

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

**ÁREA DE ENERGÍA, INDUSTRIAS Y RECURSOS NATURALES NO
RENOVABLES**

INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

TESIS DE GRADO

TITULO:

**“Calculo y Diseño de Hornos Solares para el
Secado de Madera para la Ciudad de Loja”**

AUTOR: Wilman Fabricio Carrión Acaro.

DIRECTOR: Ing. Francisco Aleaga L.

ASESORES: Dr. Enrique Torres T.

Ms C. Ciro Bergues.

MOA - CUBA

2004

DECLARACIÓN DE AUTORIA

Declaro:

Yo Wilman Fabricio Carrión Acaro autor de este trabajo , autorizo al personal adecuado de la Universidad Nacional de Loja y el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa para hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente .

Wilman Fabricio Carrión Acaro

PENSAMIENTO

“Las personas somos capaces de trazarnos objetivos
los mismos que son realizables en cualquier lugar
del mundo , siempre y cuando demos lo mejor de
nosotros
para que estos se cumplan.”

Fabricio Carrión

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis queridos padres Hover y Susana quienes me han sabido guiar por un camino correcto en mi formación personal, a mis hermanos, Daniel, Deidania, Luis, y Susana, a mi familia y a todos mis amigos que de una u otra manera se preocuparon por la realización de este trabajo.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la planta docente del área de Energía, Industrias y Recursos Naturales no Renovables de la Universidad Nacional de Loja, por dedicar parte de su vida en nuestra formación profesional, en especial al Ing. Francisco Aleaga por brindarme su apoyo como director de este trabajo.

Al Instituto Superior Minero Metalúrgico "Dr. Antonio Núñez Jiménez" y de manera especial al Dr. Enrique Torres por brindarme su apoyo de manera desinteresada en la realización de presente trabajo.

Al Centro de Investigaciones de Energía Solar "CIES" y a todas las personas que de alguna forma colaboraron en mi formación profesional.

A todos gracias

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza el cálculo de un secador solar de madera para la ciudad de Loja a partir de los parámetros de radiación solar y las propiedades físicas del material a secar.

Para desarrollar el diseño del secador solar se partió de la recopilación de literatura relacionada con el tema, realizando un análisis de sus características, para poder conocer las ventajas y desventajas que pueden presentar y tener así un buen punto de partida para elaborar el diseño del proyecto.

Después del análisis de la información obtenida, con el empleo de la metodología de cálculo, se determina la energía solar necesaria para el secado de 6m^3 de madera y con esto se calcula el área de captación para la obtención de esta cantidad de energía.

Se incluye las características constructivas y de funcionamiento del secador solar además de la valoración económica e impacto ambiental de la propuesta.

SUMMARY

In the present work it is made I calculate of a solar wood dryer for the city of Loja from the parameters of solar radiation and the physical properties of the material to dry.

In order to develop the design of the solar dryer an analysis of their characteristics was left from the compilation of Literature related to the subject, making, to be able to know the advantages and disadvantages that can present/display and have therefore a good departure point to elaborate the design of the project.

After the analysis of the obtained data, with the use of the methodology of I calculate, the solar energy for the drying of 6m^3 of wood is determined necessary and with this the area of pick up for the obtaining of this amount of energy calculates.

One includes the constructive characteristics and of operation of the solar dryer in addition to the economic valuation and environmental impact of the proposal



Recomendaciones

- ◆ La implementación inmediata de los resultados de esta investigación a la comunidad comercial, artesanal e industrial de la madera de la ciudad de Loja.
- ◆ Analizar la posibilidad de la automatización del secador con vista a lograr un proceso eficiente de secado y ahorro energético.
- ◆ Seguir los pasos descritos para el funcionamiento del secador para que el secado sea más eficiente.
- ◆ Que la madera sea sumergida en agua durante algunos días antes de secar para una mayor facilidad en la salida del agua del interior de la madera a la superficie. Esto es debido a la eliminación de la savia por disolución.
- ◆ Deben evitarse velocidades del aire excesivas (no mayores que 1.2 m/s) ya que conllevaría un secado muy rápido de la superficie de la madera mientras que la parte interior de esta se mantendría húmeda y con ello se producirían grietas y deformaciones no deseadas del producto.
- ◆ Toda la madera seleccionada debe ser del mismo tipo, dimensión, y contenido de humedad inicial.
- ◆ Usar listones de madera que permiten separar las tablas unas de otras.
- ◆ Mientras dure el secado se debe analizar sistemáticamente la madera en cuanto al contenido y distribución de la humedad
- ◆ Que el aire caliente se mueva de la manera más homogénea posible dentro del secador para favorecer la calidad del secado.

CONCLUSIONES

1. El análisis bibliográfico permitió establecer las ventajas de la tecnología solar para el secado de maderas en comparación con las energías tradicionales.
2. Las características del secador para un volumen de 6m^3 de madera son la siguientes:
 - Volumen de la cámara: 42m^3
 - Área de captación: 21m^2
 - Dos ventiladores con un caudal de $7,82\text{m}^3/\text{min.}$ y potencia del motor de 2,43 KW.
3. El costo total del proyecto del secador es de 2876,94 USD. El tiempo de amortización calculado en base al ahorro de consumo energético mediante el uso de la energía solar es de 1,08 años o 13 meses comparado con lo que se gastaría en producir la misma con energía eléctrica.
4. El uso del vidrio como material de cubierta, permite lograr niveles de temperatura adecuados para el secado de la madera y buena resistencia a las condiciones del tiempo.
5. Para la elaboración de este proyecto de tesis se han utilizado métodos de investigación científica así como las diferentes disciplinas de la carrera de ingeniería electromecánica las mismas que han logrado contribuir de manera significativa en mi formación profesional.



CAPITULO 1: MARCO TEORICO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción.

En este capítulo, presentamos todo lo que tiene que ver acerca de los conocimientos básicos a tener en cuenta para entender lo que significa el proceso de secado y se busca además apoyar a los diferentes parámetros de solución al problema del secado de madera con energía solar de una manera teórica, basados en los estudios realizados por diferentes autores y especialistas en el tema que estamos tratando.

1.2 Trabajos precedentes.

El secado de madera con el uso de la energía solar ha sido ampliamente estudiado en diferentes países, según la revisión bibliográfica efectuada se destacan en este campo las investigaciones desarrolladas en Cuba por el Dr. Luis Bériz (Bériz, 2002). En ellas se realiza la caracterización y actualización del potencial de secado en el país a partir del conocimiento y clasificación de los diferentes tipos de secadores. El autor proporciona con precisión los datos necesarios para el diseño evaluación y selección de prototipos de secadores tanto a escala experimental como industrial.

No menos importantes son las investigaciones desarrolladas por el Centro de Energía Solar (CIES) en la ciudad de Santiago de Cuba dentro de ellas se pueden mencionar las investigaciones para la implementación de un secador de granos Tipo Tambor (Torres T. Alonso y otros, 2003), en ella se establece una alternativa del secado solar para la disminución del tiempo de secado y la protección del producto de las condiciones climatológicas.

En el Centro de Investigaciones de Energía Solar fue construido el Secador Solar de Tambor Rotatorio para granos del que se realiza un análisis térmico a partir de calcular los coeficientes de transferencia de calor en diferentes partes del equipo. El resultado del análisis muestra una distribución favorable de las áreas de captación y de pérdidas,



por lo que es posible pronosticar un buen funcionamiento térmico en el secado de granos para las condiciones de diseño.

Otra investigación importante en este centro es la efectuada por (Griñán V. P., Bergues C. y otros, 2003) donde se exponen aspectos técnicos y metodológicos de secado los cuales fueron elaborados a partir de revisiones bibliográficas, observaciones y experiencias de los autores obtenidas durante reiteradas prácticas de secado en el Secador Solar de Madera de 12 m³ construido en el Centro de Investigaciones de Energía Solar (C.I.E.S.) de Santiago de Cuba. También se presentan algunos conceptos básicos obtenidos sobre la conservación de la calidad de la madera. En un folleto elaborado especialmente para el secado de madera se expone una metodología que permite el entendimiento y aplicación de la tecnología solar para el secado de este producto y en general proporciona un material de reconocido valor para todas las personas que se propongan elevar sus conocimientos en este importante campo tecnológico.

De la misma manera (Linares Sergio, López B. Lugones. 2001) presentan un método gráfico para diseñar secadores solares en el que emplean un nomograma, que aunque determina solo los parámetros fundamentales, como el área del plato absorbedor, el volumen del secador y el flujo de aire necesario para secar el material, reporta ventajas por su facilidad de uso y rapidez del cálculo, pero también es importante enfatizar que dicho método gráfico tiene limitaciones que ocasionan errores permisibles, y que no se pretende sustituir los métodos existentes ni mucho menos los criterios prácticos obtenidos gracias a la evaluación de dichos equipos. Si no que se brinda como una herramienta más que permita generalizar el uso de los secadores solares.

Asimismo de una manera conjunta a lo que es el análisis de aplicación y factibilidad (Todd F. Supe, 2001) en su trabajo nos detalla un programa para la inversión en el secado de madera donde cita dos procesos de secado comparando cada uno de ellos con las diferentes ventajas y desventajas que estos presentan.

Además cabe destacar que en el trabajo realizado por (Palumbo D. A., Barral J. R., Lestarpé I. y Lara M. A. 2000) ellos nos presentan un análisis económico de un secadero de madera del tipo semi-invernadero integrado, al que se le agrega un



quemador a gas a fin de suministrar energía adicional a la solar para completar el secado de madera en un tiempo económicamente aceptable, no sin antes realizar un estudio económico más detallado y evaluar algunas modificaciones que pudieran mejorar su funcionamiento.

En la revisión bibliográfica realizada en sitios de Internet es interesante también destacar lo que nos dice : (Oti-Boateng Peggy, Axtell Barrie, 1998) ellos pueden distinguir dos clases de secadoras solares: las secadoras solares directas y las secadoras solares indirectas. De las primeras indican que, el aire se calienta en una cámara de secado que cumple las funciones de colector solar y secadora. A través de las paredes de madera de la secadora es muy poco el calor que se pierde, pero muchos trabajadores piensan que puede ser ventajoso construir la cámara con paredes de madera aislante. Y la segunda que es una secadora solar indirecta incluye dos partes: un colector solar que recibe la radiación del sol, y una cámara de secado que contiene el producto a secar, conectada al colector. El aire ingresa al colector, donde se calienta. De este modo, se reduce el nivel de humedad y el aire caliente se eleva a la cámara de secado por convección natural.

Estas secadoras deben adaptarse a las condiciones climáticas locales, al tipo de producto y a la disponibilidad de materiales de construcción. También hacen énfasis en lo importante que es tener la información debida acerca del clima local durante la estación de secado

Y por ultimo hemos creído conveniente el criterio de (Viscarra Silverio,1998) en su guía para el proceso de secado de la madera, que se aplica con el propósito de optimizar su posterior procesamiento y transporte para usos específicos. Detalles sobre el secado natural o al aire no son considerados en esta guía que está referida solamente al proceso de secado en hornos.

Para una mejor comprensión del proceso de secado en hornos, la Guía proporciona un resumen general de la estructura básica de la madera, los tipos de cortes y de la asociación agua-madera; luego, se citan los pasos que se siguen para el secado de una carga de madera en un horno convencional y los defectos principales que se presentan

en el proceso. Finalmente, se mencionan los cuidados que deben atenderse para el almacenamiento del material seco.

1.3 Conceptos fundamentales básicos a tener en cuenta en el uso de la Energía Solar

1.3.1 Formas de manifestación de la energía solar

La radiación global directa, procedente directamente del sol, es reflejada por la presencia de las nubes, el vapor de agua, etc.. y dispersada por las moléculas de agua, el polvo en suspensión, etc.. Por todo esto la radiación solar que llega a una superficie se divide en tres partes

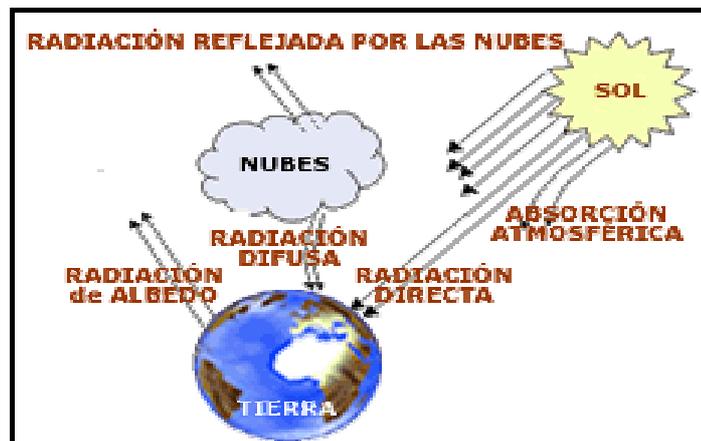


Figura. 1.1 Formas de manifestación de la energía solar

1.3.1.1 La radiación directa

Como su propio nombre indica, la que proviene directamente del sol.

1.3.1.2 La radiación difusa

Corresponde a la radiación solar dispersada por los diferentes componentes de la atmósfera.. Esta energía puede suponer aproximadamente un 15% de la radiación global en los días soleados, pero en los días nublados, en los cuales la radiación directa es muy baja, la radiación difusa supone un porcentaje mucho mayor.

1.3.1.3 La radiación reflejada

Es, como su propio nombre indica, aquella reflejada por la superficie terrestre. La cantidad de radiación depende del coeficiente de reflexión de la superficie, también llamado **Albedo**.

