBUJO: F. Bonilla	
	SUPERVISOR: O. Monge	
PARTE: Ubicación del sistema de ventilación y cámara de secado	SISTEMA	
PROYECTO: Horno solar para secar madera		

Fuente: CAD Elaboración propia

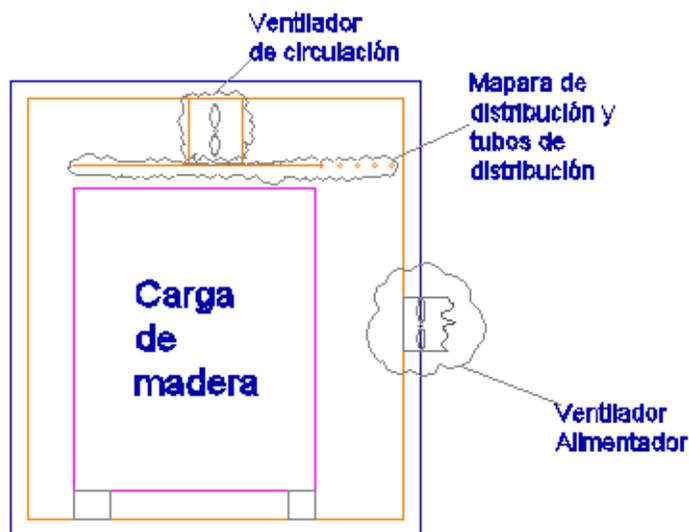
Figura 23. Ubicación del sistema de ventilación en la cámara de secado

#### Cámara de secado

La cámara de secado es el lugar en donde la madera va a ser secada durante un tiempo. Este tiempo va a depender del grado de humedad que la madera posea en el momento de su ingreso. Se dice que con el horno, el proceso de secado de madera va disminuirse en un 75%, pues la madera puede llegar a tardar hasta 3 meses para llegar a la humedad requerida durante el secado al aire libre mientras que en la cámara de secado, esta es sometida a un proceso continuo de aire caliente, en el cual podemos llegar a bajar ese tiempo de secado a un total de 3 a 4 semanas. La función principal de la cámara de secado va a ser recircular el aire caliente que ingresa del colector solar. Dicha cámara debe ser monitoreada para mantener siempre una medida de temperatura promedio. Se van a colocar 5 puntos para monitorear la temperatura, los cuales van a estar opuesto a los ingresos de aire caliente. Además va a estar colocado en los centros de cada cámara un medidor de humedad relativa para controlar la humedad presente en la cámara. Ya que si supera una humedad relativa al 60%, las ventilas

inferiores deben de abrirse para liberar el aire frio al exterior y eliminar parte de la humedad presente en la cámara. Si esta humedad nunca es superada durante la operación las ventilas siempre deben abrirse en la mañana antes de empezar el proceso y en la tarde para liberar la humedad para dejar reposar la cámara durante la noche.

En la cámara de secado van a haber cinco ventiladores en su interior, alineados con los ventiladores alimentadores para generar el movimiento de aire dentro de la misma. Estos van a estar por arriba de una mampara para direccionar el aire caliente a través de la madera, mientras que al costado de la mampara arriba de la alimentación de aire caliente van a estar colocados unos tubos a lo largo de la cámara que van ayudar a que el aire recirculado sea bien distribuido sobre toda la carga de madera. La finalidad de la mampara es evitar vórtices de aire sobre la parte superior de la carga de madera



**Vista lateral de la cámara de secado**

 <p>INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA ESCUELA DE INGENIERIA ELECTROMECANICA</p>	ESCALA: 1:20	ACOTACIÓN: M
	DISEÑO: F. Bonilla	
	DIBUJO: F. Bonilla	
	SUPERVISOR: O. Monge	
PARTE: <i>Detalle de vista lateral de la cámara de secado</i>	SISTEMA	
PROYECTO: <i>Horno solar para secar madera</i>		

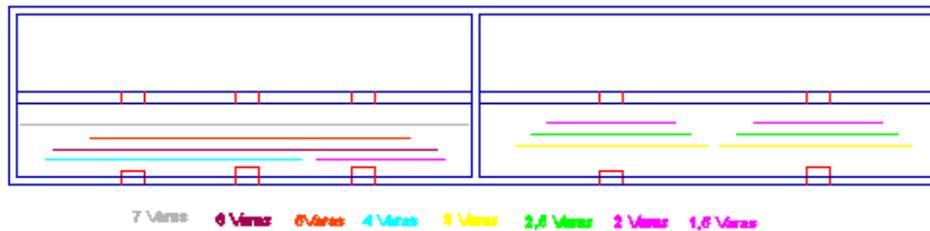
Fuente: CAD Elaboración propia

**Figura 24. Detalle Lateral de la cámara de secado**

El hecho de realizar un contenedor con dos cámaras de secado es para permitir la versatilidad de dimensiones de las piezas es decir, una cámara se va a

