

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE ELECTROTECNIA Y COMPUTACIÓN
DEPARTAMENTO DE ELECTRICA**



**Tesis Monográfica para optar al Título de
Ingeniero Eléctrico**

Título

**Horno secador de madera con tecnología económica y amigable
con el medio ambiente, que funcione de acuerdo a las
necesidades y requerimientos del Programa Institucional de
Madera (PIMA)**

Autores:

Br. Arévalo Villalta, Enrique José

Tutor:

Zúñiga Guillen, Jhader Exequiel

Managua, 2015

Resumen

La idea del presente informe nace como una iniciativa por parte del Programa Institucional de la Madera (PIMA) de realizar un trabajo de titulación, con el cual se realice un proyecto de investigación; que conlleva a solucionar la necesidad actual del Programa de potenciar la calidad de sus productos.

El Presente documento se elaboro utilizando como referencia el Horno de secado solar existente en las Instalaciones del técnico de costa rica ubicado en Cartago al cual se realizo visitas técnicas en busca de un posible convenio de cooperación e intercambio de información; dicho informe servirá, para la elaboración de un prototipo en las instalaciones del Programa Institucional de la madera con fines experimentales, este documento está estructurado por V capítulos en los cuales se desarrolla los diferentes objetivos del estudio propuesto; la información con la que cuenta cada capítulo es la siguiente:

Capitulo 1: Se plantea el aprovechamiento de la energía solar Térmica., Fotovoltaica. Además de explicar el Principios del secado de la madera y tipos de hornos solares Se menciona la clasificación de los diferentes tipos de hornos de acuerdo la a técnica operacional, Hornos continuos (progresivos), Clasificación de acuerdo a su temperatura Y finalizando por la Clasificación respecto a la fuente energética.

Capitulo 2: se menciona el principio de funcionamiento del horno solar además de la función del efecto invernadero se estudian los diferentes tipos de radiación solar que sufre ciertas transformaciones al incidir sobre la atmósfera. Igualmente se aclara la forma de calentamiento solar. tales como Calor latente de vaporización y se finaliza analizando las características y propiedades de la madera; así como la relación entre el agua y la madera entre otras características.

Capitulo 3: se examino La determinación de la transferencia de calor, Conducción, Convección y Radiación además Se analizara diferentes aislantes térmicos (Lana de Vidrio, Espuma de Poliuretano, Poliestireno y Lana Mineral) en base a sus propiedades de conductividad térmica, densidad, su temperatura de operación,

haciendo comparaciones entre ellos para determinar el aislante óptimo para el horno de secado.

Capitulo 4: se evaluaron los Factores que afectan la pérdida de humedad relacionados con la estructura de la madera (Albura y Duramen, Anillos de Crecimientos, Radios, Grano y Textura, color, se analizan los Factores que afectan la pérdida de humedad relacionados con las variables del proceso se determinan la Selección de Muestras para el control del secado manual para la Determinación del Contenido de Humedad y del Peso Seco al Horno de las Muestras y el Uso de las Muestras Testigo Durante el Secado

Capitulo 5: se presentan los aspectos más importantes que deben ser considerados en la construcción de un secador solar para madera aserrada. Se detallan aspectos de diseño de cimientos, paredes, puertas, techo, colector, equipamiento y una recomendación de los materiales por utilizar. Se incluye un prototipo de secadora solar, que ha sido construido por la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica en Cartago. Como parte del paquete tecnológico se han incluido planos y vistas de la construcción así como el detalle de los costos de construcción, que para este modelo es de US \$7223.3

Planteamiento del problema

Un eslabón fundamental en la cadena productiva del sector Madera-mueble es el secado. Sin un buen proceso de secado, la calidad de la madera puede verse muy deteriorada, ya que se acrecientan fuertemente las posibilidades de la aparición de grietas o curvaturas. Este proceso suele realizarse en cámaras especiales a tal fin el avance experimentado por la industria de fabricación de secaderos permite disponer de técnicas y tecnologías que han optimizado el rendimiento energético y la capacidad de las cámaras de secado. Por otra parte, la introducción de sistemas y de programas informáticos en el control de los secaderos, posibilita la conducción del secado de forma “automática” con una importante reducción del tiempo destinado a su supervisión. En la actualidad hay un serio problema de falta de secaderos en las regiones productoras de esta materia prima. La cantidad de madera a secar supera ampliamente la capacidad de secado de la industria. A causa de esta situación, gran parte de la producción debe ser secada por métodos artesanales (generalmente a la intemperie), generándose un doble problema: por un lado, una pérdida de eficiencia por los mayores tiempos que se destina al secado artesanal y, por el otro, una menor calidad de la madera obtenida.

Por ende, la ausencia de capacidades para el secado industrial en Nicaragua, implica que muchos pymes y carpinteros artesanos en el interior del país trabajen con madera de baja calidad y que un gran porcentaje de la madera exportada fuera del país, esté muy poco valorizada.

Introducción

El programa institucional de la madera (PIMA) es un programa formado y desarrollado por la universidad nacional de ingeniería, para la investigación innovación y desarrollo tecnológico de la industrialización de la madera, el cual se consolida como una instancia pionera en la industria de la formación tecnológica de la madera en Nicaragua y mejoras en el uso y transformación de la madera, ofreciendo servicios de alto nivel; así como agregación de valor a la cadena productiva del recurso maderable; obtener un producto de calidad es uno de los desafíos para el PIMA, ya que la madera presenta defectos si esta no está tratada adecuadamente.

La actividad maderera en el país es de gran importancia. Es por eso que los procesos que están involucrados en esta actividad son primordiales a la hora de entregar un producto con una buena calidad, y es aquí donde entra el proceso de secado de la madera; Por otra parte la demanda de este producto requiere de un secado en forma artificial, debido a que mediante a este proceso se logra reducir el tiempo en que se logran las condiciones optimas de la madera, obteniendo la humedad requerida y evitando defectos por grietas, colapso, deformaciones, entre otras. El secado de madera es un proceso muy necesario para la trabajabilidad de la madera, ya que si en ella hay presencia de humedad las dimensiones tienden a cambiar y con esto la precisión de las piezas también.

El proceso de secado artificial, consiste en que el aire que está en el interior de la cámara, es calentado y obligado a circular por medio de ventiladores, para que así este pase a través de la pila de madera absorbiendo la humedad de esta. El aire una vez que se encuentre saturado de agua, debe ser extraído de la cámara, para introducir aire fresco con menor humedad y continuar con el proceso.

Debido a la necesidad de este proceso en el sector madera, nace la iniciativa de realizar un trabajo de titulación; en el cual se debe realizar un proyecto de investigación, en donde se requiere secar una cantidad de madera desde un contenido de humedad inicial hasta uno final, previamente establecidos en un determinado periodo. Además se deben controlar las variables involucradas en este proceso.

Para la realización de este proyecto es necesario hacer un estudio previo de las especies maderables a intervenir. Por otro lado es necesario definir los parámetros del proyecto, para luego poder realizar un cálculo de los requerimientos que debiese tener, y así poder seleccionar equipos, que permitan su funcionamiento adecuado.

Objetivos

Objetivo general

- Diseñar prototipo de horno secador de madera con tecnología económica y amigable con el medio ambiente, que funcione de acuerdo a las necesidades y requerimientos del programa institucional de madera (PIMA).

Objetivos específicos

- Plantear el aprovechamiento de la energía solar térmica y su aplicación en el secado de la madera realizando un estudio de los diferentes tipos de hornos más representativos que se han construido para el secado de madera a nivel mundial y local.
- Analizar el principio de funcionamiento de los diferentes hornos de secado solar, además de la función del efecto invernadero así como reacción del agua y la madera.
- Evaluar los diferentes aislantes térmicos en base a sus propiedades de conductividad térmica, densidad, su temperatura de operación, haciendo comparaciones entre ellos para determinar el aislante óptimo para el horno de secado.
- Analizar los Factores y variables que afectan la pérdida de humedad relacionados con la estructura de la madera
- Realizar propuesta en el diseño del prototipo de horno de secado de madera con su equipamiento y estructura más adecuado según los requerimientos del taller escuela PIMA.

Antecedente

Desde luego existen otros métodos alternativos intermedios entre el secado al aire y secado en estufa industrial. Tales como los pre secadores (Anaya 1988) el secado al aire bajo cubierta y las estufas con des humidificadores también se han manejado en menor grado el método de secado a presión; el de alta frecuencia y el secado por medio de vacío Sin embargo una de las diversas alternativas viables en el secado por medio de energía solar, que se ha venido desarrollando desde 1960 (Maldonado y peck, 1967). La estufa solar funciona bajo el principio de evaporación del agua contenida en la madera utilizando como fuente de calor la energía proveniente del sol (Magaña, 1990) la cual es colectada y transferida mediante dispositivos de captación, comúnmente llamados colectores solares y que según el diseño utilizado, proporcionan calor por algún medio que generalmente es el aire posteriormente. El aire cargado de energía térmica se hace circular de manera natural o forzada a través de los materiales o elementos a los que se les quiere disminuir la cantidad de agua que poseen.

La mayoría de las estufas solares han sido construidas como prototipos experimentales en los últimos cuarenta años y se han utilizado eficientemente para el secado de productos agrícolas y forestales, así como para algunos productos perecederos (Rodríguez 1989). También existen sistemas de calentamiento de agua cuyo funcionamiento está basado en la captación de energía solar. Este proceso de secado de madera intervienen tres factores principales que de una u otra forma regulan la velocidad de secado: la temperatura, la humedad relativa (HR) y la velocidad de circulación del aire. Estos tres factores, combinados adecuadamente entre sí, impiden la aparición de defectos en las piezas de madera, durante y al final del secado.

El secado de la madera constituye una fase crítica de su proceso de industrialización, ya que según el método de secado que se utilice, puede disponerse de ella en menor o en mayor tiempo. En efecto aunque el método de secado al aire requiere de una inversión inicial mínima (espacios o patios de secado). Lo cierto es que el proceso es lento y no permite una disponibilidad oportuna y rápida de madera seca, además de que con este método no se puede obtener un CH cercano al 18%, en virtud de que su efectividad depende de las condiciones climatológicas imperantes en el lugar de que se trate.

También se tiene el proceso de secado en estufa industrial, las cuales pueden ser de dos tipos las progresivas y las de compartimiento, siendo estas últimas las que más se utilizan. En este proceso la inversión inicial es alta y muchos aserraderos no tienen la capacidad económica suficiente para adquirirlas.

Justificación

La madera recién cortada contiene una gran cantidad de agua. Si el agua no es extraída, la madera no puede ser usada para producir un producto derivado de buena calidad. Cuando la madera esta secada apropiadamente se vende aun precio mayor y es mucho más fácil trabajar la que madera húmeda. Cuando la madera es secada correctamente mecaniza mejor, pega mejor, y tiene mejor acabado. El secado también mejora la resistencia de la madera, mata infestaciones, endurece la savia de la madera, preserva el color, reduce el peso y controla el encogimiento. Cuando la madera no es secada bajo condiciones controladas es susceptible a fisuras, manchas, y otras degradaciones que rebajan su precio de venta y su viabilidad de ser trabajada.

Actualmente el programa institucional de la madera (PIMA) seca su madera prima al aire libre (viento natural y sol); El cual depende estrictamente del clima, que puede secarla demasiado rápida causando daños, o secarla demasiado lenta, igualmente causando pérdidas. Para la manufacturación de productos derivados como muebles se requiere que la madera tenga un contenido de humedad de 6–8%; y generalmente el secado al aire no es suficiente para alcanzar este porcentaje. El secado al aire a menudo es utilizado como un primer paso, para después colocar la madera en un horno para el secado de final. El secado al aire conlleva serios problemas con daños y degradaciones y justamente debido a esto resulta serla manera más cara de secar debido a las pérdidas y degradaciones.

EL secado controlado en horno, especialmente cuando se seca maderas verdes, reduce o elimina las rajaduras o grietas mediante el acondicionamiento. Cuando la madera es secada al aire, donde no hay control sobre el proceso de secado, entonces el clima puede fácilmente causar rajaduras y grietas que resultarán en perdidas.

Cuando la madera no ha sido secada a los porcentajes adecuados, siempre estará tratando de entrar en equilibrio con el ambiente, entonces su contenido de humedad variara algo después de haber sido secada. En climas secos, la madera cede humedad, hasta que esté en armonía con el aire seco. En climas húmedos la madera absorbe humedad hasta que esté en armonía con el aire húmedo. La madera se expande cuando absorbe humedad, y se contrae cuando vota humedad.

Es por esto que se estudiara la propuesta de diseño y construcción de un ornó solar que logre satisfacer las necesidades del secado, para la materia prima (madera), que actualmente requiere el PIMA para el mejoramiento de la calidad de sus productos.

Capítulo I: Aprovechamiento de la energía solar.

1 Aprovechamiento de la energía solar.

La radiación solar se puede aprovechar de tres distintas maneras:

Directa. Una de las aplicaciones de la energía solar es directamente como luz solar, por ejemplo, para la iluminación de recintos. En este sentido, cualquier ventana es un colector solar. Otra aplicación directa, muy común, es el secado de ropa y algunos productos en procesos de producción con tecnología simple.

1.1 Térmica.

Se denomina "térmica" la energía solar cuyo aprovechamiento se logra por medio del calentamiento de algún medio. La climatización de viviendas, calefacción, refrigeración, secado, etc., son aplicaciones térmicas.

1.1.1Fotovoltaica.

Se llama "fotovoltaica" la energía solar aprovechada por medio de celdas fotoeléctricas, capaces de convertir la luz en un potencial eléctrico, sin pasar por un efecto térmico.

1.1.2Secado solar.

Muchos productos agrícolas requieren un secado post-cosecha para su adecuada conservación hasta que llegan a los centros de consumo. Aún en el caso de los productos que se comercializan en forma fresca, el secado ofrece una alternativa al agricultor cuando existen problemas de transporte o se producen bajas de precio por sobreproducción. En las regiones industrializadas el bajo costo del combustible permitió hace varias décadas el desarrollo de procesos de secado artificial en gran escala basados en el uso de combustibles. En los últimos años, la escasez y mayores precios de los combustibles ha despertado un nuevo interés en el secado basado en el uso de la energía solar, tratando de desarrollar diversas técnicas que permiten solucionar los problemas mencionados en relación al secado al aire libre.

1.1.3 Principios del secado de la madera

La tecnología del secado, estudia el procedimiento de sacar el agua de la madera, de forma de obtener un producto sin defectos ni alteraciones que disminuyan su valor y que puedan seguir transformándose sin causar problemas derivados del secado. Por tal motivo el hombre con el propósito de mejorar las condiciones con las que la madera obtenga las características apropiadas para su utilización y comercialización, ha llevado a la tarea de estudiar la manera de cómo acelerar su proceso de secado y el mejoramiento de la madera

Con el paso del tiempo se ha avanzado en el estudio de diversas formas de secado como es el sacado en hornos. Algunos de los problemas son: llegar a una temperatura óptima de secado, que la temperatura se conservara durante un periodo de tiempo prolongado. Pero una de las grandes problemáticas fue, que nos ayudaría a conservar ese calor generado, para ello se han creado cámaras de secado de diversos materiales que tienen la propiedad de no permitir la fuga de calor, estos son los materiales aislantes térmicos, cuya propiedad es la conductividad térmica y que de acuerdo a cada material cambia como es el caso de los metales con una conductividad muy alta que en comparación de los materiales cerámicos su conductividad es muy baja.

La tecnología ha ayudado en la creación y utilización de materiales aislantes sintéticos como el poliestireno con una conductividad térmica muy baja al igual que el poliuretano y otros materiales sintéticos.

1.2 tipos de hornos solares

En la industria del secado de madera se ha llegado a la creación de distintas formas de secar la madera, para esto se han diseñado distintos tipos de secadores solares que tiene como función principal el mejorar las condiciones de secado y reducir el tiempo de este proceso. Los distintos tipos de hornos se clasifican de acuerdo a su técnica operacional y a su temperatura.

1.2.1 Clasificación de acuerdo a técnica operacional. Hornos continuos (progresivos)

Este tipo de hornos se usan en procesos continuos de grandes volúmenes de producción. Consisten en un largo túnel por el que circulan los paquetes de madera y se caracterizan porque entra por un extremo del horno en estado verde y es movida a través de el hasta salir por el otro extremo del horno, con el contenido de humedad final requerido.

A medida que la madera avanza por el túnel, el clima dentro del horno es controlado para proporcionar una atmósfera progresivamente más caliente y con menor humedad, de acuerdo con el programa de secado.