1.3.2 Formas de Trasmisión de calor .

Es importante tener presentes los mecanismos de transmisión del calor para comprender el comportamiento térmico de un secador solar. Microscópicamente, el calor es un estado de agitación molecular que se transmite de unos cuerpos a otros de tres formas diferentes:

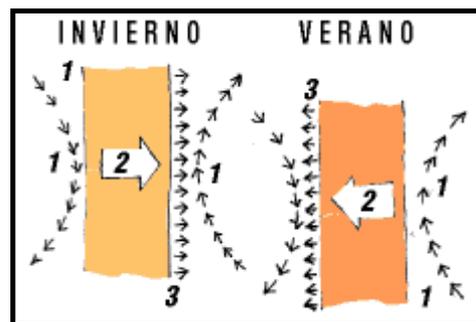


Figura 1.2 Formas de trasmisión de calor

- 1) Trasmisión por Convección
- 2) Trasmisión por Conducción
- 3) Trasmisión por Radiación

1.3.2.1 Convección.

La trasmisión por convección lleva el calor entre líquidos y gases, si consideramos un material fluido (en estado líquido o gaseoso), el calor, además de transmitirse a través del material (conducción), puede ser "transportado" por el propio movimiento del fluido. Si el movimiento del fluido se produce de forma natural, por la diferencia de temperaturas (aire caliente sube, aire frío baja), la convección es natural, y si el movimiento lo produce algún otro fenómeno (ventilador), la convección es forzada.



1.3.2.2 Conducción.

El calor se transmite a través de la masa del propio cuerpo. La facilidad con que el calor "viaja" a través de un material lo define como conductor o como aislante térmico. Ejemplos de buenos conductores son los metales, y se consideran aislantes, los plásticos, maderas, aire.

La conducción de calor depende del coeficiente de conducción térmica de los materiales siendo esta una medida de su capacidad para conducir el calor.

1.3.2.3 Radiación.

La trasmisión por radiación permite que el calor atraviese incluso el vacío. El Sol emite luz y calor que llega a la Tierra, pero entre el Sol y la Tierra no hay nada, el calor y la luz no pueden llegar por conducción ni por convección, llega por radiación. El calor es una forma de luz invisible que irradian los cuerpos más calientes y absorben los cuerpos más fríos. Cuando un cuerpo está suficientemente caliente puede llegar a emitir radiación visible.

La radiación puede ser vista como la propagación de una colección de partículas llamadas fotones o cuantos. De modo alternativo la radiación puede ser vista como la propagación de ondas electromagnéticas. En cualquier caso la radiación tiene propiedades de onda estándar de frecuencia (ν) y longitud de onda (λ). Para la propagación de la radiación en un medio, las dos propiedades se relacionan por:

$$X = \frac{C}{\nu} \tag{1.1}$$

Donde C es la velocidad de la luz en el medio. Para la propagación en el vacío, $C_0 = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

La unidad de la longitud de onda es comúnmente el incremento (μm) donde $1\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$.

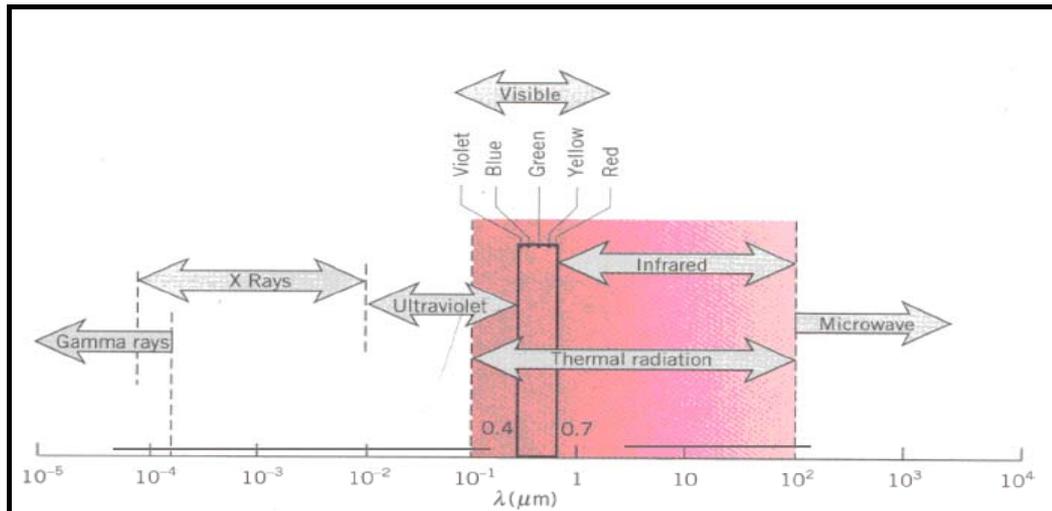


Figura 1.3 Espectrum de radiación solar

Los rayos gamma de longitudes de onda cortas, rayos X y radiación ultravioleta (UV) son de interés de la energía física y la ingeniería nuclear, mientras que microondas de longitud de onda larga y onda de radio son concerniente a la ingeniería eléctrica. La porción del espectrum, que se extiende desde 0,1 hasta $100\mu\text{m}$ e incluye una porción de la (UV) y todo el de la visible e infrarrojo (IR), es llamada radiación térmica y es la parte concerniente a la transferencia de calor.

1.3.3 Capacidad calorífica e inercia térmica.

Si a un cuerpo le aportamos calor, este eleva su temperatura. Si lo hace lentamente decimos que tiene mucha capacidad calorífica, puesto que es capaz de almacenar mucho calor por cada grado centígrado de temperatura. Las diferencias de capacidad calorífica entre el agua y el aceite, por ejemplo, (mayor la primera que el segundo) es lo que hace que, al fuego, el agua tarde más en calentarse que el aceite, pero también que el agua "guarde" más el calor.

Se llama calor específico de un material (en $\text{kcal} / \text{kg } ^\circ\text{C}$) a la cantidad de calor que hay que suministrarle a 1 kg para que eleve su temperatura 1°C .

La capacidad calorífica y el almacenamiento de calor traen aparejados ciertos fenómenos. Por ejemplo: una casa, en invierno, cuando encendemos la calentador al

llegar por la tarde, la habitación tarda en alcanzar una temperatura agradable, y cuando la apagamos, por la noche, la temperatura de la habitación todavía es buena y no se enfría inmediatamente ya que lo ira perdiendo poco a poco. Esta "resistencia" de la temperatura a reaccionar inmediatamente a los aportes de calor es lo que llamamos inercia térmica.

Este es un concepto importante en los secadores: si tienen poca inercia térmica, reaccionarán rápidamente a la radiación solar, calentándose pronto durante el día, pero también por la noche se enfrían más rápido: el retardo entre los aportes de calor y la temperatura alcanzada es pequeño. En cambio, en secadores con gran inercia térmica, la radiación solar no provocará una subida rápida de la temperatura de la cámara, porque el calor se está almacenando, y posteriormente se libera lentamente por la noche, por lo que no se producirá una disminución brusca de temperatura; además, las variaciones de temperatura se amortiguan, no alcanzando valores tan extremos.

Entonces, la inercia térmica en un secador lleva aparejado dos fenómenos: el de retardo (de la temperatura interior respecto a la temperatura exterior), y el de amortiguación (la variación interior de temperatura no es tan grande como la variación exterior).

1.3.4 Efecto Invernadero.

El efecto invernadero se da al colocar un vidrio entre la placa absorbidora y el sol, ocurre que, como el vidrio es transparente a la radiación solar pero es opaco a la radiación infrarroja, no deja pasar la radiación de mayor longitud de onda que emite la placa al calentarse. De esta forma se produce una "trampa energética de radiaciones" que impide que la energía radiante que ha atravesado el vidrio vuelva a salir; esta trampa constituye el denominado efecto invernadero.

El vidrio también evita el contacto directo de la placa con el aire ambiente con lo que, además, se disminuirán las pérdidas por convección.

1.3.5 Secado.

El secado es el proceso de disminuir la humedad de un determinado material sólido o casi sólido, por medio de la evaporación y eliminación del agua contenida en la misma. Esto puede realizarse por el calentamiento del sólido directa o indirectamente por convección natural o forzada de aire

1.3.5.1 Secado Natural

Se conoce por secado natural la disminución de humedad de los productos o materiales en condiciones naturales, que estén expuestos a la radiación solar directa o no. En este proceso están presentes factores como la humedad del aire y la velocidad del viento y la única fuente de energía que utiliza la naturaleza en el secado que es la energía solar directa o indirecta.

Las desventajas del proceso utilizado en el secado de madera son:

Toma mucho tiempo, (de 4 a 5 meses y a veces mas para poder lograr un secado eficiente, dependiendo del tipo de madera), además se producen rajaduras, el secado no es uniforme, otra desventaja es el arqueado y las manchas que se producen por insectos que atacan la madera.



Figura. 1.4 Secado Natural

1.3.5.2 Secado Artificial

El secado artificial consiste en secar la madera en una recámara controlando el flujo de aire, temperatura y humedad, reduciendo así el tiempo de secado (de 3 a 5 semanas,

dependiendo del tipo de madera) o a la disminución controlada de humedad de los productos o materiales con el uso de equipos o dispositivos especiales, los cuales usan generalmente fuentes convencionales de energía.

1.4. Hornos Solares

1.4.1. Definición

Los hornos solares son una aplicación importante de los concentradores de alta temperatura y están relacionados muy estrechamente con la protección ambiental mediante la eficiencia energética y el uso de una energía limpia y renovable como la solar, a la sustitución del uso de energía convencional, al mejoramiento de la calidad de los usuarios y, a políticas sociales relativas al uso de la energía renovable.

1.4.2. Historia de los hornos solares

El primer colector plano para aprovechar el calor solar fue diseñado por Horace de Saussure, un naturalista suizo que experimentó en 1767 con el efecto físico del calentamiento de una caja negra con tapa de vidrio expuesta al Sol. Las experiencias de Saussure son relevantes porque descubrió que, al exponer estas cajas al Sol, la temperatura aumentaba en el interior de cada una de ellas hasta el punto de alcanzar más de 85 °C, hecho que permitía cocer fruta.

Más adelante, experimentó con nuevas cajas hechas de madera y corcho negro y, en contacto con el Sol, la temperatura llegó a los 100 °C. Sin embargo, aislando el interior de la caja a base de intercalar lana entre las paredes de la caja caliente la temperatura alcanzó los 110 °C, incluso cuando la temperatura ambiental no era nada favorable. Eso le hizo cuestionarse si la radiación solar en una montaña donde el aire era más transparente podría atrapar menos calor.

Para verificar su hipótesis, Saussure subió a un pico suizo y constató que, a pesar de que la temperatura exterior era de 1 °C, dentro de la caja caliente se superaban los 87 °C. Además, cuando la temperatura ambiental alcanzaba los 6 °C, porque descendía hacia el llano, en el interior de la caja se mantenía el mismo calor. Saussure predijo: "Algún día



este ingenio, que actualmente es pequeño, barato y fácil de fabricar, puede ser de gran utilidad". Este científico había tenido una visión, a pesar de que sus experimentos quedaron en el olvido durante cerca de medio siglo.

1.4.3. Clasificación de los Secadores Solares

Los secadores se clasifican en dependencia de cómo es transmitida esta energía al producto, pueden clasificarse en secadores de radiación solar directa, de radiación infrarroja, de conducción de calor y de convección de calor.

Esta clasificación es convencional y en la mayoría de los secadores la transferencia de calor es por conducción, convección y radiación combinadas. No obstante, según el diseño, la forma de transferencia de calor al producto es predominante y de ahí la validez de dicha clasificación.

1.4.3.1. Secador de radiación solar directa.

Es el tipo de instalación en donde el producto recibe la radiación solar directamente en su superficie, la cual la capta y se transforma en calor; es decir, que la superficie captadora de la radiación solar es el propio producto.

En este tipo de secador, el producto a secar va colocado generalmente en bandejas de malla, situadas dentro de una cámara cubierta con una o dos láminas de vidrio, las cuales dejan pasar la radiación solar directamente hasta el producto.

Al captar la radiación, aquel se calienta y por ello aumenta la presión de vapor de agua en su superficie, con lo cual se acelera el proceso de secado. Este secador es sencillo, barato, de fácil construcción y operación.

1.4.3.2. Secador solar de radiación infrarroja.

En este tipo de secador la energía solar es captada por una superficie metálica ennegrecida, la cual se calienta.



El material se calienta, principalmente por la radiación infrarroja que recibe de la superficie captadora y, por lo tanto, no recibe la luz solar directamente; al calentarse, acelera la evaporación de la humedad de su superficie.

La corriente de aire que extrae la humedad se regula por ventanillas de entrada y salida.

1.4.3.3. Secador solar de conducción de calor.

El producto o material a secar va colocado en la superficie metálica captadora de la radiación solar, y el calor es transmitido principalmente por conducción directamente del metal al producto.

Este secador es utilizado para deshidratar sustancias pastosas que no se perjudiquen al recibir la radiación solar directa, ya que parte del calor lo reciben también directamente del Sol.

En este secador, el producto va colocado en tiras finas sobre la superficie captadora, dejando gran parte de ésta sin cubrir. De esta forma la superficie funciona como si fueran aletas que transmiten el calor al producto.

1.4.3.4. Secador solar por convección de calor.

En este tipo de instalación la radiación solar es captada por calentadores de aire y después éste pasa a través del producto, donde elevan la temperatura y evapora el agua de su superficie. Este mismo aire arrastra la humedad del producto, produciendo su secado.

Estos secadores pueden ser de convección natural o forzada. En el secador por convección natural, al calentarse el aire, se hace más ligero y asciende, con lo que crea corrientes de aire seco que extrae la humedad del objeto a secar. En el secador por convección forzada, el aire se mueve con el auxilio de ventiladores.

En algunos diseños, la radiación solar es captada por calentadores de agua y después el aire se calienta en intercambiadores de calor. Esto posibilita la acumulación de energía para contrarrestar el efecto negativo de la nubosidad.

El secador solar de convección es el mas utilizado, ya que tiene las siguientes ventajas, el secado del producto es más uniforme; la calidad del producto es, en muchos casos, mejor, al no incidir sobre el mismo la radiación solar directa; la cámara de secado puede ser de mayor capacidad con relación al volumen que ocupa; la manipulación del producto es generalmente más fácil, por estar más concentrado; el control de los parámetros de secado es más sencillo, ya que puede regularse por medio del aire; es menos sensible a la nubosidad al tener mayor capacidad térmica que los modelos anteriores; pueden ser diseñados con recirculación de aire y, por lo tanto, la eficiencia de la instalación aumenta.