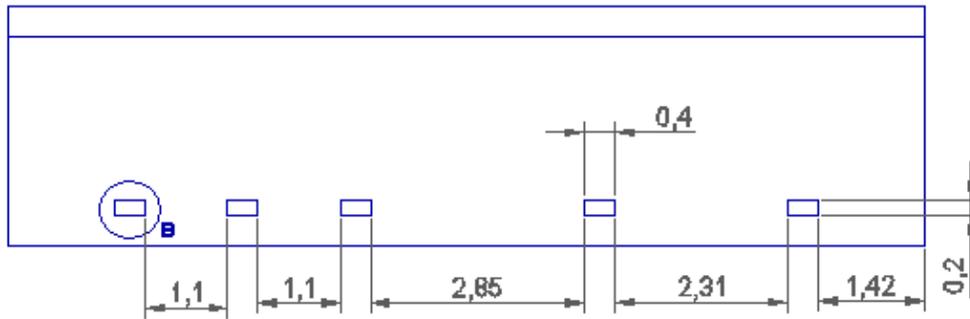
utilizar para piezas con una largo menor a 3 varas y la otra para largos entre 3.5 varas hasta 7 varas

Modulación de colocación de diferentes largo en las cámaras de secado

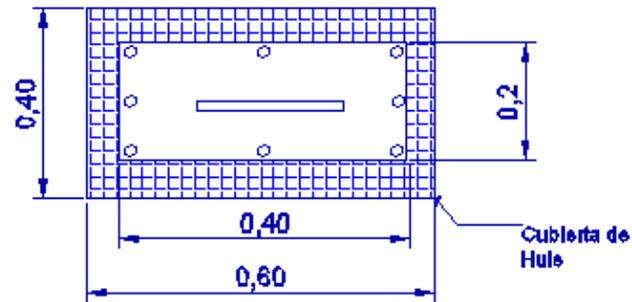


 INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA ESCUELA DE INGENIERIA ELECTROMECANICA	ESCALA: 1:20	ACOTACIÓN: M
	DISEÑO: F. Bonilla	
	DIBUJO: F. Bonilla	
	SUPERVISOR: O. Monge	
PARTE: <i>Modulación de cargas de madera</i>	SISTEMA	
PROYECTO: <i>Horno solar para secar madera</i>		