Hornos de compartimientos

Este tipo de hornos es el más usado. Consiste en una capa hermética en la que se introduce la carga de madera encastillada de forma descrita para el secado en horno. Al contrario de los hornos continuos la madera permanece inmóvil. Las condiciones ambientales son homogéneas en la totalidad de la cámara, son cambiadas y reguladas según el programa establecido para el procedimiento a medida que avanza el proceso.

El horno consta de un sistema de circulación de aire por ventiladores que permiten una velocidad de 2 m/s. también existen hornos de compartimiento de circulación natural pero son menos comunes.

La calefacción de estos hornos es mediante una batería de radiadores constituidas por tubos con aletas, recorridos por un fluido térmico. La humedad relativa se controla por deshumificadores, además por la apertura y cierre de ventilas.

Dentro de los hornos de compartimiento se pueden distinguir dos tipos, según el modo de cargado, los convencionales y los de paquete.

Hornos convencionales:

Este tipo de hornos consta de rieles sobre los que se disponen las pilas de madera. Luego de ser puestas sobre ellos son movidas hasta el interior de la cámara de secado. Terminado este la madera es sacada de la cámara de igual forma.

Hornos de paquete:

En este tipo de hornos, la madera es cargada directamente dentro de él, ya sea por grúas, montacargas u otro medio. terminado el secado la madera es sacada de la cámara de igual forma.

1.2.2 Clasificación de acuerdo a su temperatura

Hornos de baja temperatura

El secado en hornos a baja temperatura se realiza en cámaras cerradas, en las que las condiciones ambientales son reguladas y permanecen constantes durante toda la operación. La madera se encastilla según los procedimientos descritos para el secado de madera en hornos. Este tipo de horno funciona a un máximo de 45 °C, siendo 25 y 30 °C los valores de temperatura más usados, la energía que se requiere se puede obtener de fuentes naturales o artificiales.

El sistema de calefacción más usado es el de tuberías de agua caliente o vapor a baja presión. El aire es forzado a pasar por las pilas de madera con ventiladores

Hornos de temperatura normal o tradicional

Estos hornos son ampliamente utilizados. Constan de un sistema de ventilación, calefacción y humificación para regular las condiciones dentro de la cámara. El método de secado consiste en impulsar el aire con los ventiladores para que atraviesen el sistema de calefacción y humificación, para que luego pase por las pilas de madera. A medida que el aire circula va transmitiendo calor a éstas y recogiendo humedad de la superficie de las piezas. Por lo tanto, a la salida de las pilas el aire está más frío y húmedo que a la entrada. Cuando el aire sale de las pilas de madera es absorbido por los ventiladores para seguir el ciclo.

Dentro del grupo de los secadores que funcionan con temperaturas normales podemos encontrar a los secadores progresivos y los de compartimiento.

Hornos de altas temperaturas (mayor a los 100 °C)

El secado a alta temperatura es un método menos usado que el anteriormente mencionado. Su característica principal de estos hornos es el corto tiempo de operación que se logra.

El principio de funcionamiento de estos hornos consiste en precalentar la madera con una temperatura de bulbo húmedo lo más cerca posible a los 100 °C; cuando toda la madera se ha nivelado en esta condición, se incrementa rápidamente la temperatura del bulbo seco, cuyo máximo dependerá de las características de la madera que se está secando.

Debido a las severas condiciones que la estructura de la cámara debe soportar, los materiales con los que se construyen deben ser resistentes a la corrosión, deben tener un alto grado de aislamiento para no desperdiciar energía en compensar las excesivas pérdidas de calor. Los requerimientos de calor son grandes, del orden de los 30,000 Kcal./hora por cada metro cúbico de capacidad útil de la cámara.

1.2.3 Clasificación respecto a la fuente energética

El secado de la madera requiere de energía para ser realizado. Ésta se puede obtener de diferentes fuentes, ya sean naturales o artificiales. Su elección se realizará, principalmente de acuerdo a las necesidades del proceso y a los recursos disponibles. Por lo general, se busca una fuente de energía que resulte económica, que entregue la cantidad de energía necesaria para realizar el proceso de secado en el tiempo y en las condiciones óptimas determinadas para cada caso en particular, que sea lo menos contaminante posible, que esté disponible y que no tenga dificultades de abastecimiento.

Energía por combustión (hornos de baja, media y alta temperatura).

El conseguir la energía necesaria para calentar la cámara de secado por medio de la combustión de algún material, tiene como requisito usar la caldera. El material combustible, que por lo general es madera, desechos de corteza, despuntes, etc. El calor que se genera es el que se transmite a algún líquido que puede ser agua, aceite o vapor de agua, que va a la cámara de secado, a través de tuberías para transmitir su calor al aire que pasa por los intercambiadores de calor existentes.

También existe la posibilidad de transmitir el calor en forma directa a la cámara de secado, haciendo pasar directamente los humos resultantes de la combustión a la cámara, calentando así la atmósfera del secador.

La energía por combustión es el método más ampliamente usado, ya que permite usar los desechos de la industria como combustible, lo que significa un importante ahorro.

La capacidad de la caldera se deberá determinar de acuerdo a los requerimientos energéticos, que son volumen de madera a secar, pérdidas de calor a través de las ventilas, paredes, entre otros, la cantidad de agua que se deba evaporar. Una caldera puede generar calor para más de una cámara de secado, con lo que se puede optimizar la utilización de la capacidad de esta fuente energética.

Energía eléctrica (hornos de radio frecuencia)

En el secado tradicional, esta energía se utiliza, solo para alimentar el sistema de ventilación y en el secado por radio frecuencia lo hace para calefaccionar la cámara. El principio de estos secadores consiste en poner la madera en un campo eléctrico formado por dos o más electrodos de metal lo que causa una rápida aceleración de las moléculas en la madera, elevando su temperatura.

Energía solar

El utilizar la energía solar para secado de madera es un método muy económico. El diseño de los hornos solares debe estar pensado con el fin de poder captar la mayor cantidad de energía solar, por lo que generalmente se diseñan con una inclinación que permite que los rayos solares incidan en el techo del horno en un ángulo de 90°.

En el secado solar, la radiación de onda corta penetra la cubierta transparente, la que puede ser de vidrio o plástico, para llegar a la lámina absorbente, la que aumenta su temperatura y transmite el calor a la atmósfera dentro del horno, donde queda atrapado.

Existen pérdidas de calor por la absorción del vidrio y de las paredes del secador, las que aumentan a medida que aumenta la velocidad del viento dentro de la cámara. Se pueden aminorar las pérdidas con la utilización de vidrios dobles; también poniendo ventiladores dentro del horno y recuperando el calor de los ductos de salida de aire. Además, se debe considerar una buena aislación, la que se puede hacer con lana de fibra de vidrio, paredes sólidas de ladrillo con aislamiento por espacio de aire o con espuma, dentro de los métodos más usados.

Capítulo II: principio de funcionamiento del horno solar

2.1 Energía solar

Las tecnologías de aprovechamiento de la energía solar, se desarrollaron en gran medida durante la crisis del petróleo a mediados de la década de los 70', aunque los conceptos básicos se conocían desde mucho antes. Específicamente, lo que concierne al secado solar, tiene relación con dos interesantes fenómenos físicos: el fenómeno del cuerpo negro y el efecto invernadero. El primero consiste en que si sobre un cuerpo pintado de negro, se hace incidir un haz luminoso, después de que se corta la fuente de luz, el cuerpo negro en forma espontánea, emite cierta energía (en forma de calor).

La constante solar

La intensidad de la radiación solar en el borde exterior de la atmósfera, si se considera que la Tierra está a su distancia promedio del Sol, se llama constante solar, y su valor medio es 1.37×10^6 erg/s/cm², o unas 2 cal/min/cm². Sin embargo, esta cantidad no es constante, ya que parece ser que varía un 0,2% en un periodo de 30 años. La intensidad de energía real disponible en la superficie terrestre es menor que la constante solar debido a la Absorción y a la dispersión de la radiación que origina la interacción de los fotones con la atmósfera.

La intensidad de energía solar disponible en un punto determinado de la Tierra depende, de forma complicada pero predecible, del día del año, de la hora y de la latitud. Además, la cantidad de energía solar que puede recogerse depende de la orientación del dispositivo receptor.

2.2 El efecto invernadero

El efecto invernadero, también se conoce desde la antigüedad, consiste en que en una caseta de vidrio, la temperatura interior es mayor que la exterior. Esto se explica por el fenómeno del cuerpo, puesto que la luz que pasa a través del vidrio, es absorbida por los cuerpos que están dentro de la caseta, que a su vez, liberan

la energía en forma de calor. El efecto invernadero se completa, porque los materiales transparentes, sólo lo son a ciertas longitudes de onda, mientras son transparentes a la luz visible y UV, no lo son a la radiación infrarroja, por lo tanto, la energía se va acumulando dentro de la caseta.

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

2.3 Tipos de radiación.

La radiación solar sufre ciertas transformaciones al incidir sobre la atmósfera. Existen tres tipos de radiación:

I. Radiación directa: la que se recibe directamente del Sol, sin sufrir ninguna dispersión atmosférica. La radiación extraterrestre es, por tanto, radiación directa.

II. La radiación difusa: es la que se recibe del Sol, después de ser desviada por dispersión atmosférica. Es radiación difusa la que se recibe a través de las nubes, así como la que proviene del cielo azul. De no haber radiación difusa, el cielo se vería negro, aun de día, como sucede por ejemplo en la Luna.

III. Radiación terrestre: la que proviene de objetos terrestres, por ejemplo, la que refleja una pared blanca, un charco o un lago, etc.

Se le llama Radiación total a la suma de las radiaciones directa, difusa y terrestre que se reciben sobre una superficie.

Para expresar la potencia solar y en general, de cualquier radiación- se utiliza el término irradiancia. La irradiancia, (W /m^2), es la rapidez de incidencia de energía radiante sobre una superficie, por unidad de área. Generalmente se usa el símbolo G para la irradiancia, junto con los subíndices adecuados: G_o , G_b , G_d , para la irradiancia extraterrestre, directa, difusa, etc. Nótese que la irradiancia tiene la virtud de indicar muy claramente que la radiación es un fenómeno que transcurre en el tiempo, que no es estático. Es energía que incide instantáneamente sobre una superficie.

Cuando incide la radiación sobre un plano, durante un tiempo determinado, puede hablarse entonces de que incidió una cierta cantidad de energía. La cantidad de energía, por unidad de área, que incide durante un período de tiempo dado, recibe el nombre de irradiación.

La atmósfera ejerce un efecto de redistribución de la radiación que recibe del Sol. Por ejemplo, en un día muy despejado, una parte relativamente pequeña se convierte en radiación difusa, mientras que la mayor parte permanece como directa. La radiación difusa, en un día despejado, es la que proviene del cielo azul. En cambio, en un día nublado, la redistribución de la radiación es mucho más notable. Las nubes densas tienen un albedo (fracción de energía reflejada) muy alto, lo cual hace que, en un día densamente nublado, una gran parte de la radiación solar se refleje al espacio exterior. Además, la energía que logra pasar a través de las nubes, es únicamente radiación difusa.

2.4 Forma de calentamiento solar.

Los dos elementos básicos de un secador solar son: el colector, donde la radiación calienta el aire y la cámara de secado, donde el producto es deshidratado por el aire que pasa. Estos elementos pueden diseñarse de diferentes formas para integrarse a diferentes equipos de secado solar:

I. Secador solar indirecto: Los dos elementos están separados. El aire es calentado en el colector y la radiación no incide sobre el producto colocado en la cámara de secado. La cámara de secado no permite la entrada de la

radiación solar. Este secador es esencialmente un secador convectivo convencional en que el sol actúa de fuente energética.

II. Secador solar directo: Los dos elementos pueden juntarse, en cuyo caso la cámara que contiene el producto también cumple la función de colector recibiendo la radiación solar.

III. Secador solar mixto: Finalmente puede darse el caso en que la colección de radiación se realice tanto en un colector solar previo a la cámara como en la misma cámara.

El Aislamiento Térmico

Es el método con el cual se trata de aislar térmicamente una superficie reduciendo la transferencia de calor hacia o desde el ambiente mediante el uso de materiales aislantes o de baja conductividad térmica. Su principal objetivo es mantener las condiciones térmicas de la cámara lo cual significara una mayor estabilidad del sistema, esto es, cuanto menos se pierda calor por las paredes la temperatura se mantendrá constante o por lo menos tardara más tiempo en disiparse por las paredes, con lo cual se verá beneficiado el sistema porque tendrá un ahorro en al consumo de combustible para mantener sus condiciones durante un periodo de tiempo más prolongado.

Presión de vapor.

Se define como presión de vapor de un líquido en equilibrio con su vapor, a la presión que ejercen las moléculas que escapan de la fase líquida (en equilibrio con las que retornan de la fase vapor). Dicha presión de vapor aumenta al elevarse la temperatura, llegándose a un límite que es la presión crítica, en el que la fase líquida desaparece.

Cuando la presión de vapor del líquido es igual a la presión externa que ejerce el gas en contacto con el líquido, se observa la formación de burbujas en el seno del líquido y se dice que éste entra en ebullición. Así pues, el punto de ebullición de un líquido se define como la temperatura a la cuál su presión de vapor es igual a la

presión externa. Si se produce una disminución de la presión externa, el punto de ebullición disminuye, mientras que un aumento de la presión externa provocará un aumento del punto de ebullición.

Calor latente de vaporización:

Para pasar de la fase líquida a la fase de vapor se necesita una absorción de energía por parte de las moléculas líquidas, ya que la energía total de estas es menor que la de las moléculas gaseosas. En el caso contrario, en la condensación, se produce un desprendimiento energético en forma de calor. El calor absorbido por un líquido para pasar a vapor sin variar su temperatura se denomina calor de vaporización. Se suele denominar *calor latente de vaporización* cuando nos referimos a un mol.

El calor específico es una magnitud física que se define como la cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa de una sustancia o sistema termodinámico para elevar su temperatura en una unidad (kelvin o grado Celsius).

En general, el valor del calor específico depende de dicha temperatura inicial. Cuanto mayor es el calor específico de las sustancias, más energía calorífica se necesita para incrementar la temperatura.

El término "calor específico" tiene su origen en el trabajo del físico Joseph Black, quien realizó variadas medidas calorimétricas y usó la frase "capacidad para el calor".

El calor específico medio (\hat{c}) correspondiente a un cierto intervalo de temperaturas ΔT se define en la forma:

$$\hat{c} = \frac{Q}{m \Delta T} \dots \dots \dots (2.1)$$

Donde Q es la transferencia de energía en forma calorífica en el entre el sistema y su entorno u otro sistema, m es la masa del sistema y ΔT es el

£

incremento de temperatura que experimenta el sistema. El calor específico () correspondiente a una temperatura dada T se define como:

$$c = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{Q}{m \Delta T} = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT} \dots\dots\dots (2.2)$$

La cantidad de calor asociada con un cambio de temperatura del sistema desde la temperatura inicial T_i a la final T_f se calcula mediante la integral siguiente:

$$Q = m \int_{T_i}^{T_f} c dT \dots\dots\dots (2.3)$$

En un intervalo donde la capacidad calorífica sea aproximadamente constante la fórmula anterior puede escribirse simplemente como:

$$Q \approx mc\Delta T \dots\dots\dots(2.4)$$

2.5 Características de la madera

2.5.1 Propiedades de la madera

Anisotropía

La madera no es un material homogéneo, sino un material muy diferente según el plano o la dirección que se considere. Como resultado de esa desigual configuración, presenta un desigual comportamiento.

Para tener una idea de cómo se comporta, la madera resiste entre 20 y 200 Veces más en el sentido del eje del árbol, que en el sentido transversal; Este comportamiento tan desigual de la madera, hace obligado denominar de forma diferente, los planos y direcciones que se consideren.

Dirección axial: la del eje del árbol

Dirección radial: la dirección de los radios, perpendicular al eje del árbol.

Dirección Tangencial: la dirección tangencial del árbol, perpendicular al eje del árbol

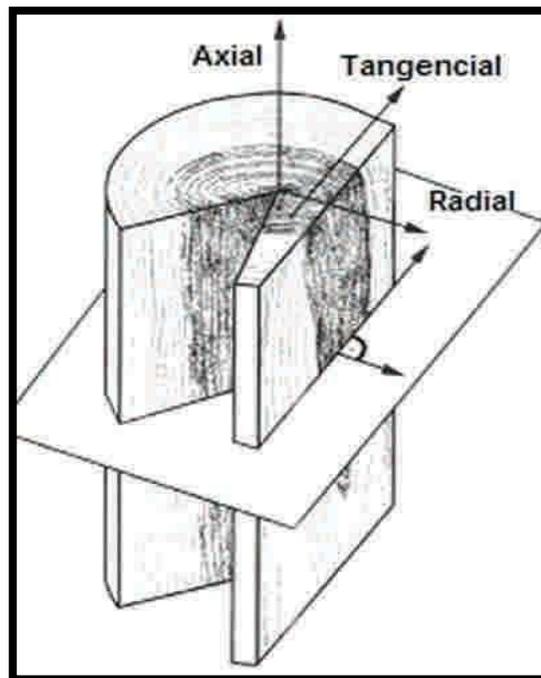


Figura 1: Principales direcciones de la madera, fuente: Anisotropía

Higroscopia

La propiedad que tienen los cuerpos de establecer un intercambio de humedad con el ambiente se denomina higroscopicidad.