1.4.4. Hornos solares de secado de madera

El horno solar de secado, ha sido diseñado como un colector solar, con tres paredes aisladas, piso de concreto, un techo de plástico o vidrio transparente con un ángulo de inclinación que depende de la latitud y el cual se ubica hacia el sur en el hemisferio norte, y hacia el norte en el hemisferio sur.

Durante el día, la energía solar penetra a través del techo de plástico o vidrio, choca contra las superficies pintadas de negro, y se convierte en calor. El aire seco, que entra a través de una pequeña abertura que se ajusta manualmente, se hace circular a través de la madera apilada por dos ventiladores, la que se recoge a medida que el aire circular por la madera apilada, y se extrae a través de las ventilas ubicadas en la parte opuesta a los ventiladores.

1.4.4.1. Materiales indispensables en la construcción de los hornos.

Hay varias clases de materiales que se utilizan típicamente en la construcción de los hornos solares pero los materiales seleccionados están basados bajo la idea de incorporar materiales económicos que puedan encontrarse en nuestro medio



1.4.4.1.1. Material para la estructura.

Los materiales seleccionados para que la estructura del secador solar tenga, conserve una forma dada, y sea duradera por mucho tiempo son:

- * Ladrillos
- * metal
- * cemento
- * vidrio

Los mismos fueron seleccionados por las grandes ventajas que presentan frente a otros materiales.

Muchos materiales que se comportan bien estructuralmente son demasiado densos para ser buenos aislantes. Para proporcionar las dos cosas, tanto cualidades de estabilidad estructural como de buen aislante, se necesita normalmente utilizar materiales distintos para la estructura y para el aislamiento.

1.4.4.1.2. Material para Aislamiento.

El secador debe tener incorporado una capa de material aislante tanto en el fondo del secador, como por los laterales, con el objetivo de reducir las perdidas de calor desde el interior al exterior.

Entre los materiales aislantes más usados están:

- ◆ Lana de vidrio.
- ◆ Espuma de poliuretano.
- ◆ Poli estireno expandido.
- ◆ Madera.
- ◆ Aserrín
- ◆ Aire



El material elegido para aislante de los laterales es poliuretano ya que soporta altas temperaturas. A diferencia de otros materiales es resistente contra químicos y solventes, además se adhiere prácticamente a cualquier superficie, por lo que se aplica fácilmente en las paredes.

1.4.4.1.3. Material de Cubierta transparente.

De un material de cubierta debemos esperar que :

- ◆ Durante su vida útil conserve sus características
- ◆ La transmisividad a la luz solar sea la máxima posible
- ◆ La transmisividad a la radiación de onda larga sea mínima

Estas cubiertas transparentes pueden ser de vidrio o de plástico (4-5-6 mm), la primera opción es más habitual. Las cubiertas de plástico o laminas transparentes son menos frágiles, más ligeras y más económicas; sin embargo, sufren rápidamente un gran envejecimiento por su exposición directa a la radiación solar.

Con la utilización de dos cubiertas se mejora el rendimiento, también puede usarse una combinación de una cubierta de cristal por el exterior y otra de plástico interior pero para nuestro caso utilizamos dos cubiertas de vidrio de 0,05m de espesor.

La cubierta de vidrio tiene características ópticas propias, ofreciendo una transparencia alta a la radiación solar $\lambda < 3 \mu\text{m}$ y siendo prácticamente opaca a las radiación solar cuya longitud de onda está comprendida entre 3 y 50 μm , que es la zona del espectro en que emite la placa absorbente, esto es lo que se conoce como efecto invernadero.

Mientras mayor sea el número de planchas transparente de cubierta, mejor será el aislamiento y menor las perdidas, pero a la vez la radiación que pasa al plato será menor.

1.4.4.1.4. Plato de absorción.

La superficie del plato de absorción debe tener las características necesarias para que la mayor parte de la radiación que reciba, sea absorbida, muy poco reflejada y luego transfiere el calor al aire, esto puede lograrse aplicándole un acabado negro mate.

El recubrimiento superficial tiene una gran importancia en el comportamiento puntual inicial del secador, pero además debe presentar gran resistencia a la degradación que se origina por la radiación ultravioleta, altas temperaturas, humedad, etc.

A la superficie superior del plato se le imparte un acabado de rugosidad, esto se puede lograr aplicando al plato una capa de arena, después que se le aplica la pintura negro mate. Este tratamiento se realiza para aumentar la absorción y disminuir la reflexión de las radiaciones incidentes.

1.5. Características de la madera para el secado en hornos solares

1.5.1. Introducción

En forma general, secado de madera es el proceso de eliminación del agua en exceso del material recién cortado, que se aplica con el propósito de optimizar su posterior procesamiento y transporte para usos específicos.

Para una mejor comprensión del proceso de secado, trataremos de una forma global la estructura básica de la madera, los tipos de cortes y de la asociación agua-madera; luego, se citan los pasos que se siguen para el secado de madera en un horno solar y los defectos principales que se presentan en el proceso. Finalmente, se mencionan los cuidados que deben atenderse para el almacenamiento del material seco.

1.5.2 Estructura de la madera

La madera, como parte fundamental del tronco de los árboles tiene funciones de sostén de ramas y transporte de alimentos. Esto le confiere al material, características como porosidad (presencia de espacios vacíos) y elevada resistencia mecánica en

relación con su peso, lo que origina que sus propiedades se manifiesten en diferente magnitud según las direcciones de corte.

1.5.3 Partes del Tronco.

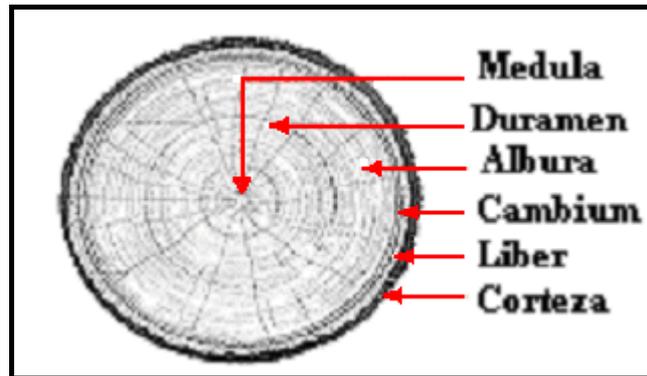


Figura 1.5 Partes del Tronco

Corteza es la cubierta protectora exterior y está conformada por tejidos muertos; sirve, además de proteger al árbol de agentes externos de daño, para evitar la evaporación del agua del tronco

El Cámbium es el tejido generatriz ubicado entre la corteza interna y el albura, produce la corteza hacia afuera y la madera hacia adentro. Si se daña al cámbium, la parte afectada muere.

Liber, es la parte interna de la corteza., filamentosa y poco resistente, madera embrionaria viva

El Albura o sámago, parte viva de la madera generalmente de color claro, está situada entre el cámbium y el duramen. Su contenido de humedad es mayor que el del duramen pero, seca más rápidamente que éste.

El Duramen o madera de corazón, es la parte interna del tronco conformada por tejido muerto. Por lo general, esta madera es más oscura que la albura y su delimitación no siempre está bien definida.

La Médula, es el núcleo central de un tronco. La madera cercana a la médula tiende a secar con más defectos que el resto del leño.

Anillos anuales Cada anillo corresponde al crecimiento anual, consta de dos zonas claramente diferenciadas:

- ◆ Una formada en primavera: Predominan en ella los vasos gruesos que conducen la savia bruta hasta las hojas (tejido vascular). Color claro, pared delgada y fibras huecas y blandas.
- ◆ Otro formado en verano: Tienen los vasos más pequeños y apretados. Sus fibras forman el tejido de sostén. Color oscuro denso y fibras de paredes gruesas.

1.5.4 Cortes de la madera.

Los cortes en un tronco pueden ser de cuatro tipos:

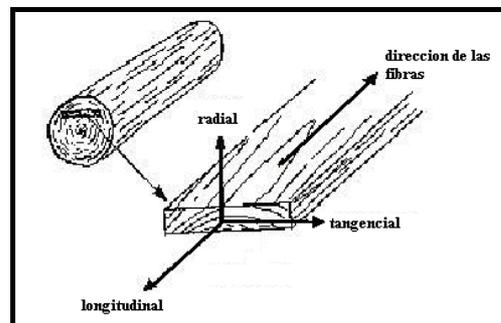


Figura 1.6 Cortes en la madera

Corte transversal o sea de dirección perpendicular al eje del tronco, se produce, por ejemplo, al voltear un árbol o seccionar un tronco.

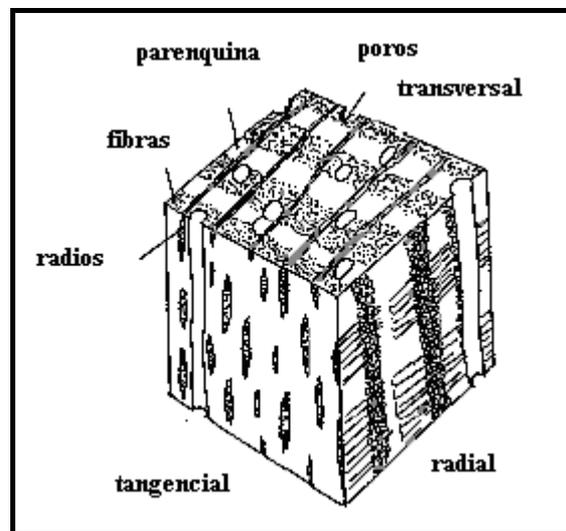
Corte tangencial cuando se realiza tangencialmente a los anillos de crecimiento del árbol. Es el corte en el que mejor se aprecia el vetado o figura de la madera.

Corte radial cuando tiene dirección paralela a los radios. Es el corte más estable de la madera ante cambios de humedad del material.

Corte oblicuo cuando se realiza de manera intermedia entre el corte tangencial y el corte radial.

1.5.5 Tejidos Principales de la Madera.

Realizando un corte en la madera y observándolo con lupa o microscopio, se puede apreciar los siguientes tejidos básicos:



*Figura 1.7. Tejidos principales de la madera.
Representación esquemática de un trozo de (Ficus glabrata)*

Poros, se denomina así al corte transversal de los vasos. Son de diferente tamaño y pueden estar o no agrupados.

Parénquima, es un tejido de reserva que puede ser de dos tipos: longitudinal, un tejido blando y claro, y los radios que se dirigen al centro del tronco. Constituyen zonas de fallas donde se originan las grietas y rajaduras de la madera, durante el secado.

Fibras, tejido que cumple la función de sostén del árbol; sus extremos son ahusados y el interior es hueco. Las paredes son de grosor variable, según la densidad de la madera.

1.5.6 El agua en la madera

La madera contiene agua de constitución, inerte a su naturaleza orgánica, agua de saturación, que impregna las paredes de los elementos leñosos, y agua libre, absorbida por capilaridad por los vasos y traqueidas.

Como la madera es higroscópica, absorbe o desprende humedad, según el medio ambiente. El agua libre desaparece totalmente al cabo de un cierto tiempo, quedando, además del agua de constitución, el agua de saturación correspondiente a la humedad de la atmósfera que rodee a la madera, hasta conseguir un equilibrio, diciéndose que la madera esta secada al aire.

La humedad de la madera varía entre límites muy amplios. En la madera recién cortada oscila entre el 50 y 60 por ciento, y por imbibición puede llegar hasta el 250 y 300 por ciento. La madera secada al aire contiene del 10 al 15 por ciento de su peso de agua, y como las distintas mediciones físicas están afectadas por el tanto por ciento de humedad, se ha convenido en referir los diversos ensayos a una humedad media internacional de 15 por ciento.

La humedad de las maderas se aprecia, además del procedimiento de pesadas, de probetas, húmedas y desecadas, y el calorimétrico, por la conductividad eléctrica, empleando girómetros eléctricos. Estas variaciones de humedad hacen que la madera se hinche o contraiga, variando su volumen y, por consiguiente, su densidad.

El árbol en pie contiene un elevado nivel de agua. Algunas especies livianas como la balsa pueden contener hasta 300% ó 400% de contenido de humedad; otras muy pesadas como el quebracho colorado llegan hasta un 50% a 60% como máximo.

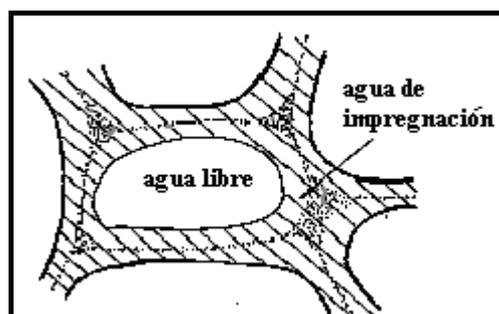


Figura 1.8 El agua en la madera



El agua en la madera está presente en dos formas: **agua libre o capilar**, que se encuentra en el interior de las cavidades celulares. Es el agua de más fácil extracción. Al eliminarla no se presentan modificaciones apreciables en las propiedades físicas y mecánicas de la madera y se llega a un nivel de humedad de aproximadamente 30% en la madera. A este contenido de humedad se denomina **Punto de Saturación de la Fibras (PSF)**.

El **agua de impregnación** es la que se encuentra adherida a las paredes celulares. Una vez iniciada la eliminación de esta forma de humedad a partir del PSF, se inician las modificaciones de las propiedades físicas y mecánicas de la madera.

1.5.7 Densidad de la madera.

La densidad real de las maderas es sensiblemente igual para todas las especies, aproximadamente 1,56. La densidad aparente varía no solo de unas especies a otras, sino aún en la misma con el grado de humedad y sitio del árbol, y para hallar la densidad media de un árbol hay que sacar probetas de varios sitios.