Fuente: CAD Elaboración propia  
Figura 25. Modulación de cargas de madera



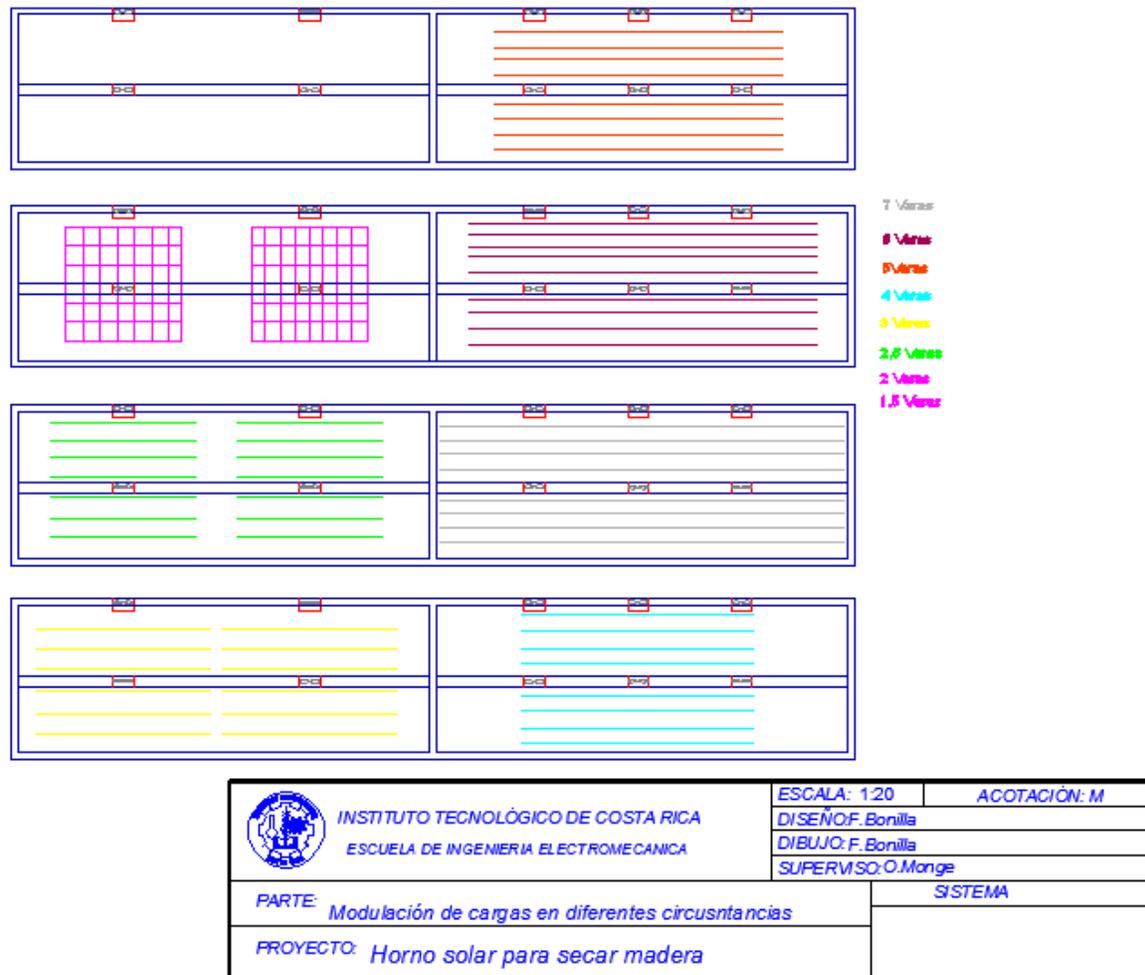
**Detalle de B**



 <p>INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA ESCUELA DE INGENIERIA ELECTROMECANICA</p>	ESCALA: 1:15	ACOTACIÓN: M
	DISEÑO: F. Bonilla	
	DIBUJO: F. Bonilla	
	SUPERVISOR: O. Monge	
PARTE: Vista Frontal de la cámara de secado y detalle de las ventilas	SISTEMA	
PROYECTO: <i>Horno solar para secar madera</i>		

Fuente: CAD Elaboración propia

Figura 26. Vista frontal de la cámara de secado y detalle de las ventilas



Fuente: CAD Elaboración propia  
**Figura 27. Modulación de cargas en diferentes circunstancias**

En cuanto a estas modulaciones, podemos determinar la capacidad de la cámara de secado. Por ejemplo, si utilizamos la forma de 2 varas de largo y 5 varas de largo, tenemos una capacidad de 5600 pulgadas madereras, si utilizamos la modulación de 3 varas de largo y 4 varas de largo, tenemos una capacidad de 4320 pulgadas madereras y si utilizamos la última modulación de 2.5 varas de largo y 4 varas de largo, podemos trabajar con 4170 pulgadas madereras. Si sacamos un promedio de estos obtiene que la capacidad promedio es de 4500 pulgadas madereras.

A continuación se procede a detallar el proceso constructivo de dicha cámara de secado

1. Se arma un esqueleto de madera dentro del contenedor para que contenga la espuma aislante y la lámina que va a suministrarnos la separación de la cámara con el ambiente exterior



Fuente: SketchUp Mariana Víquez Mora

Figura 28. Esqueleto de Madera, capa aislante y recubrimiento interno de metal

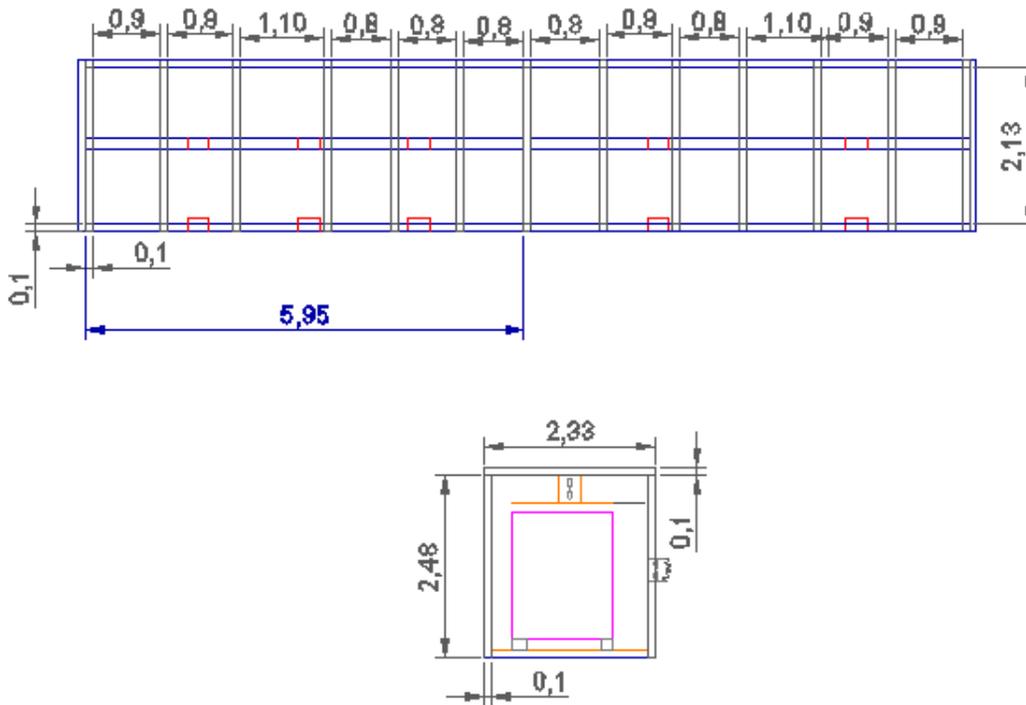
2. Se procede a separar el contenedor en las dos cámaras y se colocan los ventiladores para la circulación de aire