La madera es un material higroscópico. Tiene la capacidad de captar y ceder humedad en su medio, proceso que depende de la temperatura y humedad relativa del ambiente. Este comportamiento es el que determina y provoca cambios dimensionales y deformaciones en la madera.

Se puede establecer que el agua puede estar contenida en la madera en las siguientes formas (L. García, 1989):

Agua de desorción: (la que esta retenida o impregnada en la madera) es la que está retenida por fuerzas de tipo Van der Waal, consecuencia de los grupos polares activos de la pared celular. Esta agua es la que más fuertemente queda retenida por la pared celular. La madera puede llegar a contener un 8 % de peso de agua respecto del peso de la madera seca, como consecuencia de esta fuerza.

Agua de absorción: es el agua que queda retenida en la pared celular como consecuencia de la fuerza de adhesión superficial. La madera puede llegar a contener un 6 % a un 8 % de peso de agua respecto del peso de la madera seca.

Agua de condensación o capilar: es la retenida por fuerzas capilares, provocadas por los espacios entre microfibrillas. La madera puede llegar a contener entre un 14 % a un 16 % de peso de agua respecto del peso de la madera seca.

Agua libre: es la contenida en el lumen de las células prosénquimatosas. Su fuerza de retención es muy pequeña, de forma que no puede captar agua de la atmósfera, solo puede introducirse si se produce una inmersión de la madera en agua.

2.5.2 La madera y el agua

El porcentaje de humedad H % de una madera esta determinada por la siguiente relación:

$$H\% = \frac{P_2 - P_1}{P_1} \cdot 100 \dots \dots \dots (2.5)$$

El estudio tecnológico de las relaciones entre el agua y la madera, es seguramente, el más importante, dado que, afecta a la mayoría de los procesos de transformación de la madera. Aún es más, las características de comportamiento de la madera, están muy influenciadas por el contenido de humedad de la madera.

Así, la humedad de la madera influye de forma determinante en la concepción de procesos tales como el aserrado, el desenrollo, el cepillado, el encolado, el barnizado, etc. Respecto al comportamiento, la humedad es un factor determinante en su durabilidad, en su resistencia, peso,... y sobre todo en sus dimensiones, es decir, que la madera varia en sus dimensiones con el contenido de humedad, hinchándose cuando gana humedad y mermando cuando la pierde.

La relación entre el agua y la madera funciona de la siguiente forma:

Sea un árbol recién aserrado e introducido en un patio de oreado. En el primer instante, la madera posee un alto contenido de humedad, dado que el agua llena todos los huecos entre las fibras elementales, entre las microfibrillas, entre las fibras, e incluso gran parte del lumen celular contiene agua. En esos momentos el porcentaje de humedad de la madera oscila alrededor del 80 %, siendo muy numerosos los casos, en el que el porcentaje de humedad es superior al 100%.

El aire del patio oreado, como consecuencia de la fuerza desecante que tiene, absorbe el agua de la superficie, dejando la primera capa de células sin casi agua. Esta capa de células, al estar más secas que la segunda capa, absorben parte del agua que tienen, de forma a igualar su humedad, y así sucesivamente hasta llegar al interior de la madera.

El resultado es que el aire va quitando agua de los huecos de la madera, primero del agua del lumen celular, después el agua adherida superficialmente por fuerzas capilares de la pared celular, el agua retenida por adhesión superficial y el agua retenida en los grupos polares de la celulosa. Según se va secando la madera, va aumentando su fuerza desecante y disminuyendo la del aire, con lo que llega un momento que ambas fuerzas se equilibran, con lo que cesa el intercambio de agua. En ese momento se dice que la madera ha alcanzado el punto denominado de Humedad de Equilibrio Higroscópico HEH.

Se denomina humedad de Equilibrio Higroscópico HEH la humedad de la madera a la que se equilibra la fuerza desecante de esta con la de la atmósfera. También se puede definir como el porcentaje de humedad que alcanzaría una madera a lo largo del tiempo, sometida a unas ciertas condiciones de humedad y temperatura del medio ambiente.

Como el aire cambia de condiciones climáticas constantemente, este punto de equilibrio HEH también cambia constantemente, tomando agua de la madera cuando disminuye la fuerza desecante del aire o cediendo agua la madera cuando aumenta la fuerza desecante del aire.

Como los cambios climáticos del aire se suceden continuamente del día a la noche, según las estaciones..., hace que la humedad de la madera también cambie continuamente, si bien en valores muy pequeños.

La *HEH* máxima que puede tener una madera, cuando se le expone a un ambiente saturado de humedad es del 30 %, esta es la humedad que satura todos los huecos existentes entre las fibrillas elementales, entre microfibrillas y entre las fibras que componen la pared celular. A este punto de humedad se le denomina punto de saturación de la fibra PSF.

Para que la humedad adquiriera mas humedad que la correspondiente al PSF, es necesario sumergirla en agua, y llenar espacios existentes en el lumen celular.

La hinchazón y contracción de la madera

La madera cambia de dimensiones, aumentando o disminuyendo cuando toma o cede por debajo de su punto de saturación de la pared celular (PSF).

Ello es debido a que el espacio existente entre las microfibrillas y sobre todo interfibrillas elementales, disminuye cuando disminuye el contenido de agua o aumenta cuando aumenta el contenido de agua de la madera. Al variar el tamaño de este espacio, también varía el tamaño de la pared celular, y el de la célula y con ello el de la madera.

Anisotropía

Como la madera es isótropa los cambios dimensionales se realizan de forma diferente según la dirección que se considere, denominándose:

C_v -contracción volumétrica al total de lo que contrae una madera desde donde está por encima del PSF hasta el 0% de humedad.

C_{cv} -coeficiente de contracción volumétrica a lo que contrae una madera por perder un 1% de humedad cuando se está por debajo del PSF.

C_{lt} -contracción lineal tangencial, C_{lr} -contracción lineal radial, C_{la} - contracción lineal axial. Como al total de lo que contrae en esa dirección cuando la madera se seca desde un punto superior al PSF hasta el 0% de humedad.

Coficiente de contracción lineal tangencial C_{ct} , radial C_{cr} o axial C_{ca} a lo que contrae en esa dirección cuando la madera pierde un 1% de humedad y está por debajo del PSF.

De forma aproximada, se cumple la siguiente relación:

$$C_{cv} = C_{ct} + C_{cr} + C_{ca} + C_{cv} \dots \dots \dots (2.6)$$

2.5.3 Densidad o peso específico

Es la relación entre el peso P y el volumen V de una madera

$$\frac{P}{V} \dots\dots\dots(2.7)$$

Como el peso y el volumen de una madera está afectado por el porcentaje de humedad, al hablar de densidad se debe siempre significar la humedad a la que está hecha la medida, es decir que se debe de hablar de densidad de la madera a una determinada humedad como puede ser el 0% (densidad anhidra), del 12% (densidad normal) o a otra humedad de la madera.

$$\frac{P_h}{V_h} \dots\dots\dots(2.8)$$

2.5.4 resistencia mecánica

La madera sometida a cargas tiene un comportamiento denominado visco- elástico. Ante una cierta carga inferior al límite elástico, se deforma, perdiendo la deformación cuando cesa la carga.

El valor de la deformación, en el estado plástico es muy elevado respecto de cualquier otro material. Es decir, la madera es muy deformable. Respecto a sus valores de resistencia, en dirección longitudinal es relativamente muy resistente, mientras que transversalmente, su resistencia es muy pequeña que muchas veces no se considera.

2.5.5 Dureza

Es una propiedad que indica la facilidad de penetración de un material a otro.

La madera en relación con otros materiales (acero y hormigón), se puede definir como blando, que en algunos aspectos se puede considerar un defecto (facilidad de rayado y por lo tanto pérdida de apariencia de superficie) tiene como ventajas, su facilidad de procesado (corte, unión...).

2.5.6 Otras características

Propiedades térmicas

Dilatación térmica: la dilatación térmica de la madera es prácticamente nula, comparada con el acero u otros materiales metálicos.

Conductividad térmica: la madera es uno de los materiales más aislantes que tiene el hombre solo superado por el corcho, o ciertos materiales sintéticos. $K_{madera} = 0.1$ a 0.15 kcal/mh°C.

Propiedades eléctricas

La madera seca es muy mala conductora de la electricidad, pero conforme aumenta su porcentaje de humedad, la conductividad aumenta de forma muy directa, hasta el punto, que esta propiedad se utiliza medir la humedad de madera de forma rápida.

Propiedades acústicas

Aislamiento acústico frente ruidos aéreos externos
Aislamiento acústico frente ruidos aéreos internos: reverberación
Aislamiento acústico frente a impactos
Transmisión acústica

Capítulo III: La transferencia de calor

La transferencia de calor es la energía en tránsito debido a una diferencia de temperatura. Siempre que exista una diferencia de temperatura en un cuerpo o entre cuerpos, debe ocurrir una transferencia de calor.

Cuando existe una diferencia de temperatura en un medio estacionario, que puede ser un sólido o un fluido, se le llama conducción cuando ocurre una transferencia de calor en este medio. Se utiliza el término convección cuando existe una diferencia de temperatura entre un sólido y un fluido en movimiento. El término radiación es utilizado cuando dos superficies a diferentes temperaturas finitas emiten energía en ausencia de un medio en forma de ondas electromagnéticas. Los fenómenos de la transferencia de calor tienen un papel muy importante en los procesos industriales, tanto en la producción y conversión de energía como es el caso de la generación de energía eléctrica mediante fisión nuclear, donde intervienen procesos de conducción radiación y convección en sistemas como calderas condensadores y turbinas. La transferencia de calor también influye fuertemente en el clima local y global, en la contaminación del aire y del agua.

3.1 conducción

En 1822, el matemático francés Joseph Fourier dio una expresión matemática precisa que hoy se conoce como ley de Fourier de la conducción del calor. Esta ley afirma que la velocidad de conducción de calor a través de un cuerpo por unidad de sección transversal es proporcional al gradiente de temperatura que existe en el cuerpo (con el signo cambiado).

El factor de proporcionalidad se denomina conductividad térmica del material. Los materiales como el oro, la plata o el cobre tienen conductividades térmicas elevadas y conducen bien el calor, mientras que materiales como el vidrio o el amianto tienen conductividades cientos e incluso miles de veces menores; conducen muy mal el calor, y se conocen como aislantes. En ingeniería resulta necesario conocer la velocidad de conducción del calor a través de un sólido en el que existe una diferencia de temperatura conocida.

3.2 convección

La convección es el término que se usa para describir la transferencia de calor desde una superficie a un fluido en movimiento. En contraposición con la conducción,

En la convección existen dos tipos de transferencia de calor estos son:

3.2.1 Convección natural,

La fuerza motriz procede de la variación de densidad en el fluido como consecuencia del contacto con una superficie a diferente temperatura, lo que da lugar a fuerzas ascensoriales. El fluido próximo a la superficie adquiere una velocidad debida únicamente a esta diferencia de densidades, sin ninguna influencia de fuerza motriz exterior.

3.2.2 Convección forzada

Tiene lugar cuando una fuerza motriz exterior mueve un fluido sobre una superficie que se encuentra a una temperatura mayor o menor que la del fluido. Esa fuerza motriz exterior puede ser un ventilador, una bomba, el viento, etc. Como la velocidad del fluido en la convección forzada es mayor que en la convección natural, se transfiere, por lo tanto, una mayor cantidad de calor para una determinada temperatura.

3.3 radiación

La transferencia de calor por conducción y convección requiere la presencia de un gradiente de temperatura en alguna forma de materia. Por el contrario, la transferencia de calor mediante radiación térmica no requiere de materia.

Es relevante para muchos procesos industriales de calentamiento, enfriamiento y secado, así como también para métodos de conversión que incluyen la utilización de combustibles fósiles y la radiación solar.

Todas las formas de materia emiten radiación para gases y para sólidos semitransparentes, como vidrio y cristales de sal a temperaturas elevadas, la emisión es un fenómeno volumétrico, es decir, la radiación que emerge de un volumen finito de materia es el efecto integrado de la emisión local de a través del volumen.

En la mayoría de los sólidos y líquidos, la radiación emitida desde las moléculas interiores es fuertemente absorbida por las moléculas contiguas. Esta radiación que se emite en un sólido o líquido se originan de moléculas que están a una distancia de aproximadamente $1 \mu\text{m}$ de la superficie expuesta.

Una teoría considera a la radiación térmica como la propagación de una acumulación de partículas denominadas fotones o cuantos. Alternativamente la radiación se puede ver como la propagación de ondas electromagnéticas.

Se le atribuye a la radiación las propiedades características de las ondas, frecuencia ν y longitud de onda λ para radiación que se propaga en un medio Particular

Prácticamente toda la radiación emitida a baja temperatura por los objetos del invernadero es de este tipo de longitud de onda y permanece atrapada en el invernadero. Por esto, el vidrio permite que entre mucha más radiación que la que puede escapar, produciendo de ese modo el familiar efecto de calentamiento. La radiación solar absorbida por los objetos del invernadero debe finalmente cederse a los alrededores por convección desde las paredes exteriores del invernadero.

En el espectro de radiación del sol, se ha señalado que la mayor parte de la energía solar se concentra en la región de longitudes de onda cortas. Como consecuencia de este espectro, las superficies reales tienen propiedades de absorción considerablemente distintas para la radiación solar y para la radiación (terrestre) de longitud de onda larga.

3.4 Determinación del aislante adecuado para el secador.

Se analizará los siguientes aislantes térmicos en base a sus propiedades de conductividad térmica, densidad, su temperatura de operación, haciendo comparaciones entre ellos para determinar el aislante óptimo para el horno de secado.

- ✓ Lana de vidrio
- ✓ Espuma de poliuretano
- ✓ Poliestireno
- ✓ Lana mineral

Lana de vidrio

- ✓ Densidad: 100-200 Kg./m³
- ✓ Calor específico: 670 J/(Kg. · K)
- ✓ Conductividad térmica: 0.036-0.040 W/(m·K)
- ✓ Rango de temperaturas de operación: -30 °C a 540 °C

Espuma de poliuretano

- ✓ Densidad: 40 Kg./m³
- ✓ Calor específico: 1674 J/(Kg. · K)
- ✓ Conductividad térmica: 0.029 W/(m·K)
- ✓ Rango de temperaturas de operación: -210 °C a 120 °C

El poliuretano es un polímero orgánico formado por reacción de un polioliol (un alcohol con más de dos grupos reactivos hidroxilo por molécula) con un diisocianato o un isocianato polimérico en presencia de catalizadores y aditivos adecuados. Los poliuretanos son espumas flexibles utilizados en los colchones, recubrimientos resistentes a químicos, adhesivos y selladores, aislamiento de edificios y aplicaciones técnicas, como intercambiadores de calor, tubos de refrigeración y mucho más.

Poliestireno

- ✓ Densidad: 35 Kg./m³
- ✓ Calor específico: 670 J/(Kg. · K)
- ✓ Conductividad térmica: 0.157 W/(m·K)
- ✓ Rango de temperaturas de operación: -50 °C a 75 °C

El poliestireno expandido no es higroscópico, a diferencia de lo que sucede con otros materiales del sector del aislamiento y embalaje. Incluso sumergiendo el material completamente en agua los niveles de absorción son mínimos con valores oscilando entre el 1% y el 3% en volumen.

Al contrario de lo que sucede con el agua en estado líquido el vapor de agua sí puede difundirse en el interior de la estructura celular del EPS cuando entre ambos lados del material se establece un gradiente de presiones y temperaturas.

Con respecto al extremo superior el límite de temperaturas de uso se sitúa alrededor de los 100 °C para acciones de corta duración, y alrededor de los 80°C para acciones continuadas

Lana mineral

- ✓ Densidad: 100-200 Kg./m³
- ✓ Calor específico: 670 J/(Kg. · K)
- ✓ Conductividad térmica: 0.036-0.040 W/(m·K)
- ✓ Rango de temperaturas de operación: 0 °C a 1000 °C

La lana mineral es de vidrio fundido, piedra o escoria que se hace girar en una estructura de fibra-como. Roca o escoria inorgánicas son los componentes principales (típicamente 98%) de lana de roca. El restante 2% el contenido orgánico es generalmente un aglutinante de resina termoestable (un adhesivo) y un poco de aceite.