Como la densidad aparente comprende el volumen de los huecos y los macizos, cuanto mayor sea la densidad aparente de una madera, mayor será la superficie de sus elementos resistentes y menor el de sus poros.

Las maderas se clasifican por su densidad aparente en:

- ◆ Pesadas, si es mayor de 800.
- ◆ Ligeras, si esta comprendida entre 500 y 700.
- ◆ Muy ligeras, las menores de 500.

La densidad aparente de las maderas mas corrientes, secadas al aire, son:

Tabla 1.1. Densidades de algunas maderas

Madera	Kg / m³
Pino Común.	600
Pino Negro.	380 – 740
Pino- tea.	830 – 850
Alerce.	440– 800
Roble.	710 – 1070
Encina.	950 – 1200
Haya.	600 – 900
Alamo.	450 – 700
Olmo.	560– 820
Nogal.	600 – 810
Cedro	430 – 510
Eucalipto	780

1.5.8 Agrietamiento y Rajaduras

1.5.8.1 Grietas Superficiales

Estas grietas ocurren en las caras de las tablas durante las primeras etapas del secado. Las causas más comunes del agrietamiento superficial son el rápido secado en las primeras etapas del estacionamiento o la súbita aplicación de un severo aumento en la tasa de secado, en las últimas etapas. Frecuentemente los lados de las grietas se cierran en la superficie al final del proceso, cuando se invierten los esfuerzos y no son visibles en la superficie hasta que la tabla sea cepillada.

Una segunda causa del agrietamiento superficial es la aplicación de un tratamiento de elevada humedad a tablas cuyo centro ha secado bajo el punto de saturación de las fibras, seguido de un rápido resecado de la superficie. Por ejemplo, este problema puede ser causado por humedecimiento debido a la lluvia y un subsecuente rápido resecado.

1.5.8.2 Grietas Internas

Estas tipo de grietas comienzan generalmente en las últimas etapas del secado como resultado directo de rigurosas condiciones de secado en las primeras etapas, que originan esfuerzos intensos de tensión en la superficie y de compresión en el centro. Las

grietas se generan en el interior de la tabla pudiendo extenderse hasta la superficie. El excesivo agrietamiento interno se denomina "apanalamiento".

1.5.8.3 Rajaduras

Son separaciones longitudinales de las fibras que atraviesa de una cara a la otra de la madera. Ocurren en los extremos de una tabla debido a una rápida pérdida de agua que origina esfuerzos de tensión. De todos los agrietamientos experimentados, éste es probablemente el más común y severo.

1.5.8.4 Torceduras

El término "torceduras" generalmente se considera en alguno de los siguientes casos:

- A. Acanaladura o abarquillado, que es la tendencia de algunas tablas de corte plano a desarrollar una curvatura a lo ancho de la pieza.
- B. Revirado, es la distorsión en el largo de la pieza.
- C. Combadura o arqueado, cuando la curvatura se encuentra a lo largo de la cara de la tabla.
- D. Encorvadura, que es la curvatura del lado o canto de una tabla.

Probablemente, el mayor factor causante de torceduras sea el apilado incorrecto. Cuando la madera está sujeta a una alta temperatura, se vuelve más plástica y, por ello, adopta la forma que le dictan los esfuerzos aplicados a ella y de ahí se puede ver que, si el espaciamiento de los separadores en una pila no está alineado verticalmente, el peso de la madera sobre una tabla particular ocasiona que la pieza se flexione alrededor del separador que está desalineado. La madera que está en esa posición adquiere deformaciones permanentes.

En forma similar, si los espaciamientos de los separadores son muy grandes la tabla puede tender a hundirse entre ellos.

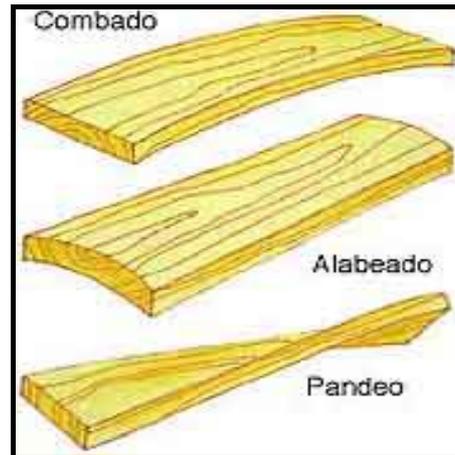


Figura 1.9 Torceduras en la madera

La variación en la tasa de contracción radial y tangencial es generalmente responsable de la tendencia de las tablas anchas de corte plano a desarrollar acanaladuras. En este caso, la cara de la tabla cerca al centro del tronco se aproxima más a un corte radial, comparado con las superficies opuestas y por ello se contrae menos en ancho y a esto se deben las diferencias, ya que los cantos exteriores de la tabla tienden a curvarse desde el centro o corazón.

1.6. Clima de Loja

Para el correcto diseño de un horno secador solar por efecto invernadero es necesario conocer primero las características específicas de clima y radiación solar de la localidad donde este se va a instalar

Las características del clima de Loja como cualquier otro clima del mundo, responden a una diversidad de factores que modifican su condición natural tales como:

Ubicación geográfica

Extremo Sur Occidental del Ecuador

03°19'49" Latitud Sur, en el río León (N)

04°45'00" Latitud Sur, Limite con el Perú (N)

79°05'54" Longitud Oeste, en la cordillera Oriental (E)

80°29'03" Longitud Oeste, en Cazaderos (O)

**Límites:****Norte:** Las provincias de El Oro y Azuay**Sur:** La republica del Perú**Este:** La provincia de Zamora Chinchipe**Oeste:** El Oro y Perú**Extensión:** 11 026,50 km^2 **Temperatura media:** 15,3°C**Humedad Relativa:** 74.6%**Densidad Poblacional:** 38,26 Hab / km^2

La Altitud del suelo es sin duda el factor mas contribuyente a modificar el clima, Loja se encuentra a 2135 metros sobre el nivel del mar (msnm) debido a la posición geográfica impuesta por la cordillera de los Andes

El hecho de que Ecuador se halle ubicado en la faja de Bajas Latitudes (zona ecuatorial) significa que carece de variaciones estacionales en la temperatura y que el gradiente térmico tenga un descenso de aproximadamente 5°C por cada 1000 metros de ascenso altitudinal; por eso, en la Sierra, las condiciones calurosas de clima ecuatorial son temperadas.

De Enero a Abril-Mayo, la Corriente de El Niño introduce al continente aire húmedo y caliente que produce lluvia convectiva. Su influencia cubre casi todo el territorio de la provincia, incluyendo la faja Saraguro – Yangana, con la excepción de una pequeña área ubicada alrededor de la población de Jimbilla, que presenta marcada influencia amazónica

Pero el aspecto más peculiar del clima de la Provincia de Loja, que lo hace diferente al resto del País, está supeditado al abrupto y caótico relieve, con ausencia de la Cordillera Occidental y al fenómeno de la desertificación, que avanza desde el Sur.

El factor orográfico, conformado por un relieve que desciende de Este a Oeste, con un gradiente general del 2,4%, ha contribuido a que en Loja se forme una microzona de convergencia, perpendicular a la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), donde los vientos marinos del Oeste tocan la cumbre de la cordillera Real y los vientos Alisios

del Este sobrepujan el centro de la provincia, configurando una situación de "Sahel", es decir, de transición entre la zona montañosa de los Andes Meridionales del Ecuador y el desierto de Sechura del Perú. Por eso, el régimen de lluvias, unimodal hacia el Sector Occidental Bajo (con un solo pico en los primeros meses del año), paulatinamente tiende a homogeneizarse a medida que se asciende y avanza hacia el Oriente.

1.6.1. Radiación Solar y Datos Meteorológicos de Loja

1.6.1.1. Régimen térmico

Loja es una provincia con predominancia de climas tropical, temperado y subtropical, de acuerdo con la clasificación de pisos térmicos adaptada por Cañadas (1983), como se indica en la tabla 1.1

Tabla 1.2. Climas térmicos de Loja

No	Clase	Rango Térmico °C	Superficie km ²	%
1	Frío	0 a 5,9	511	4,7
2	Subtemperado	6 a 11,9	611	6,1
3	Temperado	12 a 17,8	2959	27,4
4	Subtropical	18 a 21,9	2836	26,2
5	Tropical	+ de 22,0	3826	35,6
Total			10793	100,0

La clase de clima Tropical se localiza bajo la cota de 1200 m, sobre buena parte de los territorios de los cantones Zapotillo, Macará, Pindal y Catamayo, y siguiendo la larga garganta de penetración del río Catamayo, hasta cerca de Chinguilamaca, en más de un tercio territorio de Loja. El Clima Subtropical detenta la cuarta parte del área provincial y se ubica en pisos altitudinales comprendidos entre 1200 y 1900 m; en estas dos zonas climáticas, que en conjunto abarcan un 63 % del territorio lojano, se ha creado un paisaje de estepa seca o sávana y de estepa moderada que, a la postre, ha configurado la esencia de la cultura particular del pueblo lojano. A altitudes entre 1900 y 2800 m se presentan los climas Temperados, que cubren otro tercio de la provincia y

que, con la pequeña superficie de climas Subtemperados y Fríos (11% del área de Loja, extendida sobre las cúspides de las cordillera más altas, especialmente de los cantones Saraguro y Fríos conforman lo que podría llamarse en Loja, el sector serrano.

En la tabla se presenta la temperatura media del aire de 13 localidades de Loja (promedio de 16 años). Un rápido análisis del Cuadro 2 indica que como es lógico, mayores temperaturas a cotas inferiores, y menores conforme se asciende en altitud. Sin embargo, el gradiente térmico es bastante irregular: depende, en muchos casos, antes que de la altitud, de la orientación del macro y mesorelieve con respecto a las corrientes de vientos dominantes, sean éstas de origen regional o local. Así, Celica y La Argelia-Loja, situadas a diferente altitud (1970 y 2135 m, respectivamente) presentan casi similares temperaturas medias anuales, mientras que Yangana y Catacocha, localizadas aproximadamente a 1850 m y Cariamanga y Celica, ubicadas también a altitudes casi iguales, tienen diferentes características térmicas.

Tabla 1.3. Temperaturas medias mensuales de Loja (periodo 1971-1986) (° Celsius)

ESTACIÓN (Nº)	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	MEDIA	OSC.
Saraguro (1)	12,9	12,9	13,0	12,9	13,1	12,8	12,4	12,5	12,9	13,2	13,3	13,2	12,9	0,9
La Argelia (2)	15,5	15,6	15,7	15,9	15,7	15,1	14,7	14,9	15,3	15,6	15,9	15,8	15,5	1,2
Malacatos (3)	20,7	20,7	20,7	20,6	20,3	20,1	20,0	20,5	21,0	21,0	21,2	21,1	20,7	1,2
Vilcabamba (16)	20,3	20,2	20,4	20,3	20,0	19,9	19,8	20,0	20,2	20,6	20,8	20,6	20,3	1,0
Yangana (4)	18,5	18,4	18,9	18,8	18,5	18,2	17,6	18,1	18,7	18,7	19,1	18,8	18,5	1,5
Catamayo (5)	23,7	23,4	23,6	23,5	23,7	23,7	23,7	23,8	24,0	23,9	24,1	24,0	23,8	0,7
Gonzanamá (6)	16,5	16,5	16,7	16,8	17,0	16,9	16,9	17,1	17,1	16,9	16,8	16,8	16,8	0,6
Cariamanga (7)	17,2	17,3	17,4	17,6	17,7	17,7	17,7	17,9	18,0	16,7	16,6	17,6	17,5	1,4
Amaluza (8)	19,5	19,4	19,5	19,7	19,9	20,2	20,3	20,5	20,3	20,0	20,2	19,7	19,9	1,1
Catacocha (9)	17,8	17,6	17,4	17,3	18,1	18,4	18,7	18,5	18,8	18,9	18,6	18,4	18,2	1,6
Celica (10)	14,5	14,5	15,1	15,3	15,7	15,7	15,8	15,5	15,5	15,4	15,6	14,8	15,3	1,3
Macará (11)	25,6	25,8	25,6	25,0	24,3	23,6	23,5	23,9	24,5	25,0	25,3	25,7	24,8	2,3
Zapotillo (12)	25,8	26,4	26,5	26,4	25,6	24,3	23,5	23,4	23,5	23,4	24,2	25,5	24,9	3,1

En la Tabla 1.4. se indican las temperaturas extremas del aire.

Tabla 1.4. Temperaturas extremas del aire (periodo 1971-1986)

ESTACIÓN	MÁXIMA ABSOLUTA		MÍNIMA ABSOLUTA		OBSERVACIONES
	°C	Fecha	°C	Fecha	
Saraguro	26,2	5 Noviembre/82	2,0	23 Enero/76	
La Argelia	27,8	23 Noviembre/81	0,3	3 Noviembre/85	
Malacatos	35,0	26 Octubre/73	4,4	27 Julio/74	
Vilcabamba	36,8	24 Mayo/86	5,0	28 Agosto/74	S.d.* 1971, 1972.
Yangana	29,6	25 Noviembre/79	7,2	9 Octubre/79	S.d. 1971 a 1978
Catamayo	36,0	1 Noviembre/72	9,7	11 Noviembre/85	S.d. 1983, 84 y 86
		26 Octubre/79			
Gonzanamá	28,8	6 Enero/78	5,0	26 Marzo/79	S.d. 1971 a 1974
		14 Junio/82		28 Abril/79	
Cariamanga	29,8	26 Noviembre/72	4,5	2 Julio/73	
				13 Diciembre/75	
				6 Enero/76	
				7 octubre/76	
Amaluza	30,4	4 Marzo/84	9,1	17 Agosto/76	S.d. 1971 a 1974
Catacocha	28,5	26 Octubre/72	9,0	13 Mayo/71	S.d. 1982 a 1986
Celica	26,5	28 Noviembre/86	6,4	16 Julio/81	S.d. 1984, 1985
Macará	37,0	1 Marzo/81	11,5	27 Julio/74	S.d. 1983 a 1986
Zapotillo	38,6	17 Marzo/80	3,3	17 Julio/81	S.d. 1971 a 1979

1.6.1.2. Régimen pluviométrico.

Si se tomara en consideración, únicamente, la precipitación media anual que cae sobre la provincia, de aproximadamente 950 mm, se podría decir que Loja es una provincia semihúmeda. Pero la realidad es diferente debido a la distribución espacial de la lluvia. En las isoyetas anuales se puede apreciar mejor esta distribución de la lluvia. Pero los valores anuales no ofrecen una visión clara de la distribución de las precipitaciones. Este aspecto asoma más objetivamente cuando se analizan las precipitaciones mensuales. (ver tabla 1.6)

Con ayuda del coeficiente pluviométrico de Angot, se determinaron los siguientes tipos de régimen pluviométrico para Loja, que siguen la orientación de la Cordillera de los Andes, de Norte a Sur, en sentido longitudinal:

Tabla 1.5. Tipos de régimen pluviométrico para Loja

TIPO I:	Lluvia de enero a mayo (tipo costa).
Tipo II:	Lluvia de diciembre a mayo.
Tipo III:	Lluvia de octubre a mayo.
Tipo IV:	Lluvia en todo el año, casi uniformemente distribuida.
Tipo V:	Lluvia bien distribuida durante todo el año.