Fuente: SketchUp Mariana Víquez Mora

Figura 29. Interior de cámaras de secado

Seguido a esto, se detallan los planos constructivos de dicha cámara de secado



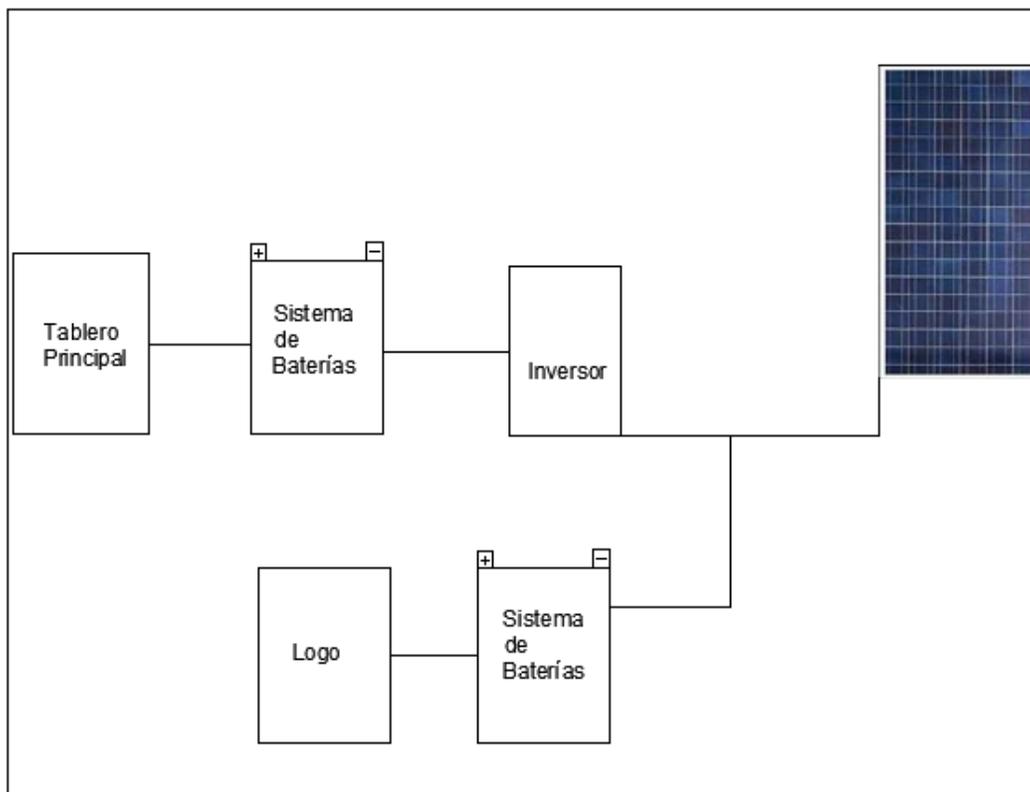
 <p>INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA ESCUELA DE INGENIERIA ELECTROMECHANICA</p>	ESCALA: 1:15	ACOTACIÓN: M
	DISEÑO: F. Bonilla	
	DIBUJO: F. Bonilla	
	SUPERVISOR: O. Monge	
PARTE: Esqueleto de Madera para la cámara de secado	SISTEMA	
PROYECTO: Horno solar para secar madera		

Fuente: CAD Elaboración propia

Figura 30. Esqueleto interior de la cámara de secado para colocar el recubrimiento

### Sistema eléctrico

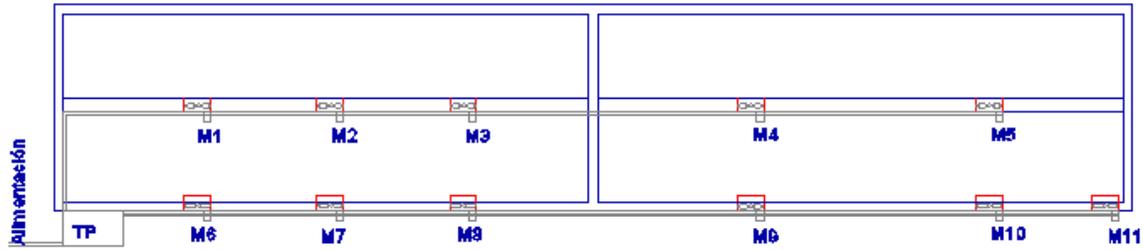
El sistema eléctrico va ser necesario para la alimentar los ventiladores en general. Para suplir dichas necesidades eléctricas, se van a utilizar 4 paneles solares con una capacidad de 300W, 1 inversor de al menos 400W, 16 baterías selladas 258A y 2 reguladores de carga de 60A -600V.



Fuente: CAD Elaboración propia  
Figura 31. Diagrama de conexión eléctrica

El sistema planteado de tipo off-grid el que actualmente permite trabajar la legislación de costarricense, es inviable ya que este a pesar de no ser una carga muy grande de 700W, tiene el problema de que debe funcionar continuamente durante 7 días a la semana, durante 8 horas diarias. Esto conlleva, que el sistema de baterías se hace muy grande y costoso, tanto que la rentabilidad del proyecto supera los 7 años y la renovación de las baterías se debe hacer a los 5 años. Por otro lado, no se pudo usar el otro escenario del sistema mixto ya que la empresa suministradora de electricidad Coopeguanacaste no está suscrita al convenio con el ICE para la instalación de paneles solares de poder vender el sobrante eléctrico o de disminuir la factura con el autoconsumo. Además, en el proceso que se encuentra la legislación costarricense no existen tarifas fijas sobras las cuales se pueda trabajar para sacar un costo y el retorno de la inversión con este tipo de proceso.