3.4.1 Análisis de las pérdidas por unidad de área para los aislantes

| AISLANTE | CONDUCTIVIDAD TERMICA (W/(m•K)) | RANGO DE TEMPERATURA °K | AREA M ² | ESPESOR M | PERDIDA DE CALOR WATTS |
|-----------------------|---------------------------------|-------------------------|---------------------|-----------|------------------------|
| LANA DE VIDRIO | 0,04 | 48 | 1 | 0,0254 | 75,59 |
| | | | | 0,0508 | 37,80 |
| | | | | 0,0762 | 25,20 |
| | | | | 0,1016 | 18,90 |
| ESPUMA DE POLIURETANO | 0,029 | 48 | 1 | 0,0254 | 54,80 |
| | | | | 0,0508 | 27,40 |
| | | | | 0,0762 | 18,27 |
| | | | | 0,1016 | 13,70 |
| POLIESTIRENO | 0,157 | 48 | 1 | 0,0254 | 296,69 |
| | | | | 0,0508 | 148,35 |
| | | | | 0,0762 | 98,90 |
| | | | | 0,1016 | 74,17 |

Tabla 1: Comparación de aislantes # 1

Comparación de la energía por unidad de área necesaria para elevar la temperatura para cada aislante

| AISLANTE | RANGO DE TEMP. °C | ESPESOR M | VOLUMEN M ³ | CALOR ESPECIFICO Kcal/kg°C | DENSIDAD (kg/m ³) | CALOR Kcal |
|-----------------------|-------------------|-----------|------------------------|----------------------------|-------------------------------|------------|
| LANA DE VIDRIO | 48 | 0,0254 | 0,0254 | 0,1600 | 200 | 39,0144 |
| | | 0,0508 | 0,0508 | | | 78,0288 |
| | | 0,0762 | 0,0762 | | | 117,0432 |
| | | 0,1016 | 0,1016 | | | 156,0576 |
| ESPUMA DE POLIURETANO | 48 | 0,0254 | 0,0254 | 0,3998 | 40 | 19,4974 |
| | | 0,0508 | 0,0508 | | | 38,9949 |
| | | 0,0762 | 0,0762 | | | 58,4923 |
| | | 0,1016 | 0,1016 | | | 77,9898 |
| POLIESTIRENO | 48 | 0,0254 | 0,0254 | 0,2866 | 35 | 12,2298 |
| | | 0,0508 | 0,0508 | | | 24,4596 |
| | | 0,0762 | 0,0762 | | | 36,6894 |
| | | 0,1016 | 0,1016 | | | 48,9192 |

Tabla 2 Comparación de aislantes # 2

La tabla anterior (fig.2) muestra la variación de calor requerido para elevar su temperatura desde la temperatura ambiente de 22 °C hasta la de operación de 54 °C, cuando el espesor varía a razón de una pulgada espesor y en donde se observa que el aislante que requiere menor calor para elevar su temperatura es el poliestireno.

La siguiente figura (fig.2) muestra la comparación de las pérdidas de calor en cada aislante cuando este varía su espesor a razón de 1 pulgada y en donde se observa que el material que presenta menor pérdida es el poliuretano pero que además el aislante de poliestireno presentó una mayor disminución de pérdidas de calor en comparación de su valor más alto.

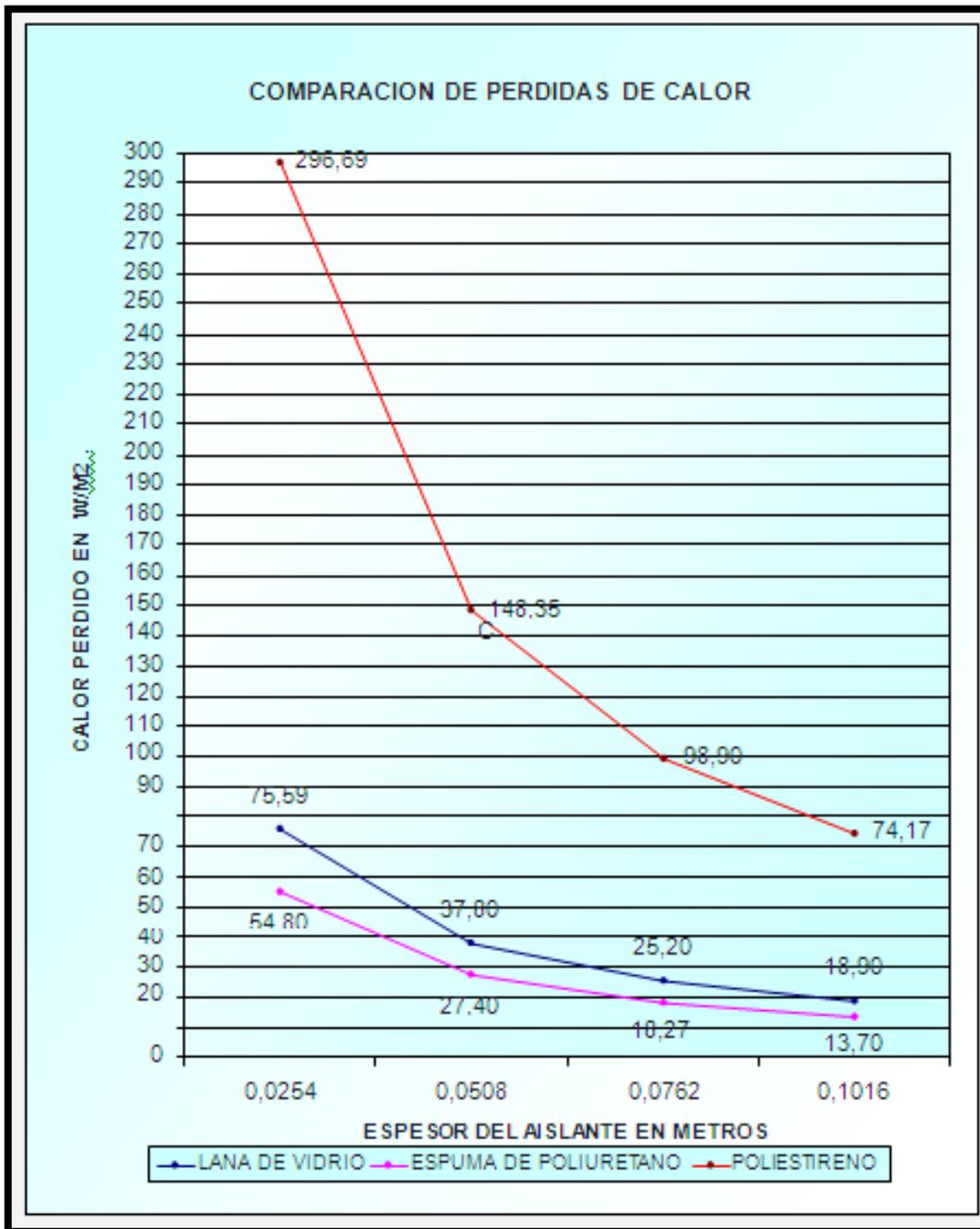


Figura 2: comparación de pérdidas de calor por aislante

La siguiente figura (fig.3) muestra la variación de calor requerido para elevar su temperatura desde la temperatura ambiente de 22 °C hasta la de operación de 54 °C, cuando el espesor varía a razón de una pulgada espesor y en donde se observa que el aislante que requiere menor calor para elevar su temperatura es el poliestireno.

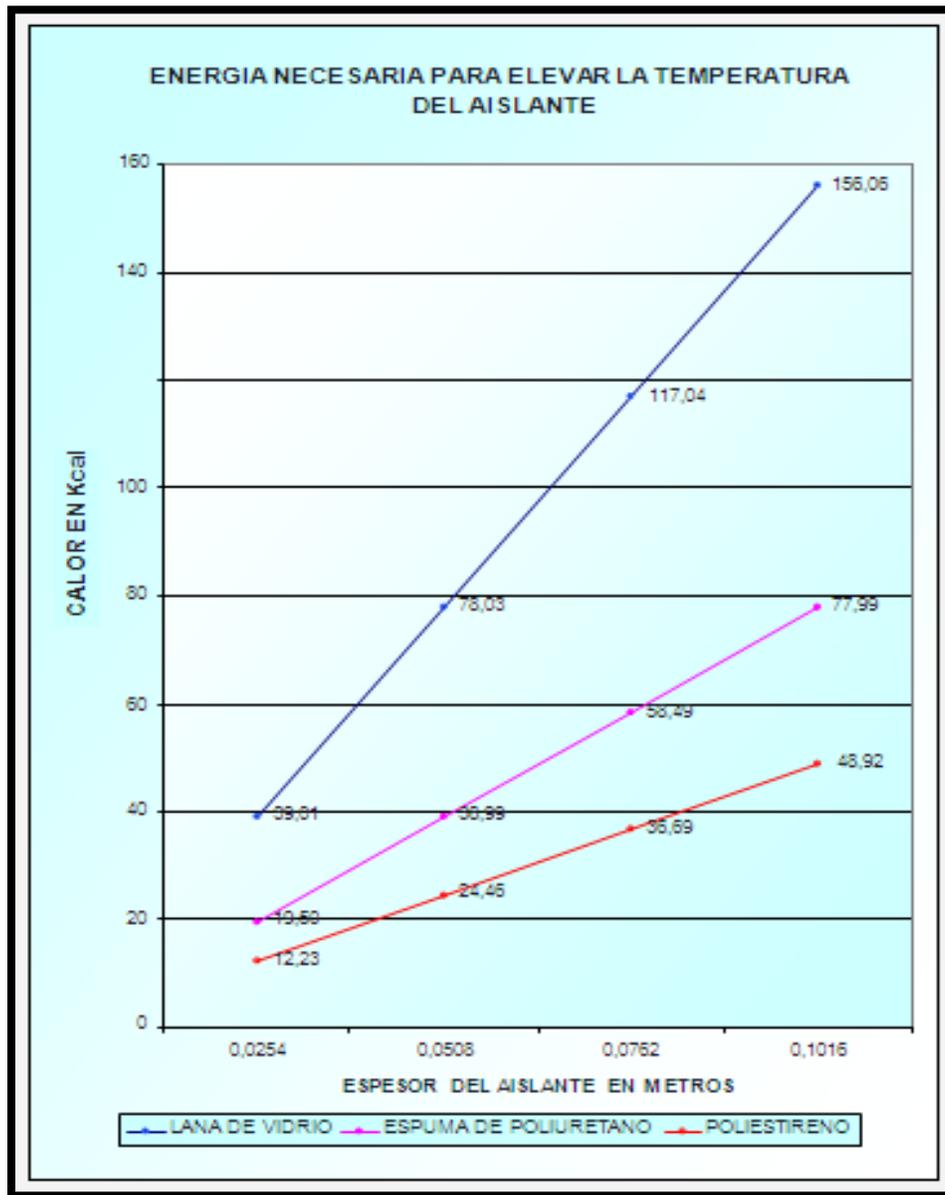


Figura 3: Variación de energía requerida para elevar La temperatura del aislante

La siguiente figura (fig. 4) muestra la variación de la temperatura que se presenta en la parte media del arreglo entre el aislante y la estructura (ladrillo). que está dada en °C para cada tipo de aislante y con una variación de sus espesores con incrementos de una pulgada.

El material aislante que presenta una temperatura más baja en este punto medio entre el aislante y el ladrillo es el poliuretano, sin embargo, el poliestireno presenta una mayor diferencia entre su valor máximo y su valor Mínimo.

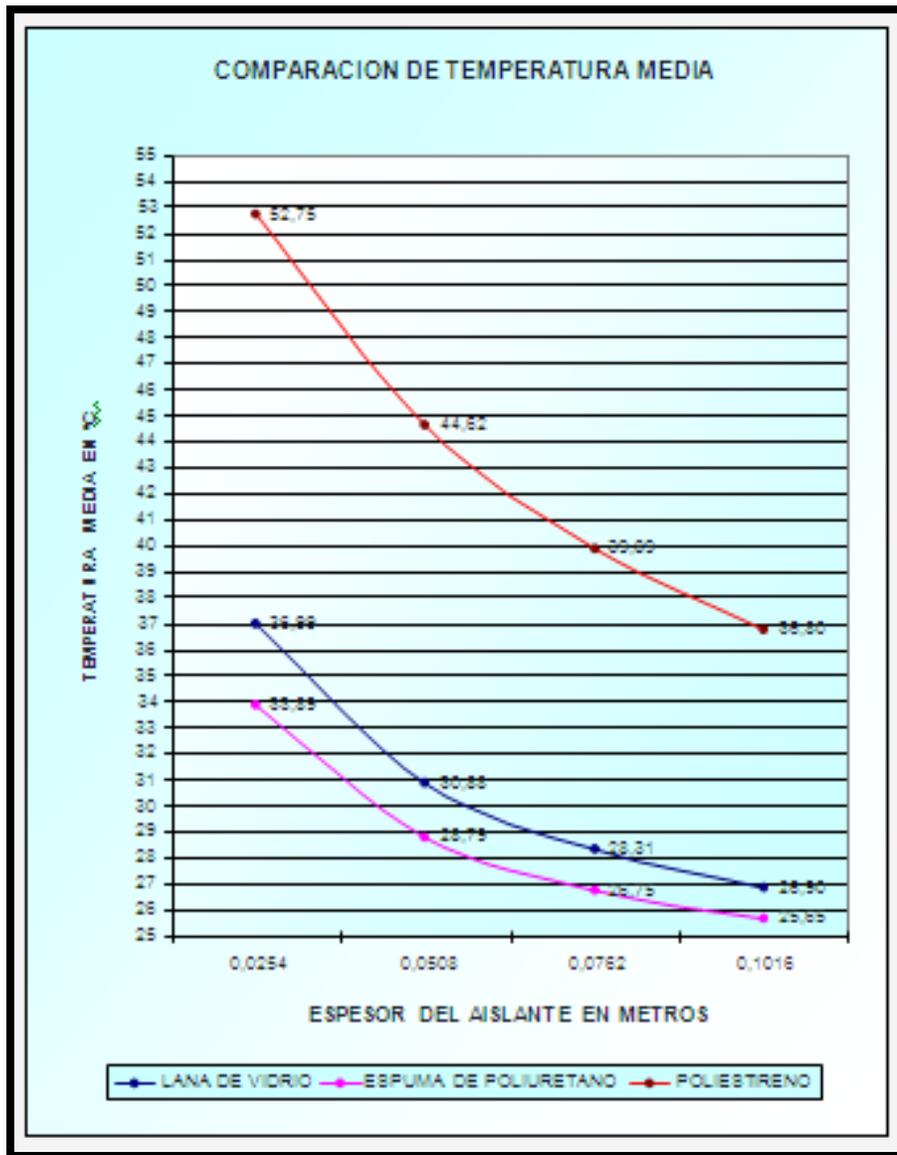


Figura 4 comparaciones de temperatura intermedia

Capítulo IV: Factores que afectan la pérdida de humedad relacionados con la madera

Albura y Duramen

La albura de las coníferas generalmente tiene un contenido de humedad mayor que el duramen mientras el contenido de humedad de la albura de las latifoliadas es algo más alto o igual que el del duramen. La infiltración de gomas, resinas y otros materiales en el duramen lo hacen menos permeable que la albura, por esto el duramen usualmente requiere tiempos de secado más largos. También la baja permeabilidad del duramen lo hace más susceptible a ciertos defectos de secado y requiere condiciones de secado más suaves.

Anillos de Crecimientos

La madera aserrada radial o tangencialmente responde de manera diferente al secado. Así, la cortada tangencialmente (0-45 °C) es menos susceptible al colapso, se contrae y se dilata menos en espesor y seca más rápido que la de corte radial, mientras que la de corte radial contrae y se dilata menos en ancho y tiene menos torceduras, abarquillado y grietas superficiales que la de corte tangencial.

Radios

Debido a que los radios son débiles y secan más rápido que las células de alrededor, usualmente ocurren grietas en los extremos, en la superficie y cerca de ellos. Especies tales como el cedro, con radios grandes, requieren especial cuidado durante las primeras etapas del secado.

Grano y Textura

La madera de grano recto es más fácil de secar que la madera de grano entrecruzado o en espiral como la caoba que es más difícil de secar sin que ocurran alabeos. La madera de grano grueso o basto seca más rápidamente que la de grano fino, y la madera de grano uniforme desarrolla menos defectos de secado que la madera de grano no uniforme.