Las grandes precipitaciones del mes de Marzo juegan un papel importante en el reinicio anual de la vegetación y, por ende, para mantener el equilibrio del sistema agro-silvo-pastoril de la zona seca. El reinicio de las lluvias en Octubre (Tipos IV y V de régimen pluviométrico) determina la transición del clima hacia el Tipo ecuatorial propiamente dicho, y en los pisos temperados y fríos marca el inicio del ciclo agrícola anual.

Tabla 1.6. Precipitaciones medias mensuales de Loja (periodo 1964-1988) (mm)

ESTACIÓN	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
Saraguro	73,3	101,6	117,0	85,8	53,4	43,4	39,1	35,2	37,5	57,5	55,6	70,4	769,8
San Lucas	73,1	103,1	108,5	107,9	84,2	88,7	83,5	69,0	65,9	80,5	82,2	72,5	1019,1
La Argelia	87,7	109,2	122,9	90,2	54,1	56,8	58,3	49,9	47,8	70,4	58,6	75,7	881,6
Malacatos	67,6	88,1	120,0	98,0	40,1	16,7	10,0	14,3	28,0	62,1	54,4	87,6	686,9
Yangana	129,7	176,0	136,3	136,4	85,9	85,2	77,6	56,6	72,3	98,4	94,1	105,3	1253,8
El Cisne	138,5	204,2	193,1	145,0	50,1	12,8	9,2	10,5	22,3	72,8	71,7	113,5	1043,7
Catamayo	33,4	69,4	71,5	60,2	23,0	8,1	2,5	6,2	13,5	39,4	23,5	27,0	377,7
Gonzanamá	146,7	189,8	201,6	184,8	74,8	27,2	19,8	17,0	42,6	99,4	81,2	111,3	1196,2
Cariamanga	130,9	207,3	261,2	199,1	79,3	22,6	7,9	12,7	26,4	68,8	52,8	87,9	1156,9
Amaluza	103,1	154,5	161,2	136,3	63,8	14,2	10,2	8,8	22,2	55,2	65,4	76,7	871,6
Chaguarpamba	274,7	269,2	269,5	265,9	102,4	28,4	5,2	9,3	13,7	39,1	26,8	97,1	1401,3
Catacocha	107,3	183,3	214,8	144,3	47,6	8,3	3,9	7,4	16,4	31,8	25,4	55,8	846,8
Colaisaca	130,1	193,0	228,7	195,3	81,0	22,9	6,0	15,1	21,0	55,8	39,4	80,8	1069,1
Celica	197,7	275,0	340,6	223,0	62,0	16,8	3,3	7,3	8,5	18,9	24,5	81,8	1259,4
Macará	66,3	113,1	238,4	138,1	30,5	9,6	0,6	0,6	1,4	7,2	4,0	20,5	630,3
Alamor	159,6	251,4	372,2	261,5	90,8	21,7	8,5	5,6	9,5	19,2	19,8	76,9	1296,7
Saucillo	81,8	121,0	298,8	127,8	22,9	5,4	2,0	0,0	0,2	3,4	5,2	23,3	691,8
Zapotillo	55,0	117,0	126,2	112,9	34,0	6,0	0,5	0,0	0,3	3,8	2,9	12,6	591,2
Chaguargua	112,4	170,9	322,5	182,4	75,2	26,5	6,8	2,6	4,1	10,4	8,6	44,7	967,1

1.6.1.3. Balance Hídrico Climático

Para tratar de abarcar, con la información meteorológica disponible, todo el territorio de la Provincia de Loja, se realizó una zonificación edafo-climática que consta de 15 sectores más o menos homogéneos en cuanto a suelos y clima y el páramo. Para ello se definieron los límites de 15 zonas de características edafológicas y climatológicas relativamente homogéneas, seleccionándose para cada una de ellas una estación meteorológica que fuese representativa del área. Para cada estación se determinó un balance hídrico a nivel mensual. En el que se señalan los límites de cada zona y sus estaciones meteorológicas representativas con sus respectivos diagramas de balances. Para poder estimar los balances se ha considerado como aportes hídricos a la lluvia 75 % probable (tabla 1.6), calculada para el período 1964-1988 (25 años).

Tabla 1.7. Precipitación probable (75%) de la provincia de Loja (mm)

Nº	Z. EDAFO-CLIMATICA	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
1	Saraguro	60	83	96	70	44	38	32	29	31	47	46	58	634
2	Argelia	75	94	106	78	47	49	50	43	41	61	50	65	759
3	Malacatos	57	74	101	82	34	14	8	12	24	52	46	74	578
4	Yangana	96	130	101	101	64	63	57	42	54	73	70	78	929
5	Catamayo	26	53	55	46	18	6	2	5	10	30	18	21	290
6	Gonzanamá	120	156	165	152	61	22	16	14	35	82	67	91	981
7	Cariamanga	96	151	191	145	58	16	6	9	19	50	39	64	844
8	Amaluza	73	110	114	97	45	10	7	6	16	39	47	54	618
9	Catacocha	75	129	150	101	33	6	3	5	11	22	18	39	592
10	Celica	136	190	235	154	43	12	2	5	6	13	17	56	86
11	Macará	30	52	110	64	14	4	0	0	1	3	2	9	289
12	Zapotillo	13	27	57	26	8	1	0	0	0	1	1	3	137
13	Yúluc	43	48	57	53	33	10	5	6	12	13	16	28	324
14	Chaguarpamba	175	196	218	174	82	23	5	6	20	29	30	90	1048
15	Alamor	153	195	192	175	60	21	5	5	9	15	18	70	918
	Media	82	113	130	101	43	20	13	12	19	35	32	53	654

1.6.1.4. Clasificación climatológica.

De acuerdo al mapa climático realizado según la clasificación de Köppen (tabla 1.8), en Loja se puede diferenciar seis tipos climáticos: dos correspondientes a la

zona geográfico-climática Tropical Lluviosa (A), uno a la Tropical Seca (B), dos a la Mesotérmica (C) y uno a la Templada Fría (D).

Tabla 1.8. Tipos de clima de la provincia de Loja, según KÖPPEN

Nº	TIPO CLIMATICO	FORMULA	AREA (km ²)	%
1	Sábana Tropical	Aw	1.975	18,3
2	Sábana Tropical de Altura	AwH	1.544	14,3
3	Tropical Semiárido con Lluvia en Verano	BSW	3.250	30,1
4	Templado Húmedo (Mesotérmico) de Invierno Seco	CW	1.457	13,5
5	Templado Húmedo (Mesotérmico) sin Estación Seca	Cf	1.358	12,5
6	Templado Frío, de Invierno Seco	Dw	1.209	11,3

1.7. Radiación de Loja

Los niveles de radiación en la ciudad de Loja hacen que el uso de hornos solares sea una de las mejores variantes para lograr contrarrestar el déficit de madera de buena calidad.

Las diferentes características de la radiación solar se muestran en las tablas y cuadros siguientes:



INTRODUCCIÓN GENERAL

El siguiente trabajo de investigación es parte de una de las dificultades que acosan a la industria maderera de nuestro país y especialmente a nuestra provincia la que aún no ha sido posible superar como es el caso de los aserraderos que, a más de ser muy pequeños, están mal equipados y tienen una productividad muy baja pero su principal problema radica en la falta de tecnología para los diferentes procesos a los que debe someterse la madera y uno de estos procesos es el de secado.

El secado de la madera es un proceso indispensable para lograr la calidad de esta en diferentes usos, principalmente en la fabricación de muebles del hogar y oficina.

El secado de la madera resulta tan importante que debe realizarse, incluso si para ello fuera necesario el uso de petróleo u otros recursos energéticos convencionales.

Asimismo, el secado natural o secado al aire de la madera no responde a la dinámica de su necesidad, ya que se requieren largos períodos (meses y a veces años) para que el secado se efectúe hasta el contenido de humedad requerido

Este método utiliza también grandes extensiones de terreno para el proceso de secado y, lo más evidente, en aquellos lugares donde se emplea solamente el secado natural, la calidad de la madera es inapropiada para su uso posterior.

Un método más económico desde el punto de vista energético es el uso de desperdicios de la madera como combustible, aunque esto es factible en aserríos y no resulta generalmente en el secado de madera de importación ni en las fábricas de muebles y otros artículos de madera. Este método tiene además la desventaja de conllevar gastos de inversión muy altos, tanto en la obra civil como en el equipamiento necesario.

La experiencia ha demostrado que el secado en cámaras con energía solar es la mejor variante, debido a que requiere un consumo mínimo de energía convencional. Además, los gastos de inversión son también mínimos, comparados con los secadores



de petróleo y residuos de la madera, al no tener que invertir en hornos, calderas ni plantas trituradoras de desperdicios.”

Además se encuentran las perspectivas de agotamiento de las fuentes no renovables de energía que han llevado a los países a investigar el uso económico de las fuentes renovables, como la energía hidroeléctrica, **ENERGIA SOLAR**, eólica, de la biomasa vegetal, de las mareas y geotérmica.

La situación geográfica de nuestro país, la hace ideal para trabajar con secadores solares, ya que la radiación incide sobre todas sus latitudes obteniendo un promedio diario de energía solar de 3 a 4 Kwh/m² día.

Se puede afirmar que las zonas con radiaciones mayores o iguales a 3 KW-h/m² día, son favorables para aprovechamientos térmicos como secado solar, calentamiento de agua y generación eléctrica (sistemas fotovoltaicos); a menor valor de radiación mayor deberá ser el tamaño de los equipos receptores de energía haciendo más costoso su aprovechamiento e instalación.

En general el promedio para **TODO EL PAIS** esta en el orden de **4 KW-h/m²-día**, esto corrobora con la posición estratégica que tenemos por estar situados en el paralelo cero que hace que contemos con una radiación solar envidiable para cualquier otro país y constante durante todo el año.

Motivo por el cual trazamos como ***problema*** fundamental de investigación ***“Insuficiente calidad en el secado de la madera obtenida por el método tradicional (secado al aire atmosférico), así como un elevado consumo de tiempo que hace ineficiente el proceso”***.

Este método trae consigo desventajas como son:

- Es muy lento
- Baja calidad de la madera
- Menor uniformidad
- Ocupa mucho espacio
- Depende del clima



Y todas estas desventajas afectan directamente al precio de la misma

En base a este problema nos hemos propuesto como **objetivo general**:

“Calculo y Diseño de un Horno Solar de maderas teniendo en cuenta los parámetros que exige este proceso de secado eficiente” y para poder cumplirlo nos apoyaremos en los **objetivos específicos** que son:

- ◆ Establecer el estado actual de la temática del secado de maderas en hornos solares.
- ◆ Explicar la metodología para el calculo y diseño de hornos solares para el secado de madera.
- ◆ Realizar los cálculos y análisis de los resultados de la metodología propuesta.
- ◆ Efectuar la valoración económica e impacto ambiental de la propuesta hecha en nuestra investigación.
- ◆ Socializar los resultados de esta investigación a la comunidad comercial, artesanal e industrial de la madera de la ciudad de Loja.

Este tiempo que se emplea en el proceso de secado es un factor determinante en el precio y calidad de la madera presentándose así como una de las alternativas mas factibles para dar solución a este problema la siguiente **hipótesis general**:

“Con el calculo, diseño, y utilización de un horno solar de maderas, en el cual se toma en cuenta los parámetros que exige un proceso de secado eficiente; se logrará reducir considerablemente el tiempo de este proceso”

además teniendo en cuenta lo que este proceso representa se plantean las **hipótesis específicas** que nos ayudaran a dar mayor respaldo a la calidad de este trabajo y son :

- ◆ Determinando los parámetros físicos y estructurales necesarios se logrará identificar un proceso de secado eficiente.



- ◆ A partir del diseño de hornos solares que constituye una novedad en el campo de la utilización de la energía renovable en Ecuador se proponen alternativas que aporten a la economía y al medio ambiente.
- ◆ Socializando los resultados de esta investigación a la comunidad comercial, artesanal e industrial de la madera de la ciudad de Loja; abriría las fronteras del conocimiento en estas tecnologías.
- ◆ La difusión de la metodología de cálculo y diseño permitirá formar especialistas en esta rama de estudio.

Asimismo con el uso de los hornos solares podemos mejorar los tiempos de secado, aumentando así la productividad y competitividad del sector maderero de nuestra ciudad y con ello lograríamos que los precios de la madera se reduzcan notablemente.

Otra de las razones por las que se pretende realizar este proyecto es por las diversas posibilidades de ahorro que nos ofrece la energía solar mediante diversas aplicaciones en este caso la aplicación térmica, que dicho sea de paso también se abren las posibilidades de hacer conocer a las personas el gran beneficio que se tiene utilizando la energía solar, y las grandes ventajas que el uso de esta representa ante las otras fuentes de energía así como además ayuda en la conservación del medio ambiente.