A continuación, se encuentran lo planos para las conexiones eléctricas de los motores al tablero principal.



	INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA ESCUELA DE INGENIERIA ELECTROMECA NICA	ESCALA: 1:20	ACOTACIÓN: M
		DISEÑO: F. Bonilla	
		DIBUJO: F. Bonilla	
		SUPERVISOR: O. Monge	
PARTE: Diagrama de conexión del tablero principal con los motores	SISTEMA		
PROYECTO: Horno solar para secar madera			

Fuente: CAD Elaboración propia

Figura 32. Diagrama de conexión entre el tablero principal y los motores

### Sistema alterno

En caso de no poder suplir la temperatura con el colector, por diferentes circunstancias, la opción es colocar una resistencia de 6000W a la salida del ventilador principal. Con esta resistencia podemos alcanzar una temperatura de hasta 100°C, y con el flujo del aire que va a correr por ella, la temperatura que va a impactar a la madera es de 40 a 50°C. Sin embargo el inconveniente es que esta requiere un consumo eléctrico continuo durante todo el proceso de secado, el cual, si lo mantenemos este sistema conectado a la red por un uso continuo de 8 horas de trabajo, consumiría 48000W diariamente y al mes el consumo es de 1344000W con un costo de KW de ₡ 90 colones en pico y un costo de 70KW en valle, tomando en cuenta el cargo por demanda de ₡ 9002 colones en valle y ₡12.200,00 en pico el gasto mensual es de ₡ 206.005,35.

## Capítulo 5 Análisis Financiero

Así como se presentó la funcionalidad de cada parte del horno se presentan a continuación los ejercicios de costo para cada sección.

Colector solar

A continuación, se presenta un cuadro resumen de costo construcción del colector solar

**Tabla 16. Costo total del colector solar**

Fuente: Elaboración propia

Actividad	Material	Especificaciones	Cantidad	Unidad	Costo Unitario	Costo unitario	Costo Total
Colector Solar	Vidrio	79x100cmx4mm	36	unidad	₡ 7.680,00		₡ 276.480,00
Colector Solar	Placa de Hierro	1,22x2,44mx3mm	10	unidad	₡ 32.684,92		₡ 326.849,20
Colector Solar	Pintura Anticorrosiva Negro Mate	Corrostop	2	galones	₡ 19.026,99		₡ 38.053,98
Colector solar	Fibra de Vidrio Lana	19,85m2	1	unidad	₡ 45.720,00		₡ 45.720,00
Colector Solar	Pieza de Madera	2x4" x 4 varas	28	und de 4 varas	₡ 903,82		₡ 101.227,84
Colector Solar	Lamina de Plywood	1,22x2,44m x 9mm	12	unidad	₡ 8.443,75		₡ 101.325,00
Colector Solar	Ventilador en línea	TD2000/315	1	unidad	₡ 670.674,00		₡ 670.674,00
Colector Solar	Lamina de Hierro	Calibre 26	7	unidad	₡ 21.855,00		₡ 152.985,00
Colector Solar	Perfil Z	e=3mm	4		₡ 3.150,00		₡ 12.600,00
Colector Solar	Loctite Superflex Transparente	Sellador	10	unidad	₡ 4.196,96		₡ 41.969,60
Flete	Tranporte de material	Do It Center	1	unidad	₡ 30.000,00		₡ 30.000,00
Flete	Tranporte de material	Metalco- Playa Danta	1	unidad	₡ 100.000,00		₡ 100.000,00
Fleta	Transporte de material	Vidrios la costa-Playa Danta	1	unidad	₡ 50.000,00		₡ 50.000,00
Flete	Tranporte de Contenedor	San José- Playa Danta	1	unidad	₡ 200.000,00		₡ 200.000,00
					Total sin impuestos	\$ 3.974,11	₡ 2.147.884,62
Tipo de Cambio	₡	540,47			Total con impuestos	\$ 4.490,74	₡ 2.427.109,62