Color

Las maderas de color claro generalmente se oscurecen con el secado, especialmente cuando se aplican altas temperaturas. Pero esto se puede volver beneficioso cuando se desea oscurecer la albura para obtener un mejor color y en este caso se usa vaporización antes del secado.

Variaciones en la Estructura

La madera aserrada contiene variaciones en la estructura, tales como grano entrecruzado, nudos, madera de reacción, madera juvenil entre otros.

El grano en espiral, diagonal, entrecruzado contrae más en sentido longitudinal que el grano recto, tales maderas pueden presentar arqueadura, torcedura y encorvadura durante el secado. La madera juvenil y la de reacción también contraen más en sentido longitudinal que la normal y de igual manera pueden suceder arqueadura, torcedura y encorvadura, y cuando es restringida puede fracturar y formar grietas transversales en la madera aserrada.

4.1 Densidad y Peso Específico

La densidad es una característica de gran interés en el secado. En general se puede decir que cuanto más densa es la madera más difícil es de secar. Cuanto mayor sea el peso específico mayor será la cantidad de madera seca por unidad de volumen de madera verde. Así, al mismo contenido de humedad, maderas con peso específico alto contienen mayor cantidad de agua y requieren más tiempo de secado que maderas con peso específico bajo. Así, el peso de la madera depende de su peso específico y de su contenido de humedad. El peso verde de 1 m³ de madera puede ser calculado por la fórmula:

$$P_v = \frac{P_e(CH + 100)D_a}{100}$$

Donde: Pe = Peso específico
CH = Contenido de Humedad
Da = Densidad del agua

Por ejemplo, el peso verde de 1 m³ de una especie con peso específico de 0,4 a 75% de contenido de humedad es 700 kg. El peso seco al horno (sustituyendo el contenido de humedad por cero en la fórmula) es 400 Kg. es decir, hay 300 Kg. de agua presente. A un peso específico de 0,6 igualmente a 75 por ciento de contenido de humedad, el peso verde es 1050 Kg. el peso seco al horno 600 kg. Por lo tanto el peso del agua es 450 kg. Así, hay 150 Kg. de agua más a 0,6 de peso específico que a 0,4.

4.1.1 Dimensiones de la Madera

El tiempo de secado varía en forma exponencial con el espesor, por lo que al secar la madera se debe clasificar principalmente por espesor. En cambio el largo y el ancho de una pieza de madera no son determinantes en el comportamiento de la madera durante el secado.

4.1.2 Estado Fitosanitario

Muchas maderas susceptibles al ataque de hongos e insectos sufren daños tan severos, en estado verde que no vale la pena secarlas. La única manera de conservar la calidad de estas maderas es un tratamiento profiláctico de las trozas en el bosque inmediatamente después de ser cortadas, y después de aserradas un baño profiláctico (antimancha más insecticida).

4.1.3 Contenido de Humedad inicial (CHI)

La humedad inicial está en función de la época de corte y la acción del medio ambiente sobre la madera. CHI muy variados dificultan el secado, es recomendable, en lo posible, seleccionar lotes con contenidos de humedad homogéneos.

Contenido de Humedad Final (CHF)

Depende del uso final que se le vaya a dar posteriormente.

4.2 Factores que afectan la pérdida de humedad relacionados con las variables del proceso

4.2.1 Temperatura.

Recordemos que es necesaria la aplicación de algún tipo de energía calorífica para poder evaporar el agua de la madera, y estos requerimientos van en aumento a medida que progresa el secado, con el fin de liberar el agua de las grandes fuerzas higroscópicas con las cuales es retenida en la madera. La velocidad de evaporación depende a su vez de la gran cantidad de energía suministrada por unidad de tiempo y de la capacidad del medio (aire) para absorber la humedad liberada por la madera.

El suministro de calor en el secador es necesario para; (1) calentar la madera, (2) evaporar la humedad de la madera, (3) calentar el aire frío que entra en el secador y (4) reemplazar la pérdida de calor que absorbe la estructura del secador.

El método usual de calentamiento de la madera se realiza de forma indirecta a través de intercambiadores de calor colocados dentro del secador, éstos transportan los productos de la combustión de la fuente de calor como petróleo, gas, carbón, madera, aserrín o transportan agua caliente, vapor de agua, aceite térmico, etc . Los hornos de calentamiento directo no son apropiados para secar madera aserrada. La temperatura óptima del secador depende, sobre todo de la especie, espesor, contenido de humedad inicial y del uso final de la madera a secar. Además, es importante tomar en cuenta que la temperatura, conjuntamente con la humedad relativa, son los elementos que determinan el clima dentro del secador y el contenido de humedad de equilibrio de la madera.

Como norma general, las mayores economías durante el secado se obtienen cuando se trabaja con las máximas temperaturas que pueda resistir la madera, puesto que el calor acelera la difusión de la humedad desde el interior de la pieza hacia su superficie. Mientras que bajas temperaturas son aplicadas para secar maderas en las cuales pueden presentarse defectos como decoloración, exudado de resina y nudos sueltos al aplican altas temperaturas.

4.2.2 Humedad Relativa (HR)

La humedad del aire es un factor importante para el control del contenido de humedad de la madera, particularmente en aquellos casos donde es necesario controlar la evaporación en la superficie de la misma. Así, la humedad relativa afecta el gradiente de humedad y la contracción de la madera, por lo tanto tiene una relación directa con los esfuerzos al interior de la pieza que pueden conducir a la aparición de defectos como torceduras y rajaduras.

La humedad relativa dentro de la cámara de secado generalmente se controla mediante un sensor y controlador del bulbo húmedo, en los secadores computarizados se controla el contenido de humedad de equilibrio (CHE) de la cámara mediante un sensor que envía la señal al programa principal. En caso de que el CHE sea menor que el programado para esta etapa de secado, se agrega vapor a la cámara a través de los rociadores o humidificadores, en caso contrario, que el CHE sea mayor que el programado se abren las ventilas colocadas en la parte superior del horno para permitir el escape de aire húmedo y la entrada de aire fresco.

La humedad relativa del aire afecta directamente la humedad de la madera, es decir si la HR del aire aumenta también aumenta la humedad de la madera y viceversa.

Esta aseveración se cumple cuando se mantiene la temperatura y cuando los procesos se llevan a cabo en un sistema cerrado, como en el caso de un secador para madera.

La humedad relativa del aire y en consecuencia la humedad de la madera está fuertemente influenciada por la temperatura. El aire caliente necesita una cantidad mayor de agua para saturarse que el frío y por lo tanto puede absorber mayor cantidad de agua de la madera.

Las etapas de secado donde se necesita mayor cantidad de vapor dentro de la cámara para aumentar el CHE son al principio de secado y al final para las etapas de

4.2.3 Velocidad del aire.

El aire dentro de la cámara puede circular por gravedad (ventilación natural) o por medio de ventiladores que producen una ventilación forzada, con el objeto de aumentar la velocidad del aire y con ello acelerar el secado de la madera.

La velocidad del aire dentro de la pila de madera tiene como funciones principales: transmitir la energía requerida para calentar el agua contenida en la madera facilitando así su evaporación y transportar la humedad saliente de la madera.

La capa límite que existe entre la madera y el aire juega papel importante en el secado de la madera. Cuanto menor sea el espesor de esta capa, más rápida será la remoción de la humedad de la superficie de la madera.

Al igual, la velocidad del aire desempeña papel importante en las primeras etapas del secado, sobre todo cuando la madera está muy húmeda ($CH > 30\%$). A mayor velocidad de aire mayor será la tasa de evaporación y menor el tiempo de secado y viceversa. Es importante destacar que una buena ventilación es sinónimo de un buen secado, ya que juega un papel muy importante al principio del ciclo sobre la velocidad del secado y al final sobre la homogeneidad en el contenido de humedad de las piezas de madera en la pila.

Experimentalmente se ha demostrado que se obtienen condiciones óptimas de secado, en la mayor parte de los casos, cuando el aire circula en la pila a una velocidad de 2 m/s. si se utiliza velocidades mayores sin un debido control puede comprometerse la calidad de la madera por cuanto se acelera considerablemente la tasa de evaporación del agua, generándose un gradiente de humedad muy alto entre la superficie de la madera y su parte interna.

En conclusión, desde el punto de vista económico es importante tener presente los elementos de control del secado de la madera (temperatura, humedad relativa y velocidad del aire), que una modificación de las condiciones de circulación de aire en el secador implica mayores costos que cuando se opta por regular las condiciones de temperatura y humedad relativa. Para modificar la HR en un secador a vapor, sólo se requiere aumentar o disminuir la cantidad de vapor rociado y/o aumentar la acción de las ventilas, por lo cual puede considerarse el método más económico. Para el caso de la temperatura, un aumento en la capacidad máxima de calentamiento puede exigir mayor capacidad del hogar de la caldera o una caldera adicional, cuyo costo sería en ambos casos mayor que cuando se alteran las condiciones de HR, pero menor que cuando se modifica la velocidad del aire, ya que la energía eléctrica consumida por los ventiladores es aproximadamente proporcional al cubo de la velocidad del aire.

4.2.4 La humedad en la madera

Cuando el árbol está recién cortado, su madera contiene gran cantidad de agua, variando el contenido según la época del año, la región de procedencia y la especie. Forestal. El agua contenida en la madera se encuentra bajo diferentes formas (agua libre, agua de saturación o higroscópica y agua de constitución).

El agua libre se encuentra ocupando las cavidades celulares o lumen de los elementos vasculares, dándole a la madera la condición de verde. La cantidad de agua libre que puede contener una madera está limitada por su volumen de poros.

Al iniciarse el secado, el agua libre se va perdiendo fácilmente por evaporación, ya que es retenida por fuerzas capilares muy débiles, hasta el momento que ya no contiene más agua de ese tipo. En este punto la madera está en lo que se denomina “Punto de Saturación de las fibras” (PSF). Cuando la madera ha alcanzado esta condición, sus paredes están completamente saturadas pero sus cavidades están vacías.

Durante esta fase de secado, la madera no experimenta cambios dimensionales, ni alteraciones en sus propiedades mecánicas. Por tal razón, el PSF es muy importante desde el punto de vista físico-mecánico y de algunas propiedades eléctricas de la madera.

El agua de saturación o higroscópica es la que se encuentra en las paredes celulares, es evaporada por difusión, y la pérdida de humedad ocurre con más lentitud hasta llegar a un estado de equilibrio higroscópico con la humedad relativa de la atmósfera circundante.

Para la mayoría de las especies el equilibrio higroscópico está entre el 12 y 18% de contenido de humedad, dependiendo del lugar donde se realiza el secado. La madera secada al aire libre sólo puede alcanzar estos valores de contenido de humedad de equilibrio. Para obtener contenidos de humedad menores, debe acudir al secado artificial para eliminar el resto de agua higroscópica.

El agua de constitución forma parte de la materia celular de la madera y que puede ser eliminada utilizando las técnicas normales de secado. Su separación implica la destrucción parcial de la madera.

Determinación del Contenido de Humedad de la Madera

La determinación del contenido de humedad en la madera se hace considerando sólo los valores de agua libre y de saturación. Es decir, que en la práctica, la madera se considera totalmente seca cuando al secarla en estufa a 103 ± 2 °C alcanza peso constante.

El contenido de humedad se define como el peso de la cantidad de agua presente en una pieza de madera, expresado en función del peso de esa pieza en condición seca al horno o anhidra. Su valor se expresa en porcentaje y se calcula por medio de la siguiente fórmula:

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

Donde: CH = Humedad de la madera expresada como un porcentaje de su peso

Ph = Peso de la madera en estado húmedo o peso inicial

Ps = Peso de la madera en estado anhidro; peso final o constante

Para determinar el contenido de humedad en la madera existen numerosos procedimientos, siendo los más aceptados el método de secado en estufa y los métodos eléctricos que utilizan detectores de humedad.

El *método de secado en estufa* es el más exacto y el único científicamente satisfactorio para determinar el agua contenida en la madera.

El éxito en la aplicación de este método depende de la correcta selección de muestras o probetas de desecación, las cuales deben ser representativas del lote de madera objeto de evaluación. El procedimiento es el siguiente.

Obtención de las probetas o muestras de control: de la pieza o tabla se corta un listón transversal de 15 a 20 cm. de espesor en la dirección del grano y a unos 50 cm del extremo de la pieza. Las muestras deben estar sanas y libres de defectos.

Determinación del peso húmedo o peso inicial: inmediatamente después de cortadas, las probetas deben pesarse en balanzas con una precisión de 0,1g para aquellas que pesan 100 gr o más y de mayor sensibilidad para probetas más pequeñas.

Secado de las probetas hasta peso constante: luego se introducen las probetas en la estufa para proceder con el secado. Se recomienda el uso de estufas con termostato regulable para mantener la temperatura a 103 ± 2 °C y con buena circulación de aire.

Determinación del peso seco (peso constante): para determinar el momento en que las probetas alcanzan peso constante, se hacen pesadas intermedias con el fin de observar la disminución del peso. Después del secamiento, las probetas deben sacarse lo más rápidamente posible para evitar que absorban humedad del aire. De igual manera, para eliminar cualquier variación deben enfriarse en un ambiente absolutamente seco, que puede ser un desecador con cloruro de calcio o pentóxido de fósforo.

4.2.5 Cálculo de contenido de humedad.

Ejemplo: calcule el contenido de humedad promedio de dos probetas o secciones de humedad cuando:

| | | |
|--------------------------|---|---------|
| Peso verde de la sección | a | 98,55 g |
| Peso seco de la sección | a | 59,20 g |
| Peso verde de la sección | b | 86,92 g |
| Peso seco de la sección | b | 55,02 g |

$$\text{Contenido de humedad de la sección a} \quad \text{Contenido de humedad de la sección b}$$
$$CH_a = \frac{98,55 - 59,20}{59,20} * 100 = 66,47\% \quad CH_b = \frac{86,92 - 55,02}{55,02} * 100 = 57,98\%$$

El contenido de humedad promedio de las secciones a y b es

$$CH = \frac{66,47 + 57,98}{2} = 62,22\%$$

La medición del contenido de humedad de la madera por métodos eléctricos tiene su base en las diferentes propiedades eléctricas de la madera seca y de la madera húmeda, tanto en relación a la conductividad eléctrica, como a la constante dieléctrica y a la pérdida de potencia.

Específicamente la resistencia eléctrica y las propiedades dieléctricas de la madera dependen, en una forma bien definida, de su contenido de humedad, sobre todo en el rango de 6 a 25% de contenido de humedad.

Los aparatos eléctricos que emplean la relación entre humedad y resistencia son los llamados “tipo resistencia”; aquellos que emplean la relación entre el contenido de humedad y constante dieléctrica se conocen con el nombre “tipo de capacidad” y los aparatos que se basan en la relación entre el contenido de humedad y pérdida de fuerzas de radiofrecuencia se conocen con el nombre de “tipo radio frecuencia”.

Los del tipo resistencia se fabrican con electrodos cortos o largos, del tipo de aguja, aislados en toda su longitud menos en las puntas. Los medidores tipo radiofrecuencia por pérdida de potencia son fabricados con electrodos de contacto que se aplican a la superficie de madera sin perforarla; se utilizan para chapa o madera muy delgada.

4.3 Muestras para el control del secado

4.3.1 Control Manual

A medida que la madera se va secando, desarrolla esfuerzos que siguen un patrón asociado con los cambios de humedad. Como no es posible medir la humedad de toda la madera durante el proceso, es necesario acudir a muestras representativas de la carga. Estas muestras se colocan dentro de la pila, de forma que se pueda determinar su contenido de humedad periódicamente.

Si bien es necesario dañar algunas piezas de madera para obtener las muestras y se requiere tiempo y trabajo para efectuar el control, estos inconvenientes son recompensados por las ventajas que ofrece poder controlar la humedad durante el proceso. Entre ésta, es importante mencionar:

Indican la velocidad del secado Permiten detectar fallas que afectan la eficiencia de las cámaras Sirven para ajustar el programa de secado y los cambios climáticos Indican la necesidad de tratamientos de recuperación o acondicionamiento y la duración de ellos Ayudan a reducir los tiempos de secado y a mejorar la calidad Permiten controlar el contenido de humedad final Ayudan a determinar los horarios de secado

Estas ventajas se resumen en economía, madera libre de esfuerzos y humedad final más uniforme.

4.3.2 Determinación del Contenido de Humedad y del Peso Seco al Horno de las Muestras

El contenido de humedad de la muestra de secado se obtiene del promedio de las dos probetas cortadas de cada uno de los dos extremos, utilizando el sistema de secado en estufa. Para tal efecto, después de cortadas, las probetas se limpian, marcan y pesan; luego se colocan dentro de una estufa con temperatura de 103 ± 2 °C hasta obtener peso constante; se determina su contenido de humedad según la fórmula.