Tabla 1.8 Variación de la irradiancia total máxima*

		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
GM maxima	W / m ²	643,63	649,84	660,86	691,55	704,09	635,45	663,83	721,68	707,40	719,81	768,56	752,56
GMpromedio	W / m ²	561,97	578,50	598,38	582,41	599,46	555,24	599,70	623,33	625,55	656,58	672,00	643,68
Gm mínima	W / m ²	467,72	493,79	510,19	526,41	513,44	421,84	518,23	527,48	490,26	592,87	577,08	579,23

Tabla 1.9 Variación de la Irradiancia máxima directa promedio mensual

		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
GbM max	W / m ²	425,04	423,04	423,93	475,72	496,44	437,14	451,00	502,60	486,63	489,02	548,45	537,03
GbM prom	W / m ²	336,71	346,62	358,53	355,38	378,85	350,90	379,00	393,94	395,34	421,19	437,47	412,92
GbM min	W / m ²	239,95	259,67	261,74	297,17	283,25	209,94	292,55	291,00	257,81	348,76	339,47	340,74

*Datos proporcionados por la estación Meteorológica “LA ARGELIA” de la ciudad de Loja

Tabla 1.10 Calculo de H, GM, GbM, a partir de dato de heliofania medio mensual*

01	Nombre de la estación:	“La Argelia”
02	Latitud	S 04 00
	Longitud	7912
	Elevación	2135
03	Périodo de observación	1963-1999
04	Naturaleza de la información	heliofania efectiva

		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUNIO	JULIO	AGOST	SEPT	OCT	NOV	DIC
GM	W / m ²	561,97	578,50	598,38	582,41	599,46	555,24	599,70	623,33	625,55	656,58	672,00	643,68
GbM	W / m ²	336,71	346,62	358,53	355,38	378,85	350,90	379,00	393,94	395,34	421,19	437,47	412,92

		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUNIO	JULIO	AGOST	SEPT	OCT	NOV	DIC
HE	h/d	3,67	3,69	3,58	3,99	4,42	4,45	4,46	4,62	4,71	4,81	5,31	4,95
ñ/Ñ		0,30	0,31	0,30	0,34	0,37	0,38	0,38	0,39	0,39	0,40	0,44	0,41
H	MJ/m ²	14,83	15,14	15,53	14,99	15,30	14,17	15,30	16,04	16,23	17,18	17,73	16,98
GM	W / m ²	561,97	578,50	598,38	582,41	599,46	555,24	599,70	623,33	625,55	656,58	672,00	643,68
GbM	W / m ²	336,71	346,62	358,53	355,38	378,85	350,90	379,00	393,94	395,34	421,19	437,47	412,92

*Datos proporcionados por la estación Meteorológica “LA ARGELIA” de la ciudad de Loja

Tabla 1.11 Valores de radiación mensual de Loja

Latitud	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
4°	4,12	4,21	4,31	4,16	4,25	3,39	4,25	4,46	4,51	4,78	4,93	4,72



CAPITULO 2: CALCULO PARA EL DISEÑO Y SELECCIÓN DE HORNOS SOLARES EN EL SECADO DE MADERA.

2.1 Introducción

La aplicación de los secadores solares ha adquirido una gran importancia en el tratamiento de productos para acelerar el tiempo de secado,

Aunque se ha desarrollado cierta variedad de secadores solares, desde el punto de vista constructivo estos equipos tienen similitud, ya que todos cuentan con una cámara de secado con un adecuado aislamiento y una superficie captadora de la energía de la radiación solar.

El diseño de estos equipos se ha encaminado a dar soluciones geométricas de la superficie absorbadora que incrementen el rendimiento de la captación solar, conjuntamente con el empleo de materiales de mejores propiedades ópticas. Esto ha conllevado a que las diferencias de estos equipos se encuentran fundamentalmente en la configuración del plato absorbedor.

Para diseñar secadores solares se usan métodos que se apoyan fundamentalmente en dos elementos, que son los balances de energía y el uso de modelos del comportamiento térmico del sistema. Los algoritmos basados en el comportamiento térmico del sistema son los más empleados por su facilidad y probada eficacia, y los datos se obtienen de evaluaciones de prototipos o mediante el análisis del comportamiento del secador, empleando un modelo matemático y un programa de computación.

2.2 Principios técnicos del secado

Básicamente, el secado consiste en retirar por evaporación el agua de la superficie del producto y traspasarla al aire circundante. La rapidez de este proceso depende del aire (la velocidad con la que éste circule alrededor del producto, su grado de sequedad,



temperatura, etcétera), y de las características del producto (su composición, su contenido de humedad, el tamaño de las partículas, etcétera).

Según la temperatura dentro de la cámara de secado, el aire puede admitir más o menos humedad. Por ejemplo el aire a 60 ° C se satura con 130.3 gramos de agua por metro cúbico. Si a dicha temperatura no lleva más que 65 gramos de agua este se encontrará semisaturado y su humedad relativa será del 50 %. Si el aire se enfría 40 ° C (a esta temperatura la saturación se verifica con 50.8 gramos de agua) no podrá contener toda la humedad que lleva y precipitará el exceso de $(65 - 50.8 = 14.2)$ gramos de agua por metro cúbico como rocío sobre los objetos que se hallen en contacto con él. Esta es la razón por la cual con el aumento de la temperatura aumenta la capacidad del aire para absorber la humedad.

La cantidad de vapor de agua presente en el aire se llama humedad. Un aire absolutamente seco, sin vapor de agua en su interior, contiene una humedad relativa de 0%, mientras que uno saturado de agua tiene una humedad relativa de 100%. La cantidad de vapor de agua que el aire puede absorber depende, en gran medida, de su temperatura. Existen tablas que permiten calcular la cantidad adicional de vapor de agua que el aire puede absorber a una temperatura y una humedad relativa determinada. A medida que el aire se calienta, su humedad relativa decae y, por tanto, puede absorber más humedad. Al calentarse el aire alrededor del producto, éste se deshidrata más rápidamente.

En la Tabla 2.1 puede apreciarse cómo, a mayor temperatura, más capacidad del aire de absorber agua. Cuanto mayor sea el flujo de aire más rápidamente se eliminará el agua del producto que se está secando. En ella se muestra la cantidad de agua que, en teoría, puede absorber el aire. Sin embargo, en la práctica nunca se alcanzan estos niveles.

Existen muchas razones para ello: la eficiencia con la que el aire se mezcla con el producto, la naturaleza del producto y otras. En condiciones normales, el aire puede retirar un 30 a 50% de esta cantidad teórica. Esta capacidad se conoce como "factor de arrastre" y se convierte en una guía para quienes diseñan equipos de secado.

Tabla 2.1. Cantidad de agua que puede absorber el aire

Temperatura °C	HR	Gramos de agua que pueden ser retirados por kg. de aire seco
29	90	0.6
30	50	7
40	28	14.5
50	15	24

2.3 Propiedades de la madera.

Las características del producto, su naturaleza y el tamaño de las partículas influyen de forma significativa en el nivel de secado.

De las propiedades físicas de la madera, la que reviste mayor importancia para el usuario es la Densidad. Esta es un indicativo de cuanto material leñoso, en gramos, presenta una madera por unidad de volumen expresada en g/cm³. La densidad también varía de acuerdo a la cantidad de humedad y de sustancias en las células. A mayor densidad mayor fortaleza mecánica. Por eso las maderas más densas son más durables que las livianas, aunque son más difíciles de trabajar, de hornear y de inmunizar.

Con respecto a la densidad, se debe tener en cuenta que el término “verde” se refiere a la madera con un contenido de humedad mayor 30% y la densidad verde, es la relación entre el peso y el volumen verde.

El contenido de humedad se refiere al peso del agua de una pieza de madera que se expresa en porcentaje, el cual tiene gran influencia en el peso de la madera y sus propiedades mecánicas. Pero cuando la madera es secada por debajo del 30% las paredes celulares se vuelven mas duras y rígidas. Por lo tanto al vender o comprar la madera se debe especificar su humedad para saber que se puede esperar de la misma desde el punto de vista mecánico.

Otra propiedad es la Contracción, y es importante desde el punto de vista de su utilización. Toda madera que se seca, se contrae, ocasionando una disminución de sus dimensiones, lo cual hace que la madera se tuerza y se raje. La contracción se expresa como un porcentaje de las dimensiones en estado verde.

2.3.1 Importancia del Contenido de Humedad de Equilibrio

El conocimiento de la humedad de equilibrio (**CHE**) de la madera es fundamental para la conducción del secado artificial, porque es el parámetro que ayuda a guiar la manipulación de la temperatura y la depresión psicrométrica en el interior del secador, hasta alcanzar el nivel de humedad al que la madera será procesada o utilizada.

Como las condiciones ambientales de todos los sitios varían constantemente, ninguna madera se encuentra en equilibrio estable, sino que el contenido de humedad sigue las fluctuaciones que le condiciona el medio ambiente. Es por ello que el valor del equilibrio higroscópico de una pieza de madera hay que referirlo al lugar y momento de su verificación.

Toda la madera, de árboles en crecimiento contiene una considerable cantidad de agua, comúnmente llamada savia. Las maderas pierden o ganan humedad en un intento de alcanzar un estado de equilibrio o balance con las condiciones del ambiente. Este estado de equilibrio depende de la humedad relativa y la temperatura del ambiente.

La cantidad de humedad en la madera esta en términos del contenido de agua o humedad. Esta puede estar expresada en porcentaje de peso húmedo o seco. Para muchos propósitos el contenido de humedad en madera esta en peso seco.

La cantidad de agua en maderas verdes varia considerablemente, dependiendo principalmente de la especie. El contenido de humedad de algunas especies puede ser tan bajo como 30% de contenido de humedad en equilibrio considerando que otras puede ser tan alto como 200%.

Tabla 2.2 Denominación de la madera en función de su contenido de humedad

Denominación del estado de la madera	Nivel de humedad	Lugar de ubicación
Madera verde	80 a + 200%	de bajo cubierta en el bosque
Madera húmeda	25 a 80 %	recién cortada, en patio a la intemperie
Madera poco seca	de 20 a 25%	aire libre
Madera seca al aire	15 a 20%	de bajo techo
Madera muy seca	de 8 a 15%	interiores
Madera anhidra	0%	en laboratorio

2.3.2 Método para determinar el Contenido de Humedad.

Existen varios métodos para determinar el contenido de humedad de la madera, uno de los más comunes es el método gravimétrico o por diferencias de pesadas y es el método que hemos utilizado en este trabajo.

En este método se emplea una balanza con una precisión aproximada de 0,1 g para pesar la muestra (peso húmedo) al momento de su obtención y después se determina el peso anhidro, este método es uno de los más exactos y confiables.

2.3.3 Formula para calcular el contenido de humedad (CH)

El nivel de humedad de la madera se calcula como un porcentaje del peso del agua que contiene, respecto al peso del material seco:

$$CH = \frac{Ph - Po}{Po} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

Donde:

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

Po = Peso de la madera anhidra (kg)

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

Para calcular el contenido de humedad, se emplea una probeta pequeña de madera. El peso seco o anhidro se determina después de exponer la probeta a una temperatura de aproximadamente 103 °C, hasta que su peso no varíe.

Esta expresión es relativa y no proporciona una medida de la cantidad absoluta de humedad, a no ser que se tome en cuenta la densidad o peso específico básico del material.

2.3.4 Humedad límite de la madera o equilibrio higroscópico

Pasado cierto tiempo, la humedad contenida en la madera adquiere un estado estacionario, oscilando entre valores que no se diferencian mucho entre sí, siempre y cuando las condiciones ambientales no varíen mucho. Así, se puede comprobar que durante el transcurso del tiempo la madera va perdiendo paulatinamente su humedad hasta llegar un momento a partir del cual su contenido de humedad permanece invariable.

Puede afirmarse que transcurrido un tiempo determinado se establece siempre un equilibrio entre la humedad contenida en el aire que rodea la madera y el grado de humedad de esta última.

Es necesario conocer cuál es la humedad límite de la madera para cada temperatura y estado higrométrico del aire ambiente del lugar donde ha de emplearse dicha madera, secarla más sería un trabajo inútil y aumentaría sólo el costo de la operación sin utilidad.

A continuación la Tabla 2.3 presenta las humedades límites aproximadas de la madera, en función directa de la de la humedad relativa y de la temperatura del aire que la rodea.

Tabla 2.3 Humedad límite de la madera (en %)

Humedad relativa del aire (%)	Temperatura (°C)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
10	3	3	2.5	2.5	2	2	2	1.5	1	1
20	5	5	4.5	4	4	3.5	3	3	2.5	2
30	6	6	6	6	5.5	5	4.5	4	3	3
40	8	8	7.5	7	6.5	6	5.5	5	4.5	4
50	10	9.5	9	8.5	8	7	7	6	5.5	5
60	11.5	11	11	10.5	10	9	8	7.5	7	6
70	14	14	13	12.5	11.5	11	10	9	8.5	8
80	18	17.5	17	16	15	14	13	12	11	10.5
90	22	22	21	21	20	18.5	17.5	16.5	15.5	15
100	32	31	29.5	29	28	27	26	25	24	23



Observando atentamente la tabla anterior, vemos que se puede alcanzar una misma humedad límite con temperaturas y estados higrométricos diferentes. Esta circunstancia facilitará el secado artificial de la madera hasta el grado de humedad deseado regulando las condiciones de temperatura y humedad de la atmósfera del secador, de acuerdo con las características más apropiadas de las instalaciones que se posean. En general se podrá secar la madera usando temperaturas y estados higrométricos elevados, o por el contrario, usando temperaturas y estados higrométricos bajos.

2.3.5 Cálculo de los parámetros fundamentales del secador

Para el cálculo de los parámetros fundamentales de la instalación de secado de madera se ha seleccionado el pino, por ser el tipo de madera más común.