Sistema de ventilación y cámara de secado

A continuación, se presenta un cuadro resumen del costo de esta sección

Tabla 17. Costo total del sistema de ventilación y cámara de secado

Fuente: Elaboración propia

Actividad	Material	Especificaciones	Cantidad	Unidad	Costo Unitario	Costo unitario	Costo Total
Secador	Contenedor	40 pies	1	unidad	₡ -	\$ 3.700,00	₡ 1.981.239,00
Secador	Alfajilla Melina	2 x 4 x 4 varas	37	unidad	₡ 903,82	\$ -	₡ 33.441,34
Secador	Rollo de Fibra de Vidrio	19,85 m2	5	unidad	₡ 45.720,00	\$ -	₡ 228.600,00
Secador	Lamina Galvanizada	calibre 26	16	unidad	₡ 21.855,00	\$ -	₡ 349.680,00
Secador	Sellador de Juntas	Duretan	10	unidad	₡ 4.207,37	\$ -	₡ 42.073,70
Secador	Tornillo Gypsum Punta Broca	3"	500	unidad	₡ 16,95	\$ -	₡ 8.475,00
Ventilación	Tubos Cuadrados de Hierro	25 x 25 x 0,95 mm	2	unidad	₡ 11.716,47	\$ -	₡ 23.432,94
Ventilación	Tubos de PVC 1/2"		6	unidad	₡ 1.917,59		₡ 11.505,54
Ventilación	Soldadura	E-6013	2	kilogramo	₡ 1.200,00	\$ -	₡ 2.400,00
Ventilación	Lamina	calibre 24	4	und de 4 varas	₡ 25.000,00	\$ -	₡ 100.000,00
Ventilación	Ventilador Principal		1	unidad	₡ 670.674,00		₡ 670.674,00
Ventilación	Ventilador en línea	TD350/125	5	unidad	₡ 196.025,25	\$ -	₡ 980.126,25
Ventilación	Ventiladores de pared		5	unidad	₡ 196.025,25	\$ -	₡ 980.126,25
					Total sin Impuestos	\$ 10.106,59	₡ 5.411.774,02
Tipo de Cambio	₡	535,47			Total con impuestos	\$ 11.420,44	₡ 6.115.304,64

Sistema Eléctrico

A continuación, se presenta un cuadro resumen del costo de dicha sección

**Tabla 18. Costo promedio del sistema eléctrico**

Fuente: Elaboración propia

Actividad	Material	Especificaciones	Cantidad	Unidad	Costo Unitario	Costo unitario	Costo Total	
Eléctrico	Cable #12 Verde		20	metros	₡ 214,00	\$ -	₡ 4.280,00	
Eléctrico	Cable #12 Rojo		20	metros	₡ 214,00	\$ -	₡ 4.280,00	
Eléctrico	cable #12 Blanco		20	metros	₡ 214,00		₡ 4.280,00	
Eléctrico	Tubo Conduit liviano UL 3/4"	PVC	4	unidades	₡ 1.557,59		₡ 6.230,36	
Electrico	Tablero de 20 espacios	UL Exterior	1	unidad	₡ 316.631,77		₡ 316.631,77	
Eléctrico	Breaker	2 polos/ 20 A	12	unidades	₡ 14.926,85		₡ 179.122,20	
Eléctrico	Uniones Counduit 3/4"	PVC	5	unidades	₡ 148,84		₡ 744,20	
Eléctrico	Codos counduit 3/4"	PVC	15	unidades	₡ 481,35		₡ 7.220,25	
Eléctrico	Panel solar de 300W		20	unidades		\$ -	₡ -	
Eléctrico	Inversor de 400W		2	unidades	₡ -		₡ -	
Electrico	Regulador de Carga 60A-600V		2	unidades				
Eléctrico	Baterías Selladas 258A		24	unidades	₡ -	\$ 50.000,00	₡26.773.500,00	
					Total sin Impuestos	\$ 50.976,32	₡27.296.288,78	₡ 522.788,78
Tipo de Cambio	₡ 535,47				Total con impuestos	\$ 57.603,24	₡30.844.806,32	₡ 590.751,32

Costo por mano de obra

Los cuadros presentados anteriormente representan un costo del material necesario para la obra, por lo que a continuación se procede a realizar un cuadro con los costos operativos de realizar la obra

**Tabla 19. Costo de mano de obra**  
Fuente: Elaboración propia

Presupuesto de mano de Obra				
Puesto	Cantidad de Personal	Precio por hora	Horas Laboradas	Costo Total
Operario	4	₡ 2.000,00	157,5	₡ 1.260.000,00
Ayudante	4	₡ 2.000,00	157,5	₡ 1.260.000,00
Electricista	1	₡ 2.500,00	157,5	₡ 393.750,00
Horas BackHoe	2	₡ 20.000,00	4	₡ 160.000,00
			Total	₡ 3.073.750,00
**Se presupuesta la elaboración arma en 15 días				

Con base en lo anterior, obtenemos resultado final y un precio de costo total para de ₡12.564.201,75. Para trabajar con un número más sencillo se trabajó con un monto de ₡15.000.000,00. Con base en esto establecido se procede a analizar todo en cuatro diferentes escenarios:

- 1) Gastos por garantías
- 2) Gastos por costo eléctrico
- 3) En caso de préstamos
- 4) Compra de madera ya seca

### Caso 1 Análisis de garantías

Esto implica colocar al jefe de poncheos a sacar dicha garantía, y a un número de ayudantes, en nuestro caso, el ejercicio se realizó con 2 ayudantes y este personal dedicó trabajo durante 2 bisemanas de trabajo, lo cual implica un total de 20 días, solamente en trabajos por defectos en las maderas de las casas ya construidas.