Inmediatamente después de cortada, la muestra de secado se limpia, se codifica, se sella en sus dos extremos con un producto impermeabilizante y resistente a la temperatura y se pesa. Dicho peso corresponde al peso inicial o verde de esa muestra. El peso final o peso seco al horno (PSH) de la muestra se calcula en función de su peso inicial y su respectivo contenido de humedad (CH promedio de las probetas) utilizando la fórmula de CH convenientemente despejada:

$$PSH = \frac{Ph}{CH + 100} * 100$$

Donde Ph= es el peso inicial de la muestra testigo

Ejemplo: calcular el peso seco al horno de la muestra testigo, siendo su peso inicial de 5,12 kg, utilizando el contenido de humedad promedio calculado de las secciones de humedad 1 y 2.

$$\text{PSH de la muestra} = \frac{5,12 \text{ kg}}{62,22 + 100} * 100 = 3,156 \text{ kg}$$

4.3.4 Colocación de las Muestras de Secado en las Pilas.

Una vez que las muestras testigos han sido cortadas, revestidos sus extremos y pesadas, se colocan en las cargas o paquetes de madera aserrada durante las operaciones de apilado. Dado que las muestras testigos representan al lote que se está secando, deben estar expuestas a las mismas condiciones de secado, ya que de otra manera darán una indicación falsa del porcentaje de contenido de humedad de la carga.

4.3.5 El Uso de las Muestras Testigo Durante el Secado

Cuando el secado avanza, las condiciones climáticas de la cámara varían tomando como base el porcentaje de humedad de las muestras, en diferentes momentos del proceso. La frecuencia con que las muestras se pesen depende de la velocidad de pérdida de humedad: cuanto más rápida sea la pérdida, más frecuente serán las pesadas. Pero inmediatamente se realiza la pesada, las muestras deben ser colocadas nuevamente en la carga. Las muestras también se utilizan para hacer pruebas intermedias de humedad y controles de tensión mediante pruebas de tenedor.

Para determinar el CH actual de una muestra, se requieren dos pesos: el peso actual y el peso seco al horno calculado. La fórmula utilizada es la siguiente:

$$\text{CH actual} = \frac{Ph - PSH}{PSH} * 100$$

Donde Ph es el peso actual de la muestra y PSH es el PSH calculado de la muestra.

Así, si el peso seco al horno calculado de la muestra es 3,156 kg y su peso actual es 4,52 kg. El porcentaje de humedad actual será:

$$\text{CH actual} = \frac{4,52 - 3,156}{3,156} * 100 = 43,22\%$$

Después de otro día de secado esta muestra puede pesar 4,20 kg. El CH actual de la muestra entonces sería.

$$\text{CH actual} = \frac{4,20 - 3,156}{3,156} * 100 = 33,08\%$$

Cuando el contenido de humedad actual se utiliza para controlar la aplicación de un programa de secado, cada cambio de etapa se hace cuando el contenido de humedad promedio de las muestras es igual al contenido de humedad fijado por el programa.

A través del uso de estas muestras se puede calcular el peso que tendrá la misma cuando tenga cierto contenido de humedad. Empleando la fórmula:

$$Pa = \frac{Psh(CH + 100)}{100}$$

Ejemplo: calcular el peso de la muestra anterior cuando alcance un CH de 10%.

$$Pa = \frac{3,156kg(10 + 100)}{100} = 3,472kg$$

Sucede con frecuencia que algunas muestras no siguen el ritmo de pérdida de humedad del resto. Si se descarta el mal funcionamiento de la cámara, se puede suponer entonces que el cálculo inicial del peso seco fue erróneo. En tales casos, conviene proceder a recalcularlo de la forma siguiente: recortar una porción de 10 a 15 cm en uno de los extremos, sacar una probeta de unos 25 mm y sellar el extremo resultante para luego pesar la muestra sobrante; con la probeta de humedad obtenida volver a obtener el CH y con éste recalcularlo el nuevo peso seco de la muestra que servirá para el control del secado. Esta prueba se aconseja realizarla cuando se haya alcanzado un 20% de CH o cuando se estime que se ha llegado a la humedad final, antes del acondicionamiento.

Para algunas maderas propensas al colapso y endurecimiento es conveniente hacer un chequeo de tensiones cuando su contenido de humedad ha llegado al punto de saturación de las fibras. En tal caso, se procede de la siguiente forma: a una distancia de 10 a 15 cm de uno de los extremos de la muestra se cortan dos probetas de 25 a

30 cm de ancho; una de las probetas se utiliza para determinar el contenido de humedad y la otra para efectuar la prueba de tenedor. La muestra testigo recortada debe pesarse para calcular su nuevo peso seco al horno.

Contenido de Humedad Final, Prueba de Esfuerzos y Gradiente de humedad

Cuando se ha llegado a la humedad final, se han aliviado tensiones mediante acondicionamiento y la carga se ha sacado de la cámara, se utilizan las muestras de control de humedad para confrontar la humedad final y determinar la efectividad del acondicionamiento. Para ello, de la parte central de la muestra se cortan 3 probetas, cada una de 25 a 30 mm de ancho, una se destina a determinar, por el método de secado en estufa, el CH final; la otra a la prueba de

tenedor para reconocer el estado de tensiones de secado; y la tercera para establecer el gradiente de humedad.

El procedimiento utilizado para conocer la distribución de humedad al interior de la pieza de madera es el siguiente: después de cortadas, se pesan separadamente las partes externas, intermedias e internas obtenidas de la probeta. Luego se llevan a la estufa hasta alcanzar su peso seco al horno. Con los datos del peso inicial y el peso seco al horno se calculan los contenidos de humedad correspondientes a las tres diferentes partes de la sección transversal de la pieza. Cuando el secado ha sido normal, incluyendo el periodo de acondicionamiento, la diferencia de humedad entre las partes externas y central no deben ser significativas (no mayores que 20%). En caso contrario, se presentarán deformaciones cuando la madera sea cortada.

La prueba de tenedor, se realiza para detectar las tensiones de secado, si el espesor de la madera es menor que 4cm se hacen dos cortes paralelos a la superficie correspondiente al ancho de la tabla, para obtener de este modo tres dientes y dejar dos después de eliminar el diente central. Si la madera en secamiento es mayor de 4cm se hacen cinco cortes, para obtener seis dientes y dejar cuatro después de eliminar el segundo y el quinto.

La dirección en la cual los dientes se orientan nos dirán como es el comportamiento de la madera. (1) Si las puntas exteriores se curvan hacia dentro considerablemente, la madera está sometida a tensiones. (2) Si las puntas exteriores están derechas, la madera está libre de tensiones, y (3) las puntas exteriores se han doblado hacia fuera considerablemente, la madera está sometida a una inversión de tensiones.

Cuando obtenemos el resultado (1), el acondicionamiento debe ser prolongado por algún tiempo. El resultado (3) nos indica que las cargas subsiguientes deben ser acondicionadas con una ligera mayor depresión del bulbo húmedo, o por un periodo de tiempo más corto.

Capítulo V: Diseño y funcionamiento del horno de secado solar.

5.1 Diseño y funcionamiento del horno de secado solar.

Las secadoras solares son cámaras que tienen la capacidad de almacenar el calor que es generado por la incidencia de los rayos solares sobre un colector de temperatura. La idea es que el calor que se genera sea útil en el proceso de secado de la madera.

Las cámaras de secado tienen dos partes fundamentales: la primera se ubica en la parte superior de la cámara y es la responsable de que el aire se caliente; la segunda es el área de apilado de la madera que se requiere secar (Figura 5).

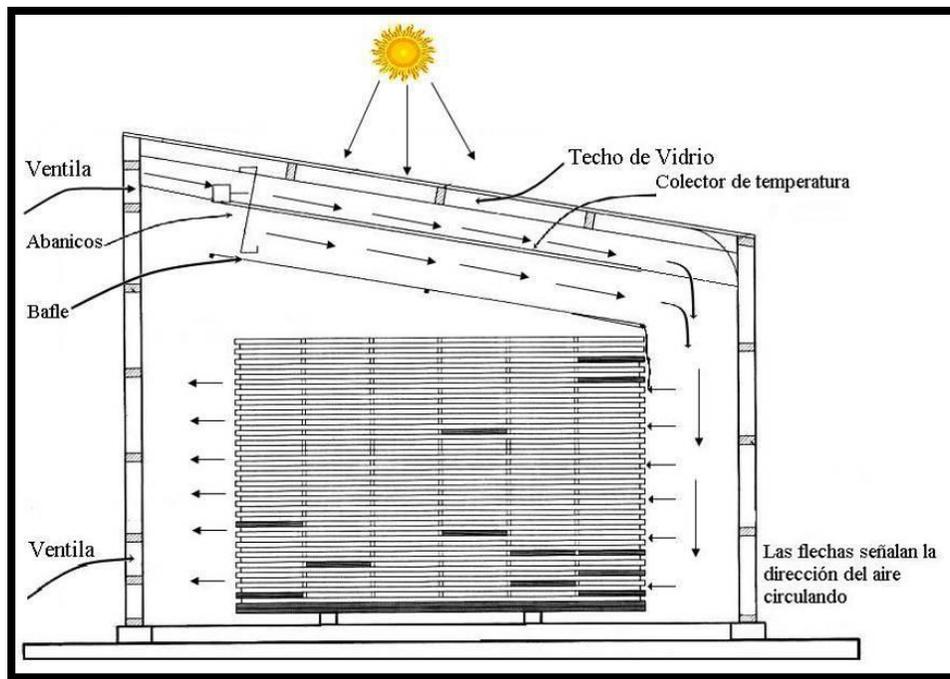


Figura 5. Principio general de un secador solar para madera, Cartago

El principio de funcionamiento de una secadora solar es simple. Una vez que el aire se calienta a lo interno de la secadora, ese aire se pone a circular entre la madera gracias a un sistema de ventiladores.

La masa de aire caliente se hace circular continuamente a través de la madera con el fin de que esta se caliente. Al elevar la temperatura el material empieza a liberar el agua que contiene y por ende se seca. Esto permite que la madera descienda sus contenidos de humedad a los niveles deseados, según sean las

necesidades de la industria. Las secadoras solares a pesar de que son muy simples en cuanto a diseño y funcionamiento, permiten y a la vez requieren de algún grado de control de las condiciones internas de temperatura y humedad relativa. Esto es posible gracias a la instalación de ventanas o ventilas que permitan intercambiar el aire húmedo de la cámara por aire más seco del exterior de la cámara.

51.1 Posición de la secadora solar

La posición de un secador solar depende de la incidencia de los rayos solares. Por ello, en primera instancia deben orientarse de norte a sur, para el caso de estudio del horno solar en el Taller Escuela PIMA (Programa Institucional de la Madera), el cual está ubicado en Managua Nicaragua pues el país se ubica en el Hemisferio Norte.

La caída o inclinación del techo, en el caso de Nicaragua, debe ser hacia el sur, de tal forma que se asegure la incidencia de los rayos solares lo más perpendicularmente posible, a lo largo del año. El grado de inclinación va a corresponder con la latitud del país. Para el caso de Nicaragua esa inclinación es de 10%. Esta inclinación permite que la variación en el ángulo de incidencia de los rayos solares en las diferentes épocas del año, no afecte la eficiencia en la captación de la energía sobre el techo y el colector de la secadora.

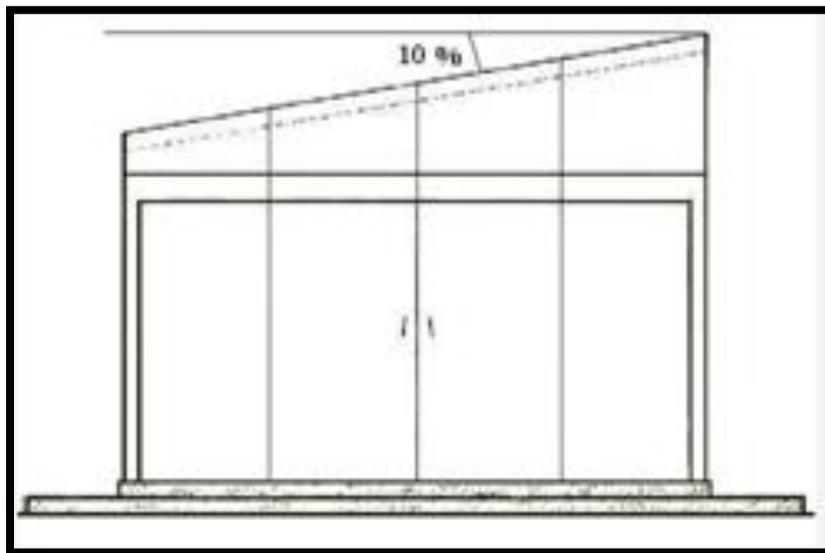


Figura 5.1. Con respecto a la incidencia de los rayos solares, Cartago

5.1.2 Tamaño y capacidad del secador solar

Cuando se diseña y construye una secadora solar, hay que considerar que el tamaño óptimo de la cámara está en función de la demanda de volumen de madera seca que requiere determinada industria.

La experiencia en Honduras indica que no es conveniente construir secadoras con capacidades superiores a los 15 m³ (Benítez y Calderón, 1993), pues cuanto más grande sea la cámara menos eficiente es el secado.

Otro aspecto a considerar es el ancho de la secadora. El diseño debe garantizar una uniformidad en la circulación de la masa de aire a través de la pila de madera que se pretende secar. Es por ello que se recomienda que las secadoras no superen los 5 m de ancho (Benítez y Calderón, 1993)

Una secadora que tenga 3.5 m de ancho y 3.5 m de largo con una altura máxima de 3 m permite apilar una carga de madera de 6.6 m³ (Figura 5.2)



Figura 5.2 Secadora solar con capacidad máxima de 6 m³ instalada en el Instituto Tecnológico de Costa Rica en Cartago.

5.1.3 Sistema de aislamiento

El objetivo del aislamiento del calor es lograr la máxima diferencia entre la temperatura interna de la cámara y la temperatura ambiental. Para ello, la selección de materiales para el techo y paredes es fundamental. La experiencia indica que la selección de materiales, debe garantizar que la diferencia mínima entre las temperaturas externas e internas sea de al menos de 10°C, según Benítez y Calderón (1993).

El techo debe construirse con un material transparente. Entre los que tienen esa propiedad, el vidrio es el que mejores resultados brinda. En el caso de las paredes, se puede usar madera, block, ladrillo, hierro galvanizado o esmaltado, etc.

Cuando la estructura de las paredes es construida con madera, hierro galvanizado o esmaltado, el aislante térmico interno es de vital importancia pues se requiere evitar la fuga de la temperatura. En el mercado el que mejores resultados brinda, por costo y calidad, es la fibra de vidrio flexible. Este material debe cubrir al máximo los espacios entre el forro interno y externo de la secadora (Figura 4). Por otra parte, es necesario asegurarse de que las puertas de acceso cuenten con un material aislante entre el marco y las paredes de la puerta y de las ventilas. En ambos casos se puede usar láminas de hule comercial.

5.1.4 componentes básicos del horno secador

El diseño de una secadora solar debe incluir al menos cuatro componentes: techo, colector, ventiladores y ventilas. Cada uno de estos contribuye a asegurar un funcionamiento adecuado y garantiza la eficiencia y la calidad en el secado.

Techo

El techo de una secadora solar es un componente que requiere de gran atención, ya que es precisamente a través de él que se capta la energía solar que calentará el aire interno de la cámara, el cual es el responsable del secado de la madera. Para su construcción se puede utilizar vidrio o láminas

transparentes; dando mejores resultados el vidrio. La energía solar pasa a través del vidrio utilizando la onda corta y una vez que lo atraviesa la energía no puede escapar ya que se refleja en forma de onda larga, la cual queda atrapada en la cámara y produce un efecto invernadero a lo interno de la cámara.

Colector

El colector debe ubicarse entre el techo y la pila de madera. La función de este componente es capturar la energía solar, la cual se transforma en calor y se transmite al aire, lo que produce que este se caliente. Además, la presencia del colector impide que los rayos del sol incidan directamente sobre la madera que se pretende secar, evitándole daños a la superficie como las grietas y la decoloración.

Los colectores pueden construirse con láminas de zinc, corrugadas o lisas, pero este tipo de material por su espesor se enfría rápidamente en ausencia de los rayos solares. Debido a esto es mejor utilizar una lámina de hierro pintada en color negro mate de al menos 3 mm de espesor. El espesor de la lámina, combinado con su color negro mate, permite aprovechar al máximo la energía solar capturada.