Todos los cálculos se han hecho en base a un 1 m^3 de madera, lo que permite posteriormente diseñar un secador de cualquier capacidad.

2.3.5.1 Datos de la madera:

- Tipo de madera: Pino
- Peso específico: $P_o = 600 \text{ kg} / \text{m}^3$
- Contenido de Humedad Inicial: $w_o = 33\%$
- Contenido de Humedad Final: $w_f = 12\%$
- Volumen de la madera a secar: $V_m = 1 \text{ m}^3$

2.3.5.2 Datos del Aire:

- Temperatura inicial del aire: $t_o = 15,5^\circ \text{C}$
- Temperatura final del aire: $t_f = 50^\circ \text{C}$
- Humedad relativa inicial: $n_o = 70 \%$
- Humedad relativa final: $n_f = 70 \%$
- Entalpía Inicial: $I_o = 51,49 \text{ kJ} / \text{kg. de aire seco}$

- Entalpía Final: $I_f = 187,57 \text{ kJ / kg. de aire seco}$
- Contenido de humedad inicial: $X_o = 0,0075 \text{ kg. de humedad / kg. de aire seco.}$
- Contenido de humedad Final: $X_f = 0,0589 \text{ kg. de humedad / kg. de aire seco.}$

2.3.5.3 Humedad total a extraer por m^3 de madera:

$$W_t = P_o \cdot V_m \frac{W_o - W_f}{100 - W_f} \quad (2.2)$$

$$W_t = 600 \text{ kg} \cdot (1 \text{ m}^3) \frac{33 - 12}{100 - 12}$$

$$W_t = 143,48 \text{ Kg de humedad / m}^3 \text{ de madera}$$

2.3.5.4 Consumo Especifico de Calor

$$q = \frac{I_f - I_o}{X_f - X_o} \quad (2.3)$$

$$q = \frac{(187,57 - 51,49) \text{ kJ / kg de aire seco}}{(0,0589 - 0,0075) \text{ kg de humedad / kg de aire seco}}$$

$$q = 2647,47 \text{ kJ / kg de a humedad.}$$

2.3.5.5 Calor total necesario para cada m^3 de madera (Q).

$$Q = q \cdot W_t \quad (2.4)$$

$$Q = (2647 \text{ KJ / kg de humedad}) \cdot (143,18 \text{ kg de humedad / m}^3 \text{ de madera})$$

$$Q = 379100,46 \text{ kJ / m}^3 \text{ de madera}$$

Con estos datos y con los criterios expuestos en tópicos anteriores, se procede a determinar la forma y dimensiones de la instalación. Para lograr el correcto movimiento del aire y un secado uniforme se selecciona una relación entre el volumen de la cámara (V_c) y el volumen de la madera (V_m) igual a 7 esto es :

$$\frac{V_c}{V_m} = 7 \quad (2.5)$$

Para nuestra instalación se requiere una capacidad de secado de 6 m^3 de madera, por tanto los parámetros fundamentales de la cámara de secado son:

El volumen de la cámara calculado por la relación anterior es:

$$V_c = V_m \cdot 7 \quad (2.5.a)$$

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

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

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

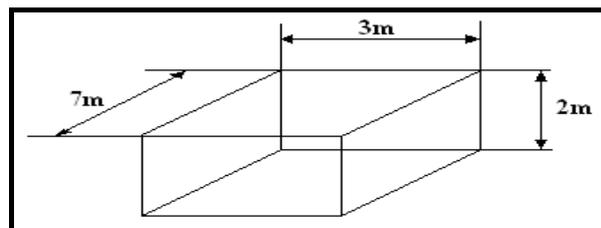


Figura 2.1 . Dimensiones de la cámara de secado

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

Ancho: $A_n = 3 \text{ m}$

Alto: $H_c = 2 \text{ m}$

Largo: $L_c = 7 \text{ m}$

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



Para lograr una mejor distribución de la energía solar en el interior de secador durante el día, se sitúa el eje longitudinal de la cámara en dirección Norte – Sur.

Con estos valores el área de captación del secador sería de $21m^2$.

2.3.6 Cálculo de la energía útil del secador

Para el diseño o selección de un secador solar es necesario conocer las condiciones de operación a la que estará sometido el equipo, en nuestro caso se exponen las condiciones de la ciudad de Loja en Ecuador.

2.3.6.1 Condiciones de operación

Latitud (ϕ): - 4° (Loja)

Mes y día escogidos para el cálculo: 12 junio (i) (día promedio de radiación solar)

Velocidad media del viento (V): 3,3 m/s. *

Temperatura ambiental (T_a): 15,5 °C*

* (Datos proporcionados por la estación Metereológica “LA ARGELIA” de la ciudad de Loja)

Se considera que respecto al comportamiento de la radiación solar, el día es simétrico.

2.3.6.2 Características del secador solar

Plato de absorción de Acero

Número de cubiertas de vidrio (N): 2

Área del Secador Solar (A_c): $21m^2$

Área lateral (A_l): $40m^2$

Espesor de la lámina de vidrio (L): $5mm = 0,005m$

Coefficiente de absorción del vidrio (K_a): $2,5 m^{-1}$



Absorbencia del plato: $\alpha=0,95$

Espesor de la plancha del plato de absorción (d): $2mm = 0,002 m$

Temperatura de entrada del fluido (T_f): $15^\circ C$

Incremento de temperatura del fluido ($\Delta T_f = 35^\circ C$)

Espesor del aislante de los laterales:

$L_b = 70mm$ (poliuretano)

$L_a = L_c = 80mm$ (ladrillo)

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

Inclinación del calentador solar: $S = 14^\circ$ ($S = \text{Latitud} + 10 \text{ grados}$)**

**Criterio utilizado por diversos autores (Duffie & Beckmann)

2.3.6.3 Parámetros de la cinemática solar

2.3.6.3.1 Determinación de la declinación solar para el día medio del mes de Junio (δ) y energía incidente.

Para nuestro caso hemos creído conveniente trabajar con el día 12 del mes de junio por ser este mes el de mas baja radiación en la ciudad de Loja

Teniendo así el valor de (n) de la tabla 1.6.1 de Duffie (1991) que transforma el día correspondiente del mes en el día correspondiente del año siendo para el mes de junio:

$$n = 151 + i \quad (2.6)$$

entonces:

$$n = 151 + 12$$

$$n = 163$$

Siendo n : el día medio del mes de junio ($n = 163$)

$$\delta = 23,45 \cdot \text{sen} \left(360 \left(\frac{284 + n}{365} \right) \right) \quad (2..7)$$

$$\delta = 23,45 \cdot \text{sen} \left(360 \left(\frac{284 + 163}{365} \right) \right)$$

$$\delta = \underline{\underline{23,153^\circ}}$$

2.3.6.3.2 Angulo horario de salida del sol (W_s).

El Angulo Horario de Salida del Sol se calcula según la ecuación tomada del Duffie (1991) para $n = 163$.

$$W_s = \cos^{-1}(-\text{tg}\phi \cdot \text{tg}\delta) \quad (2.8)$$

$$W_s = \cos^{-1}(-\text{tg}(-4) \cdot \text{tg}(23,153))$$

$$W_s = \cos^{-1}(0,0299027952)$$

$$W_s = \underline{\underline{88,28^\circ}}$$

2.3.6.3.3 Determinación de la radiación solar extraterrestre sobre una superficie normal al sol (H_o).

Este valor se puede escoger de tablas para cada día del año, o se determina según Duffie (1991) para cada día del año por medio de una ecuación empírica, siendo:

$$H_o' = \frac{24 \cdot 3600 \cdot I_{sc}}{\pi} \left(1 + 0,033 \cos \left(\frac{360 \cdot (n)}{365} \right) \right) \cdot \left(\cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \text{sen}W_s + \left(\frac{\pi \cdot W_s}{180} \right) \text{sen}\phi \cdot \text{sen}\delta \right) \quad (2.9)$$

Donde:

I_{sc} es la Constante Solar y tiene un valor de 1367 W/m^2

Luego tenemos que:

$$H_o' = \frac{(24) \cdot (3600) \cdot (1367)}{\pi} \left(1 + 0,033 \cos \left(\frac{360 \cdot (163)}{365} \right) \right) \cdot \left(\cos(-4) \cdot \cos(23,153) \cdot \text{sen}(88,28) + \left(\frac{\pi \cdot (88,28)}{180} \right) \text{sen}(-4) \cdot \text{sen}(23,153) \right)$$

El valor de radiación solar extraterrestre es de:

$$H_o' = \underline{\underline{31,85 \text{ MJ/m}^2 \text{ h}}}$$

En la tabla 1.10.1 de la Página. 42 del Duffie (Duffie J. A., 1991) aparecen los valor de la radiación solar extraterrestre diaria y haciendo una interpolación se obtiene en valor de 31,85MJ/m² día para -4° en el mes de junio como un promedio mensual de radiación diaria extraterrestre el cual es muy semejante al obtenido con la ecuación.

2.3.6.3.4 Cálculo de la radiación total diaria por unidad de área de una superficie horizontal (H').

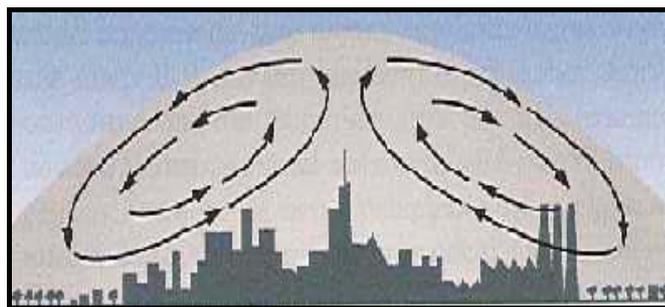


Figura 2.2. Cúpula de polvo sobre una ciudad

$$H' = K_T \cdot H_o' \tag{2.10}$$

esto es una función de

$$K_T = \frac{H'}{H_0'}$$

Siendo:

K_T : (Coeficiente de nubosidad o factor de turbiedad de la atmósfera y tiene en cuenta la transparencia de la atmósfera por efectos de nubes, polvo, aerosoles, ozono, etc.). su valor es 0,383 para el mes de junio en Loja - Ecuador.

$$H' = 0,383 \cdot (31 \cdot 85^3) \text{ kJ/m}^2 \text{ h}$$

$$H' = \underline{12,20 \times 10^3 \text{ kJ/m}^2 \text{ h}}$$

2.3.6.3.5 Cálculo de la radiación difusa diaria que cae sobre una superficie horizontal (H_d').

$$H_d' = f(K_T) \cdot H' \quad (2.11)$$

Según Liu-Jordán (1960) $f(K_T)$ viene dada por la siguiente expresión:

$$f(K_T) = 1,3903 - 4,0273 \cdot (K_T) + 5,5315 \cdot (K_T)^2 - 3,1080 \cdot (K_T)^3 \quad (2.12)$$

para valores de $0,3 < K_T < 0,7$

de lo cual tenemos:

$$f(K_T) = 1,3903 - 4,0273 \cdot (0,383) + 5,5315 \cdot (0,383)^2 - 3,1080 \cdot (0,383)^3$$

$$f(K_T) = 0,485$$

entonces:

$$H_d' = 0,485 \cdot 12,20 \cdot 10^3 \text{ kJ/m}^2 \text{ h}$$

$$H_d' = \underline{5,91 \times 10^3 \text{ kJ/m}^2 \text{ h}}$$

2.3.6.3.6 Determinación de la radiación solar total horaria por unidad de área que cae sobre una superficie horizontal (H).

$$H = K \cdot H' \tag{2.13}$$

Siendo:

K, la relación entre la radiación solar horaria y la radiación solar total diaria y se calcula por la siguiente expresión tomada de Duffie (1991) :

$$K = \left(\frac{\pi}{24}\right) \cdot (a + b \cdot \cos W) \cdot \left(\frac{(\cos W - \cos W_s)}{\text{sen}W_s - \left(\frac{(\pi \cdot W_s)}{180}\right) \cdot \cos W_s} \right) \tag{2.14}$$

$$a = 0,409 + 0,5016 \text{ sen } (W_s - 60) = 0,646 \tag{2.15}$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \text{ sen } (W_s - 60) = 0,434 \tag{2.16}$$

y W es el ángulo Horario que toma valor 0 para el mediodía solar y varía 15° cada hora.

A partir de lo anterior se hallan los valores de K para cada hora del día y se calcula la Radiación Solar Total horaria por unidad de área sobre una superficie horizontal (H).

Tabla. 2.4. Radiación solar total horaria por unidad de área

Horas del día	W	K	H ($\text{kJ/m}^2 \text{ h}$)
6 - 7 17 - 18	75°	0,024	290,75
7 - 8 16 - 17	60°	0,056	679,68
8 - 9 15 - 16	45°	0,089	1081
9 - 10 14 - 15	30°	0,117	1432
10 - 11 13 - 14	15°	0,137	1671
11 - 12 12 - 13	0°	0,144	1755

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

En la Página 91 del Duffie (1991) aparece la ecuación de la relación entre la radiación difusa horaria y la radiación difusa diaria sobre una superficie horizontal como función de la longitud del día. De esta ecuación se obtienen los valores de K_d .

$$H_d = K_d \cdot H_d' \quad (2.17)$$

Los valores de K_d fueron encontrados por la siguiente ecuación:

$$K_d = \left(\frac{\pi}{24} \right) \cdot \left(\frac{(\cos W - \cos W_s)}{\text{sen} W_s - \left(\frac{(\pi \cdot W_s)}{180} \right) \cdot \cos W_s} \right) \quad (2.18)$$

Con los valores horarios de K_d obtenidos con la ecuación 2.18 se calculan los valores de H_d los cuales se muestran a continuación:

Tabla 2.5. Radiación difusa horaria por unidad de área

Horas del día	W	K_d	$H_d(kJ/m^2 h)$
6 - 7 17 - 18	75°	0.031	185,76
7 - 8 16 - 17	60°	0.065	381,58
8 - 9 15 - 16	45°	0.093	549,73
9 - 10 14 - 15	30°	0.115	678,76
10 - 11 13 - 14	15°	0.129	759,73
11 - 12 12 - 13	0°	0.133	787,53

2.3.6.3.8 Determinación del valor del ángulo de incidencia horario de la radiación solar directa sobre el calentador solar (θ_i).