**Tabla 20. Costo mensual por garantías**

**Fuente: Elaboración propia**

Costo de arreglos mensual	
Jefe	₡ 400.000,00
Operador	₡ 200.000,00
Ayudante	₡ 180.000,00
Material de Acabado	₡ 100.000,00
72 pulg madereras	₡ 50.000,00
	₡ 930.000,00

Vemos que el costo mensual para mantener dichas personas al dar los servicios de garantías es de ₡ 930.000,00. Si se analiza dicho valor y se saca el periodo simple de recuperación (PRI) no da que es de 16.12 meses, un lapso menor a año y 4 meses, se realiza el pago total de la inversión del horno

### Caso 2. Análisis por consumo eléctricos

El análisis por consumo eléctrico es para demostrar el ahorro eléctrico que implica que nuestro horno sea solar. Entonces, si se toma una resistencia de 6KW (la cual es apropiada para lograr la temperatura de secado adecuado), sumado a los consumos de los ventiladores el cual es aproximadamente de 1.5KW, se obtiene un total de 7.5KW para mantenerlos funcionando, esto multiplicado por 8 horas de funcionamiento son 60KWh diarios. Como la facturación mensual que tenemos de 1800KWh, con la tarifa presente de electricidad para el sector de Guanacaste dada por Coopeguanacaste es de ₡ 90 colones por KWh en pico y un costo de ₡70 colones por KWh en valle, tomando en cuenta el cargo por demanda de ₡ 9002 colones en valle por KW y de ₡12.200,00 en pico por KW el gasto mensual es de ₡316.320,58 colones, al hacer el mismo análisis anterior tenemos que el periodo simple de recuperación es de 31.69 meses, esto quiere decir 3,6 años<sup>11</sup>

COOPEGUANACASTE R. L.		Estructura de Costos sin combustible	Rige del 1 abril 30 junio 2015
Servicio de Distribución		Tarifa	
T-RE Residencial	Primeros 200 kWh	61	62
	Por cada kWh adicional	86	87
<b>T-GE General</b>			
Menos de 3 000 kWh	Por cada kWh	90,0	91
Más de 3 000 kWh	Mínimo 10	84180	84 940
	Por cada kW adicional	8418	8 494
	Primeros 3000	171000	174 000
	Por cada kWh adicional	57	58
<b>T-MT Media tensión</b>			
CARGO POR ENERGÍA			
Periodo punta	Por cada kWh	75	76
Periodo valle	Por cada kWh	65	66
Periodo nocturno	Por cada kWh	58	59
CARGO POR POTENCIA			
Periodo punta	Por cada kW	3398	3 429
Periodo valle	Por cada kW	3398	3 429

Figura 33. Costo de KWh Coopeguanacaste  
Fuente: (Coopeguanacaste, 2015)

### Caso 3 Solicitando préstamo

En caso de no tener el dinero suficiente para realizar esto, se debe acudir a una entidad financiera para obtener el capital necesario para poder realizar el proyecto, Este se podría realizar con cualquier entidad financiera en un lapso de 6 años con un interés fijo de 13% y, con una cuota mensual de pago de ₡301.111,58 mensuales. Este escenario debe ser analizado con respecto a los casos 1 y 2, los cuales van a generar ahorro en la empresa. En relación el caso 1 eliminando los casos de poncheo durante 1 años se obtiene el dinero suficiente para hacer el pago de las cuotas del préstamo, mientras que para el caso 2 se tardaría 4.1 años para saldar el préstamo.

### Caso 4 Secado exterior

Esta la opción de comprar la madera ya seca, por medio de un horno externo al proyecto y cual venda sus servicios de secado de la madera utilizada. El costo de la pulgada maderera de Melina seca es de ₡1.300 más el transporte, podemos decir que la pulgada sale en aproximadamente ₡1.500. Si la empresa gasta en promedio unas 4000 pulgadas de Melina el costo de secar las mismas es de ₡6.000.000. Por lo tanto si los gastos de inversión del horno es de ₡10.000.000 entonces el retorno de inversión sería en menos de tres tanda de secado de madera, ya que la capacidad promedio del horno es de 4500 pulgadas madereras.

## Capítulo 6 Finalización

### Limitaciones

- No se logró obtener un dato concreto de la irradiación solar en el punto de instalación del horno.
- No se tomó en cuenta la humedad relativa en los cálculos.
- En el sitio no se pudieron tomar los datos de temperatura sobre una placa de metal.
- En el sitio no se pudo determinar la temperatura del vidrio expuesto a la radiación solar.
- El estado de la legislación relacionado con el tema de energía solar que no está definido de manera concreta, ni tampoco con la forma de interconectar sistemas a la red y vender excedentes

### Conclusiones

- Se crea un colector solar con el tamaño suficiente para aumentar la temperatura del aire ambiente necesario para el secado.
- Se diseñó el sistema alterno con resistencias eléctricas en caso de no contar con la suficiente irradiación solar o si se está en tiempo de invierno.
- Aplicar la movilidad de un contenedor con la creación de dos cámaras para el secado de diferentes tamaños de madera.
- Se evaluó el costo total del proyecto con respecto a los gastos para dar un criterio de factibilidad.
- Se examina el sistema de automatización como una mejora a un arranque inicial del proyecto de un horno básico cien por ciento manual.
- Se identificó que un secado natural siempre es necesario como antefase de un proceso de secado artificial de la madera.
- Se identificó la capacidad máxima de secado del Horno y se cuantifica con las necesidades de Alfa Company.