Ventiladores

La energía solar capturada en el colector debe ponerse en movimiento a lo interno de la secadora, a fin de que ese aire caliente circule entre la pila de madera que se va a secar. Ese movimiento debe ser propiciado por ventiladores que se colocan dentro de la cámara de secado. El aire caliente que circula entre la pila de madera, absorbe la humedad contenida en la madera y es por ello que se produce el secado.

El tamaño de las aspas y la capacidad del motor de los ventiladores, depende básicamente de la cantidad de madera que se va a secar. Esto significa que tendrán que instalarse la cantidad de ventiladores necesarios para que haya un movimiento uniforme de la masa de aire interna, a través de la pila de madera.

La velocidad promedio del aire a través de la pila de madera que se seca debe

estar entre 1.0 y 2.0 m/s, (Benítez y Calderón, 1993). Si se tiene una velocidad más baja, el secado no es eficiente y si la velocidad es más alta, se pueden causar daños severos a la madera, como reventaduras e incluso grietas.

Idealmente, se deberían instalar abanicos que puedan invertir el giro para así permitir circulación de aire en determinado momento por ambos costados de la pila de madera. Se promueve con ello una homogeneidad del contenido de humedad final de ésta en proceso de secado (Figura 6).

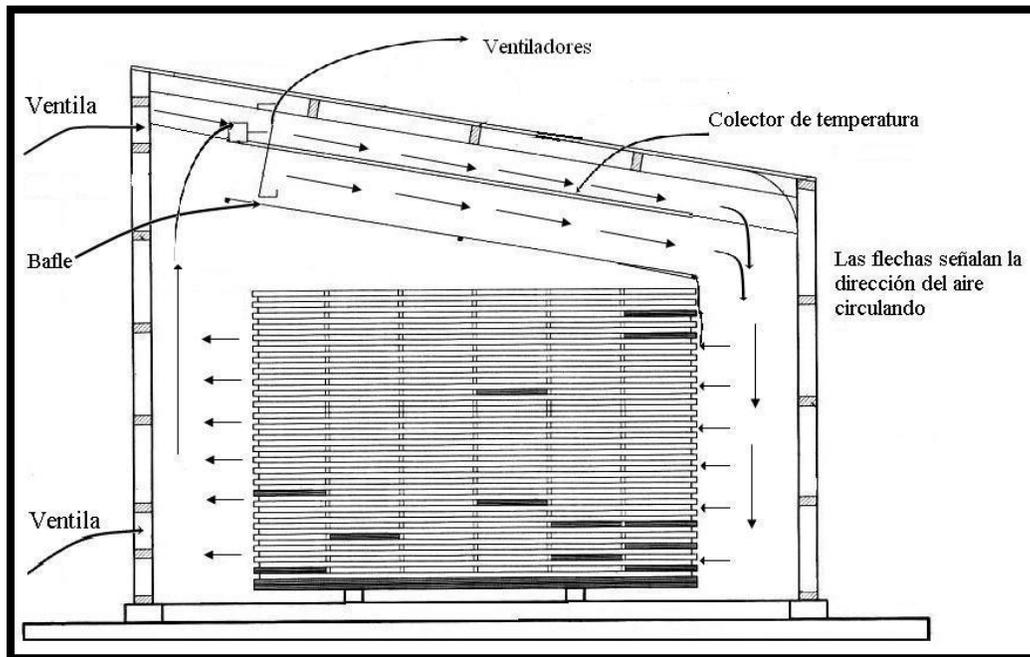


Figura 5.3. Movimiento del aire caliente a través de la pila de madera,

Ventilas

El aire caliente que circula a través de la pila de madera recoge la humedad que hay contenida en la madera, esa humedad llega a saturar el aire caliente y eleva la humedad relativa a lo interno de la secadora. Cuando esto ocurre, el secado se estanca y si esa humedad no se saca de la secadora se corre el riesgo de que el proceso de secado se detenga, e incluso, que la humedad retorne a la madera. Para evitar esto, el diseño de la secadora debe contemplar la existencia de ventilas o ventanas que se ubiquen en la paredes y que permitan aperturas controladas para que se dé intercambio entre la humedad ambiental fuera de la

cámara y la interna. Estas ventilas sólo se abren cuando la humedad relativa interna de la cámara es más alta que la externa. Debido al movimiento del aire que producen los ventiladores y la presión interna y externa a la cámara, una porción del aire caliente y cargado de humedad sale y otra porción menos húmeda y más fría entra para sustituir el aire que sale.

Con este procedimiento se asegura bajar la humedad relativa interna del aire de la cámara, pero también se sacrifica un poco de temperatura a lo interno de ésta. La saturación de humedad del aire interno a la cámara se intensifica durante las noches, cuando el aire es más frío. El momento idóneo para abrir las ventilas es bien temprano en las mañanas, cuando aún el sol no ha calentado lo suficiente el aire interno de la cámara. De esa manera la pérdida de temperatura es mínima.

Materiales de construcción

Las características primordiales de los materiales para construir la secadora no son diferentes a los requeridos para cualquier otro tipo de construcción. Se busca que el material esté disponible cerca del lugar de construcción para disminuir el costo de traslado. Además, se espera que ese material sea del menor costo posible.

La principal característica de los materiales de construcción es que deben mantener el calor a lo interno de la cámara de secado, se busca que éstos aseguren un aislamiento térmico adecuado y que sean de larga duración.

Cimientos

La estructura de la secadora debe montarse sobre un cimiento que asegure aislamiento de temperatura y humedad proveniente del suelo. Aunque el área mínima de cimiento que debe existir en la secadora es la misma área de la secadora solar, se sugiere que se incluya un área de preapilado que sea de un área al menos igual al área de la secadora.

La calidad del concreto a utilizar para asegurar el soporte a la secadora, y la circulación de la maquinaria pesada (tractor, montacargas, entre otros), debe ser de 210 kg/cm^2 de resistencia mínima al esfuerzo.

Paredes de puertas y ventanas

Para la construcción de paredes, puertas y ventanas se sugiere que se utilice la madera como estructura principal. Como forro externo e interno, se recomienda el hierro galvanizado número 26, que está ampliamente disponible en el mercado nacional. Si se quieren acabados más estéticos, se puede usar lámina corrugada como forro externo y lámina lisa como forro interno. También se puede usar el hierro esmaltado número 26, aunque el costo de este es mayor; pero este último tipo de material tiene la ventaja de que no se corroe o herrumbra como el galvanizado.

El aislante térmico es indispensable en estos casos, por lo que se sugiere el uso de fibra de vidrio flexible (lana de fibra de vidrio). Este material debe cubrir todo el espacio que hay entre los forros internos y externos.

Este material se consigue en el mercado nacional con facilidad y está disponible en diferentes espesores según sean las necesidades o especificaciones técnicas del secador a construir.

Techo

A continuación se brinda un análisis de ventajas y desventajas de los diferentes tipos de materiales para construir el techo de una secadora solar. Materiales usados en la construcción de techo de secadoras solares.

Entre todos estos materiales, el más recomendable para construir el techo es el vidrio. Sin embargo, al instalarlo debe realizarse con cuidado y precisión para evitar que se quiebre. Además, debe sellarse muy bien las juntas o uniones, utilizando materiales como la silicona, para evitar filtraciones de agua. Para un mejor manejo se recomienda que el techo se coloque en cuadros de 0.80 m^2 y utilizando vidrios de 4 mm de espesor.

Colector

Aunque el colector solar se puede construir con hierro galvanizado, para mejores rendimientos se sugiere la lámina de hierro de 3 a 4 mm de espesor pintada en color negro mate. Este colector debe cubrir toda el área en donde se pretende apilar la madera que se va a secar.

Ventiladores

Para secadoras solares cuya área interna en la cámara sea de 3.5 m x 3.5 m, se sugiere la instalación de dos ventiladores con aspas que tengan un diámetro de 45 cm, 1700 rpm, con motor de 0.33 Hp y para conectar en 110 ó 220 voltios, según voltaje disponible. Es deseable que se pueda conseguir en el mercado motores que permitan doble giro para dar movimiento de la masa de aire en ambos costados de la pila de madera.

5.2 Prototipo de secado solar de madera

Para ejemplificar un diseño de secadora solar, se presenta a continuación el modelo de secadora construido por la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica, el cual puede servir de guía para la construcción de secadoras solares que se adapten a los recursos financieros y a las necesidades de cada industria. Este modelo fue diseñado por el Ing. Rafael Córdoba Foglia.

A continuación se presentan los planos que ejemplifican las características del secador solar en cuanto a:

1. Cimiento
2. Techo
3. Vistas laterales

1. Cimientos

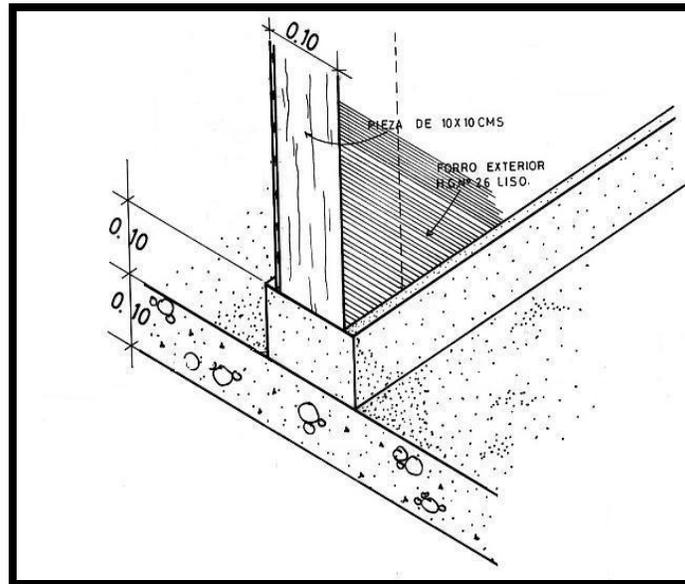


Figura 6: cimientos para unión con estructura

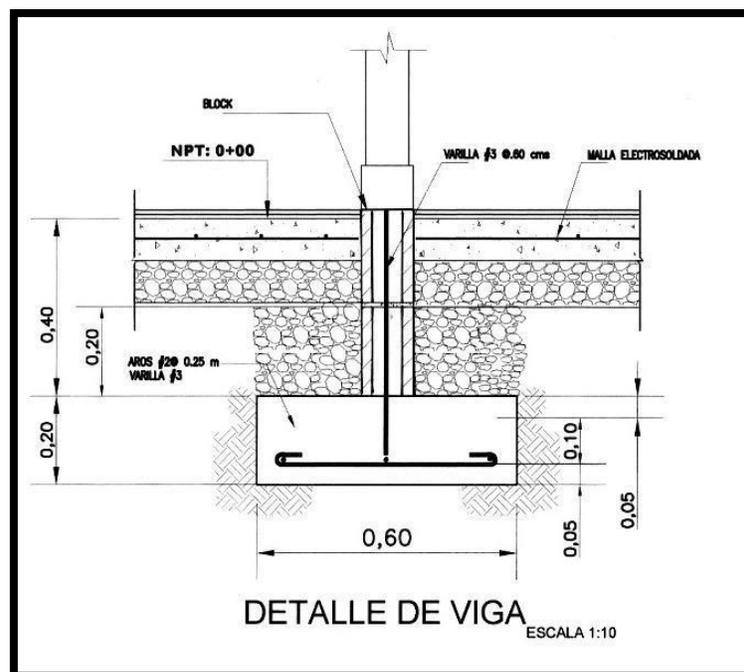


Figura 6.1: fundición para cimientos

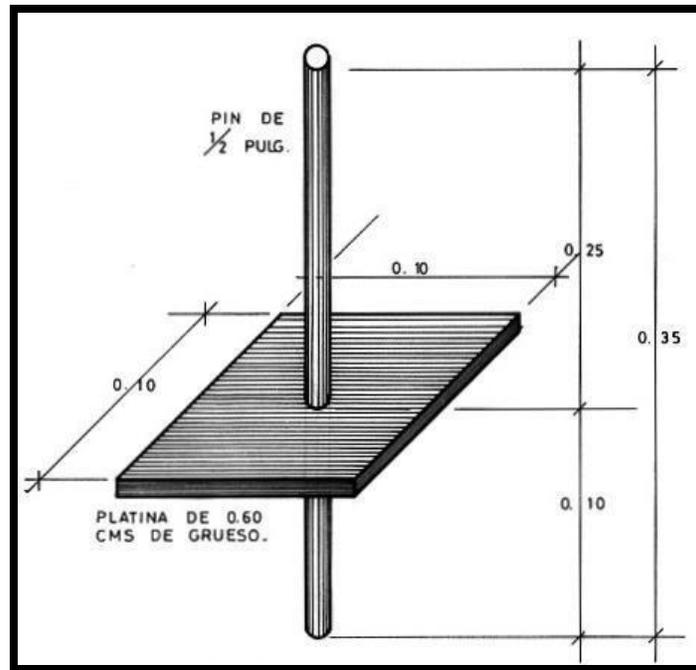


Figura 6.2: Detalles del pin de anclaje

2. Techo

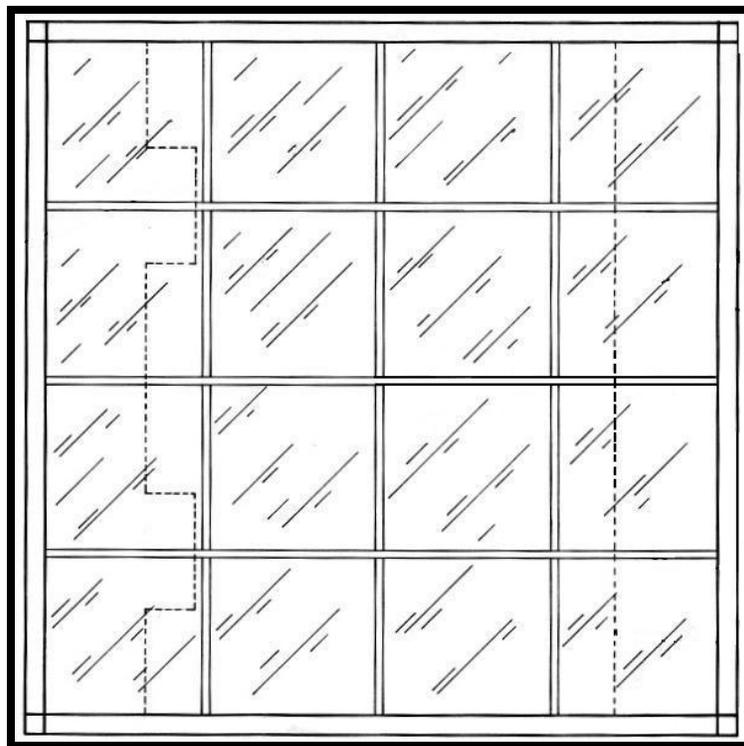


Figura 6.3: Vista superior del techo

HORNO SECADOR DE MADERA CON TECNOLOGÍA ECONÓMICA Y AMIGABLE CON EL MEDIO AMBIENTE, QUE FUNCIONE DE ACUERDO A LAS NECESIDADES Y REQUERIMIENTOS DEL PROGRAMA INSTITUCIONAL DE MADERA (PIMA)

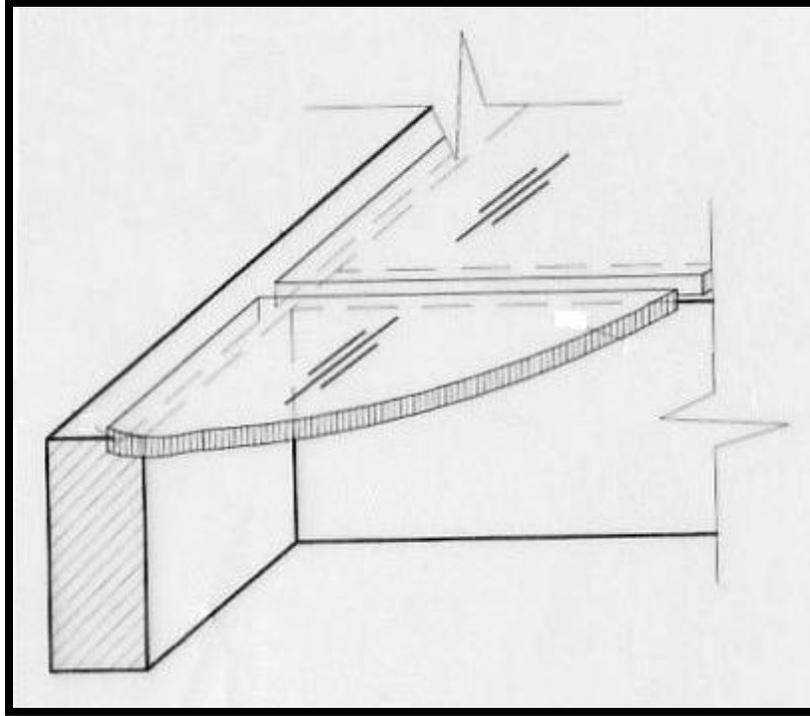


Figura 6.4: Detalle de la colocación del vidrio



Figura 6.5: Vista superior del techo instalado

5.3 Costos

Se presentan los costos de la construcción de la secadora según el diseño mostrado y confeccionado en octubre del 2007. Debe aclararse que estos costos pueden rebajarse si algunos materiales se cambian por otros más económicos.