## Bibliografía

- Adriana Lammardo, M. B. (Diciembre de 2010). Modelo matemático del comportamiento térmico de un colector solar de placas planas inclinadas para el calentamiento de aire. *Revista de Ingeniería UC/ Universidad* , 19-27.
- Cengel, Y. A. (Tercera Edición). *Transferencia de calor y masa, un enfoque práctico*. México: Mc-Graw-Hill.
- Coopeguanacaste, R. (15 de Abril de 2015). *Coopeguanacaste, R.L.* Obtenido de Coopeguanacaste, R.L:  
<http://www.coopeguanacaste.com/es/servicios/facturacion-de-energia/tarifas-aresef>
- Cynthia Salas Garita, R. M. (2008). Diseño y Construcción de un secador solar para madera. (E. d. Tecnológico de Costa Rica, Ed.) *Kurú*, 1-23.
- Eduardo Sibaja Arias, D. P. (1985). *Colectores Solares*. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Greenheck. (2009). *Sidewall propellers Fans belt and direct driven*. Estados Unidos: Greenheck.
- Johnson, A. A. (1998). *Secado de la madera*. Antioquia: Servicio Nacional de Aprendizaje SENA.
- Juan Ignacio Fernandez-Golfín Seco, H. A. (1998). *Manual de secado de maderas*. Gráficas Palermo.
- ONF, O. N. (2013). Usos y Aporrtes de la Madera en Costa Rica . *Usos y Aporrtes de la Madera en Costa Rica* , 1-33.

## Capítulo 7 Apéndices

### Manual de Operación

Pasos a seguir para la buena operación del horno y su proceso de secado:

#### Primer Carga

- Se debe cargar la cámara de secado con un tipo de madera de manera uniforme para el secado de la misma
- Se debe dejar al menos 2 horas de irradiación solar sobre la placa para con esto tener una temperatura más uniforme sobre el secado
- Se recomienda iniciar el proceso de secado a eso de las 9am, donde ya hay suficiente irradiación solar para mantener el calor en la placa
- Las ventilas deben de estar debidamente cerradas
- Aprovechar dicha radiación solar hasta las 5pm, una vez llegado a esta hora revisar los medidores de humedad si la misma es mayor a 60% se deben de abrir la ventilas por un tiempo de aproximadamente 30 minutos
- Una vez terminado este proceso de apertura de las ventilas se deben cerrar las mismas y mantener el proceso de hermetismo en la cámara para mantenerla con la temperatura más alta posible
- Al otro día se debe iniciar el proceso pero 30min antes de iniciar se debe verificar el dato de la humedad relativa si es mayor a 60% se deben abrir de nuevo las ventilas por ese espacio de tiempo
- Iniciar el proceso de secado repitiendo los pasos anteriores
- Esto se debe repetir durante 15 días ya que al día 15 la carga de madera se le debe dar su debida rotación en el acomodo en la cámara evitar torceduras en la misma, aprovechando este proceso se le debe medir el dato de humedad presente a varias tablas al azar esto para tener un control del descenso de la presencia de humedad en la madera
- Una vez hecha esta rotación se aplican los mismos pasos anteriores

#### Recomendaciones de Mantenimiento

Limpieza diaria de los vidrio esto para mantener un 100 % las características del vidrio y no disminuir la eficiencia del horno

Fotografías recopiladas en temas de garantías por desperfectos en la madera y con alto grado de humedad





## Capítulo 8 Anexos

### **Datos del Estudiante**

Fabián Bonilla Cárdenas

402100301

200949430

100m sur de la entrada principal del TEC, Cartago

Urbanización Jardines de Roma, Casa 8B, Santiago, San Josecito, Heredia

88912124

### **Información del Proyecto:**

Horno solar para secado de madera

Oscar Monge Ruíz

De Lunes a Viernes de 7:00am a 5:30pm

### **Información de la Empresa:**

Constructora Alfa Company

Construcción

Playa Danta, Tempate, Santa Cruz, Guanacaste

2654-4463

Desarrolladora de Proyectos

## Capítulo 9 Glosario

### Glosario

- Vara: medida de longitud equivalente a 835.9mm
- Poncheo: Termino utilizado en la construcción para la persona encargada
- Pulgadas Madereras: es el equivalente de compra para las madera ya que no se hace por piezas, estas pulgadas madereras se obtiene con la siguiente formula:

$$\text{Pulgada Maderera} = \frac{\text{Ancho} \times \text{Largo} \times \text{Longitud (varas)}}{4}$$

- Madera Rolliza: se llama madera rolliza la troza de sección circular que queda cuando el árbol se tala y se trocea.
- Veta: Es la cara más gruesa de una pieza de madera y va paralelo al crecimiento vertical del árbol
- Canto: Borde lateral de una pieza de madera aserrada
- Testa: es la parte de una pieza de madera que es paralela al crecimiento horizontal de un árbol
- Ponchador: Persona encargada de ver, eliminar y ejecutar cualquier tipo de trabajos por garantía o finalización en los proyectos constructivos ( adscritas al ponchador, esta su cuadrilla de Poncheo)