Costos de construcción de un modelo de secado solar de 6 m3 de madera.

| Rubro | Valor (US\$)1 | Porcentaje |
|------------------------|---------------|--------------|
| Mano de obra | 2884.6 | 39.9 |
| Cimiento | 564.4 | 7.8 |
| Paredes, puertas y | 1945.8 | 26.9 |
| Techo y colector | 765.8 | 10.6 |
| Ventiladores y sistema | 1016.5 | 14.1 |
| Costos administrativos | 46.2 | 0.6 |
| Total | 7223.3 | 100.0 |

Tabla 3: costo de construcción

Relación de cálculo: 1US\$=27C\$

Como se observa en el cuadro anterior, sin contar la mano de obra, la construcción de paredes puertas y ventanas, los ventiladores y el sistema eléctrico, así como el techo y el colector resultan los elementos construcción más caros. Sin embargo, debe considerarse que son precisamente estos los que aseguran la calidad de la secadora.

La inversión de instalar un horno convencional para secado es de aproximadamente 50 000 US\$, es decir un 85.5% más cara que la inversión de construir una secadora solar, esto sin incluir los costos de de la energía para el funcionamiento de la secadora, que en el caso del horno convencional son bastante elevados.

Se estima la vida útil del secador en 30 años. Si los ventiladores trabajan 24 horas al día y realizan

24 cargas al año pueden tener una vida útil de 4 años. Los costos de operación se detallan a continuación.

5.4 Costos de operación por metro cúbico.

| Rubro | Costo (¢/m3) | Costo (US\$/m3) ¹ |
|-----------------------------|----------------|------------------------------|
| Edificio (30 años) | 941.6 | 1.8 |
| Ventiladores (4 años) | 609.7 | 1.2 |
| Inversión inicial en | 59.5 | 0.1 |
| Mano de Obra | 2481.6 | 4.8 |
| Energía eléctrica (1.1 | 408.5 | 0.8 |
| Costos de mantenimiento | 204.2 | 0.4 |
| Costo de materiales | 18.9 | 0.04 |
| Equipo de control (10 años) | 980.4 | 1.9 |
| Subtotal | 5704.4 | 11.04 |
| Costo de capital (18%) | 6121.08 | 11.77 |
| Total | 11825.5 | 22.83 |

Tabla 4: Costo de operación

Relación de cálculo: 1US\$= 27 C\$

El secado de madera en horno convencional cuesta en el mercado nacional ¢30 954/m³ (¢67/pmt)³. Haciendo la inversión completa en equipamiento e infraestructura de una secadora solar, se asegura una recuperación a los 36 meses de realizada la misma, con un costo de capital de 18% anual.

Los costos de secado en la secadora de horno convencional son de ¢20 000/ m³ sin considerar el costo de capital (Córdoba, 2008 comunicación personal), mientras que en la secadora solar es de

¢5 692.4/ m³, es decir, el costo se reduce en 71.5%.

Aunque el secado al aire libre sigue siendo una opción, es importante considerar que los porcentajes de humedad que se obtienen del secado al aire llegan entre el 18 y el 24%, mientras que en la secadora solar pueden llegar entre el 8% y 12%. Aunque esta diferencia puede parecer mínima, en términos de mercados como el mueblero, puertas y juguetes, entre otros, esa reducción en los contenidos de humedad es significativa en cuanto a calidad del material para trabajar.

Conclusiones

- ✓ Es recomendable utilizar la técnicas de secado solar ya que en los países tropicales debido a la caracterización de su clima resulta ser una gran ventaja desde el punto de vista de inversión inicial además en la etapa de operación los costos son menores debido alternativa de consumo energético
- ✓ El principio de funcionamiento de los hornos solares resulta conveniente utilizando la función del efecto invernadero debido al impacto de la radiación solar eliminado de esta manera los volúmenes de agua contenida en la estructura de la madera.
- ✓ La transferencia de calor para los diferentes aislantes términos estudiados en base a sus propiedades de conductividad térmica, densidad, su temperatura de operación resultaron satisfactorios, cabe mencionar que dicha información recopilada servirá como base para la selección de los materiales adecuados a la hora del diseño del prototipo propuesto para el PIMA.
- ✓ Según el estudio de los factores que afectan las pérdidas de humedad relacionados con la estructura de la madera y las variables inmersas en ello, es necesario realizar un control de secado manual para de esta manera poder determinar los contenidos de humedad y pesos específicos para la realización del diagnostico de las diferentes especies maderables a evaluar según los requerimientos del PIMA.
- ✓ El diseño propuesto para la construcción de la cámara de secado así como cada uno de sus componentes fue elaborado en base al horno solar construido por la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica en Cartago diseño que servirá como prototipo para fines experimentales en el Programa Institucional de la Madera (PIMA).

Recomendaciones

- ✓ Antes de efectuar la inversión en la construcción de una secadora solar es importante que se evalúen las necesidades de materia prima, con el fin de construir la secadora según las necesidades óptimas del usuario.

- ✓ Al diseñar y construir una secadora solar, el aislamiento térmico es de vital importancia para asegurar la calidad de la secadora.

- ✓ Si se comparan los costos del secado en horno convencional con el de secadora solar, esta última ofrece la ventaja de tener una inversión inicial relativamente baja. La inversión de instalar un horno convencional podría superar en un 85,5%, la inversión de construir una secadora solar.

- ✓ El uso de secadoras solares de madera es una tecnología de muy bajo costo, con utilización de una energía renovable muy abundante en los países tropicales como por lo que su implementación sería una alternativa de muy buena utilidad en las industrias forestales.

Bibliografía

1. Anaya, H.E. (1988).
2. "Utilización de la Energía Solar en un Procesador de Maderas Duras
3. ", Escuela de
4. Ingenieros en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San
Nicolás de Hidalgo. México.
5. Chan Martín, M. (1987).
6. "Algunas Características Tecnológicas de la Madera
7. ". Monografía, Facultad de
8. Ingeniería, UADY, México.
9. Magaña Alvarado, W. (1990).
10. "El Secado de la Madera"
- 11.. Monografía. Facultad de Ingeniería, UADY,
12. México.
13. Maldonado, E.D.; y Peck, E.C. (1967).
14. "Drying by Solar Radiation in Puerto Rico"
- 15.. Forest Products
16. Research Journal, Vol. 12. No.10. USA.
17. Manrique, José A. (1984). "
18. Energía Solar. Fundamentos y Aplicaciones Foto térmicas".
19. pp. 2-4 y 251-252.
20. Editorial Harla, México.
21. Pilatowski, I. (1980).
22. "Colector Solar Plano
23. ". Curso de Actualización de Diseño y Aplicaciones de
24. Colectores Solares Planos. IX Congreso de la Asociación Nacional de
Energía Solar. México.
25. Rodríguez Anda, R.; Fuentes T., F.; y Montes Ruelas, E. (1989
- 26.). "El uso de secadores solares en la
27. Industria de la madera".

28. Benítez, R.; Calderón, A. 1993. Secador solar para madera. Tegucigalpa, HO, CEMAPIF - CUPROFOR. 23 p. Helwa, N. 2004. Experimental evaluation of solar kiln for drying wood. *Drying Technology* 22(4):703-717.
29. Martínez-Pinillos, E. 1997. Diseño y ensayo de una secadora solar para madera. *Madera y Bosques* 3(2):13-
30. Simpson, W.T. 1992. Drying technology issues in tropical countries. Conference. *In* IUFRO (International Union of Forestry Research Organisations). *Forest Products* (1992, Nancy, FR). Proceedings of All-Division. Nancy, FR, IUFRO. p. 497–507.
31. Villalobos, J. 2007. Equinoccios y solsticios. (en línea). San José, CR, CIENTEC. Consultado 22 ago. 2007.
32. Disponible en <http://www.cientec.or.cr/astronomia/equinoccios.html>
33. Wright, J. 2003. Estudio de la variabilidad espacial y temporal de la heliofania relativa en Costa Rica. *Top.*
34. *Meteoro. Oceanog.* 10(1):20-30.

Anexos



Figura 6: Vista inferior del techo instalado

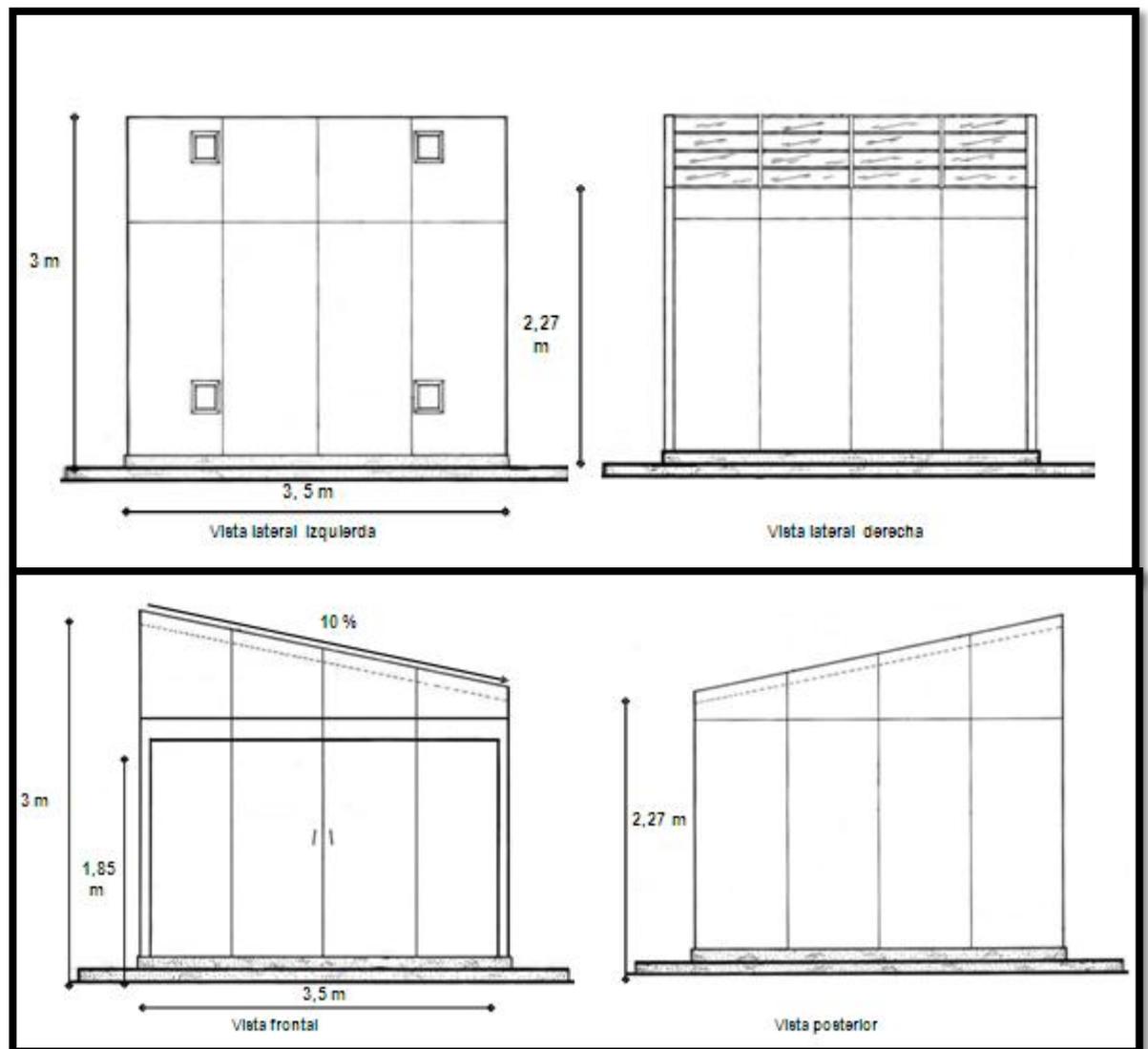


Figura 6.1: Vistas laterales, frontal y trasera de paredes

HORNO SECADOR DE MADERA CON TECNOLOGÍA ECONÓMICA Y AMIGABLE CON EL MEDIO AMBIENTE, QUE FUNCIONE DE ACUERDO A LAS NECESIDADES Y REQUERIMIENTOS DEL PROGRAMA INSTITUCIONAL DE MADERA (PIMA)



Figura 6.2: Vista frontal, Cartago



Figura 6.3: Ubicación e instalación e instalación del ventilador, Cartago

HORNO SECADOR DE MADERA CON TECNOLOGÍA ECONÓMICA Y AMIGABLE CON EL MEDIO AMBIENTE, QUE FUNCIONE DE ACUERDO A LAS NECESIDADES Y REQUERIMIENTOS DEL PROGRAMA INSTITUCIONAL DE MADERA (PIMA)



Figura 6.4: Vista lateral izquierda, Cartago

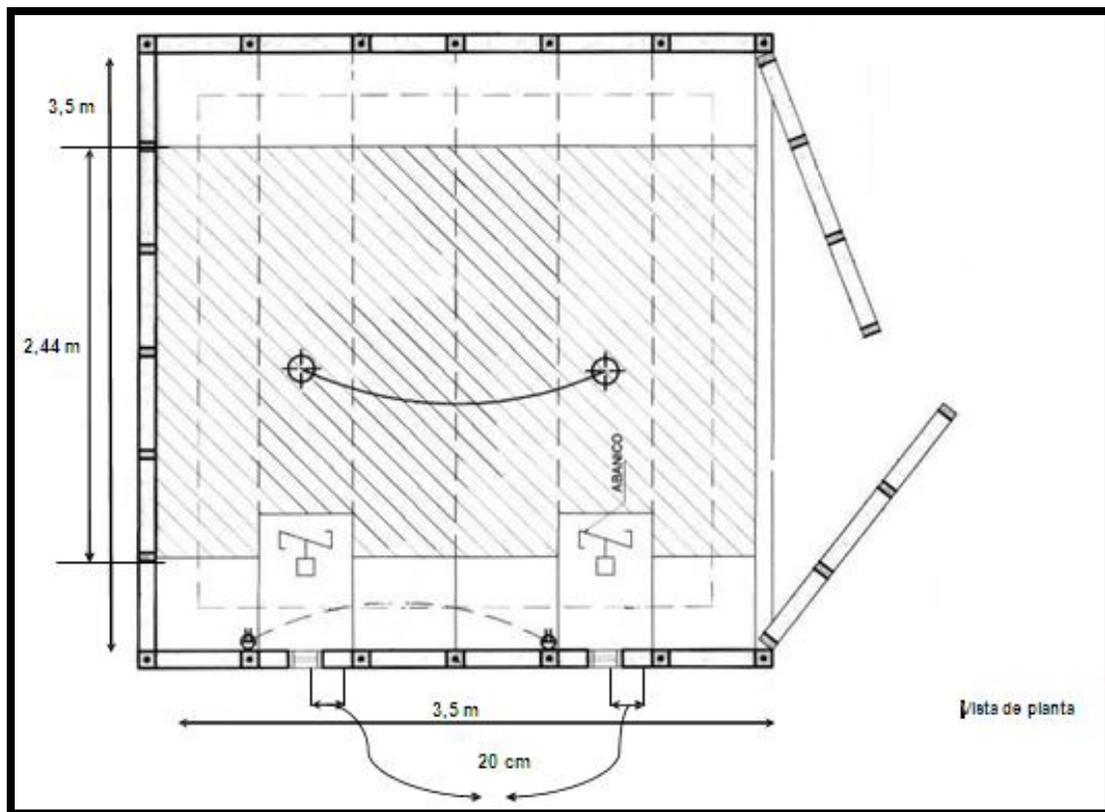


Figura 6.5: Vista de planta

HORNO SECADOR DE MADERA CON TECNOLOGÍA ECONÓMICA Y AMIGABLE CON EL MEDIO AMBIENTE, QUE FUNCIONE DE ACUERDO A LAS NECESIDADES Y REQUERIMIENTOS DEL PROGRAMA INSTITUCIONAL DE MADERA (PIMA)



Figura 6.6: Instalación de fibra de vidrio



Figura 6.7: Detalle de soportes del colector y colector



Figura 6.8: Detalle de instalación y ubicación del baffle