El ángulo de inclinación de la superficie captadora depende de la forma en que se utilizará el secador, esto es, de la estación del año en que el mismo funcione, principalmente si será invierno, verano o todo el año. En dependencia de esto habrá una inclinación específica para la superficie captadora. Si se desea un máximo rendimiento anual, se recomienda a darle a esta superficie una inclinación igual a la latitud del lugar.

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

$$\begin{aligned} \cos \theta_i = & (\text{sen} \delta \cdot \text{sen} \phi \cdot \cos S - \text{sen} \delta \cdot \cos \delta \cdot \text{sen} S \cdot \cos \gamma + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos S \cdot \cos W +) \\ & (+ \cos \delta \cdot \text{sen} \phi \cdot \text{sen} S \cdot \cos \gamma \cdot \cos W + \cos \delta \cdot \text{sen} S \cdot \text{sen} \gamma \cdot \text{sen} W) \end{aligned} \quad (2.19)$$

y para el hemisferio sur tenemos:

$$\cos \theta_i = [\cos(\phi + S) \cdot \cos \delta \cdot \cos W + (\text{sen}(\phi + S) \cdot \text{sen} \delta)] \quad (2.19.a)$$

$$\theta_i = \arccos[\cos(\phi + S) \cdot \cos \delta \cdot \cos W + (\text{sen}(\phi + S) \cdot \text{sen} \delta)] \quad (2.19.b)$$

Donde:

$S = 14^\circ$ (ángulo de inclinación de la superficie captadora.)

$\phi = -4^\circ$ (latitud de Loja)

$\delta = 23,153^\circ$ (Declinación Solar para el día medio del mes de Junio)

$W =$ ángulo horario que toma valor 0 para el mediodía solar y varía 15° cada hora.

Los resultados tanto de θ_i como de $\text{Cos } \theta_i$ son los que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2.6. Angulo de incidencia horario

Horas del día	W	$\text{Cos } \theta_i$	θ_i
6 - 7 17 - 18	75°	0,303	72,38
7 - 8 16 - 17	60°	0,521	58,59
8 - 9 15 - 16	45°	0,709	44,88
9 - 10 14 - 15	30°	0,852	31,52
10 - 11 13 - 14	15°	0,943	19,45
11 - 12 12 - 13	0°	0,974	13,15

2.3.6.3.9 Determinación del ángulo cenital (θ_z).

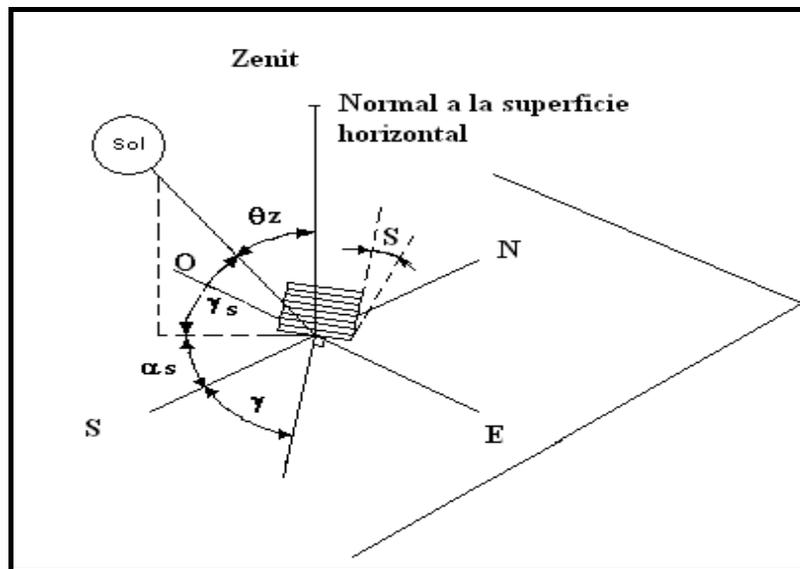


Figura 2.3 Angulo Zenital

Estos valores se calculan a partir de la expresión teniendo en cuenta que la cubierta está orientada al norte entonces el acimut $\gamma = 0^\circ$, por lo que el Ángulo cenital se calcula según la siguiente formula tomada de la página 16 del Duffie (1991).

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos W + \sin \delta \cdot \sin \phi \tag{2.20}$$

Los valores del ángulo cenital son los que se muestran en la Tabla 2.5. Los valores de θ_z se hallan para cada hora considerando que W es el ángulo horario que toma valor 0 para el mediodía solar y varía 15° cada hora.

Tabla 2.7. Valores ángulo cenital

Horas del día	W	Cos θ_z	θ_z
6-7 17-18	75°	0,210	77,88
7 - 8 16 - 17	60°	0,431	64,45
8 - 9 15 - 16	45°	0,621	51,6
9 - 10 14 - 15	30°	0,767	39,92
10 - 11 13 - 14	15°	0,859	30,84
11 - 12 12 - 13	0°	0,890	27,15

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

Este coeficiente nos da la relación entre la radiación que incide sobre una superficie inclinada y la que incide sobre una superficie horizontal como se observa en la figura

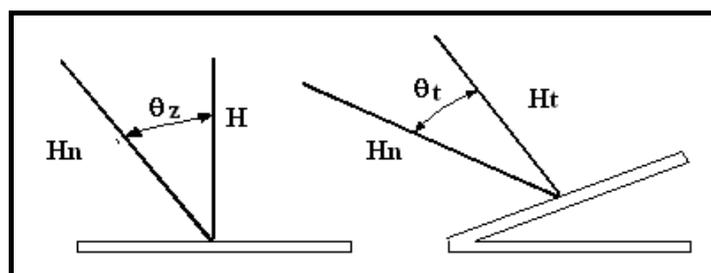


Figura 2.4. Radiación directa en superficies horizontal e inclinada

y viene dada por la siguiente expresión:

$$R_b = \frac{H_t}{H} = \frac{H_n \cos \theta_t}{H_n \cos \theta_z} \quad (2.21)$$

$$R_b = \frac{\cos \theta_t}{\cos \theta_z} \quad (2.21a)$$

De la ecuación 2.21.a se determina el valor de R_b para cada hora obteniendo los siguientes valores:

Tabla 2.8. Valores R_b para cada hora del día

Horas del día	W	R_b
6 - 7 17 - 18	75°	1,441
7 - 8 16 - 17	60°	1,208
8 - 9 15 - 16	45°	1,141
9 - 10 14 - 15	30°	1,112
10 - 11 13 - 14	15°	1,098
11 - 12 12 - 13	0°	1,094

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

La Radiación Solar Total Horaria se calcula según Duffie (1991) página 126 por la siguiente expresión.

$$H_t = (H - H_d) \cdot R_b + H_d \left(\frac{1 + \cos S}{2} \right) + H \cdot \rho_t \left(\frac{1 - \cos S}{2} \right) \quad (2.22)$$

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

- La energía producida por la radiación directa.

$$(H - H_d) \cdot R_b$$

- La energía producto de la radiación difusa.

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

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

$$H \cdot \rho_t \left(\frac{1 - \cos S}{2} \right)$$

Tabla 2.9. Valores de radiación solar total horaria

Horas del día	H_t ($\text{kJ/m}^2 \text{ h}$)	$H_t(\text{kJ/h})$ para $A=21\text{m}^2$
6 - 7 17 - 18	335,2	7035
7 - 8 16 - 17	738,14	15500,94
8 - 9 15 - 16	1151	24171
9 - 10 14 - 15	1510	31710
10 - 11 13 - 14	1754	36834
11 - 12 12 - 13	1840	38640

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

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

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

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

$$(\tau\alpha)_e = (\tau\alpha) + 0,27(1 - \tau) \quad (2.23)$$

O con el empleo de la figura 5.3.1 de la página 225 del Duffie (1991). Para nuestro caso los valores de $(\tau\alpha)_e$ los obtuvimos con el empleo de dicha figura, para cada valor de θ_t y se muestran en la Tabla 2.9:

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

α : Coeficiente de absorbencia del plato de absorción.

τ : Coeficiente de Transmisividad total de la cubierta de vidrio.

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

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

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

$$K_a \cdot L = 0,0125$$

se utilizan dos cubiertas.

Tabla 2.10. Valores de $(\tau\alpha)_e$ utilizando el método gráfico

Horas del día	θ_t	$(\tau\alpha)_e$
6 - 7 17 - 18	72,38	0,550
7 - 8 16 - 17	58,59	0,750
8 - 9 15 - 16	44,88	0,805
9 - 10 14 - 15	31,52	0,828
10 - 11 13 - 14	19,45	0,830
11 - 12 12 - 13	13,15	0,830

2.3.6.4 Energía absorbida

2.3.6.4.1 Cálculo de la energía absorbida por el secador solar en la unidad de área (S), y en toda su superficie.

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

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

$$S = H_t \cdot (\tau\alpha)_e \cdot (1 - a) \cdot (1 - b) \quad (2.24)$$

Donde:

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

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

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

Siendo a y b coeficientes que tienen en cuenta la suciedad y efecto de sombra de los laterales de la cubierta del secador, respectivamente y pueden tener los siguientes valores Duffie (1991).

$$a = 0,02$$

$$b = 0,03$$

y tenemos:

$$S = H_t \cdot (\tau\alpha)_e \cdot (0,9506)$$

Tabla 2.11. Valores de energía absorbida

Horas del día	S (kJ/m ² h)	S (kJ/h)
6 – 7 17 – 18	175,25	3680,25
7 – 8 16 – 17	526,25	11051,25
8 – 9 15 – 16	880,79	18496,59
9 – 10 14 – 15	1188	24948
10 – 11 13 – 14	1384	29064
11 – 12 12 – 13	1452	30492

2.3.6.5 Pérdidas de energía específicas

2.3.6.5.1 Determinación del coeficiente de pérdida por la cubierta del calentador solar (U_t).

El coeficiente de perdidas de mayor importancia es el U_t . Este puede evaluarse de forma directa por medio de la formula de Klein (1975), tomada del Duffie (1991) página 260.

$$U_t = \left\{ \frac{N}{\frac{C}{T_{pm}} \left[\frac{(T_{pm} - T_a)}{(N + f)} \right]^e} + \frac{1}{h_w}} \right\}^{-1} + \frac{\sigma \cdot (T_{pm} + T_a)(T_{pm}^2 + T_a^2)}{(\varepsilon_p + 0,00591N \cdot h_w)^{-1} + \frac{2N + f - 1 + 0,133 \cdot \varepsilon_p - N}{\varepsilon_g}} \quad (2.25)$$

$S = 14^\circ$ (ángulo de inclinación de la cubierta)

$W = 3,3 \text{ m/s}$ (velocidad del viento)

$\varepsilon_g = 0.88$ (emitancia del vidrio)

$\varepsilon_p = 0.95$ (emitancia de la placa absorbadora)

$N = 2$ (Número de cubiertas)

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

$T_a = 15.5^\circ\text{C} = 288,65 \text{ K}$ (Temperatura del aire ambiente)

Donde:

σ : Constante de Boltzmann

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

$$\sigma = 0,000000204 \text{ kJ/m}^{-2} \text{ K}^{-4} \text{ h}$$

h_w : Coeficiente de transferencia de calor por convección del viento

$$h_w = 5,7 + 3,8 \cdot W \quad (2.26)$$

$$h_w = 5,7 + 3,8 \cdot 3,3 \text{ m/s}$$

$$h_w = 18,24 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$h_w = 65,66 \text{ kJ/m}^2 \text{ h K}$$

$$e = 0,430 \cdot \left(1 - \frac{100}{T_{pm}} \right) \quad (2.27)$$

$$e = 0,312$$

El coeficiente f se determina por la siguiente ecuación:

$$f = (1,0 + 0,089 \cdot h_w - 0,01166 h_w \cdot \varepsilon_p) \cdot (1 + 0,7866 \cdot N) \quad (2.28)$$

$$f = -0,497$$

Con todos estos valores remplazados en la ecuación de perdidas por cubierta tenemos que:

$$U_t = \underline{\underline{20,57 \text{ kJ} / \text{m}^2 \text{ h K}}}$$

Un método empleado de forma frecuente para el calculo de U_t es el grafico que se describe a continuación.

Las graficas del coeficiente de perdida están en la página 260, 261, 262 y 263 del Duffie (1991), donde a partir de la temperatura media, la emitancia del plato de absorción, el coeficiente de transferencia de calor por convección del viento y la cantidad de cubiertas se elige el valor de U_t .

Además para el calculo del coeficiente de perdidas por cubiertas (U_t) utilizando este método es necesario considerar el factor de corrección que se encuentra en la página 264 del Duffie (1991), para ello se utiliza la figura 6.4.6 que esta en función del ángulo de inclinación (S) y la emitancia del plato.

2.3.6.5.2 Determinación del coeficiente de pérdida por el fondo (U_b).

Las perdidas por el fondo en este caso se desprecian ya que las perdidas por conduccion desde el fondo del secador hacia la tierra son minimas asumiendo un valor de $U_b = 0$

2.3.6.5.3 Determinación del coeficiente de pérdidas laterales (U_e).

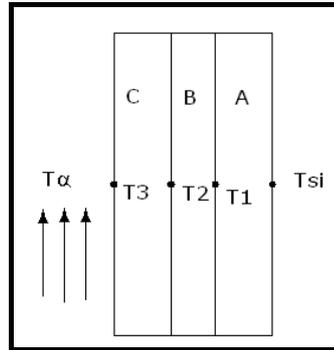


Figura 2.5. Esquema de la sección transversal de la pared del horno

Donde:

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

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

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

El material B corresponde a una pared de poliuretano:

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

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

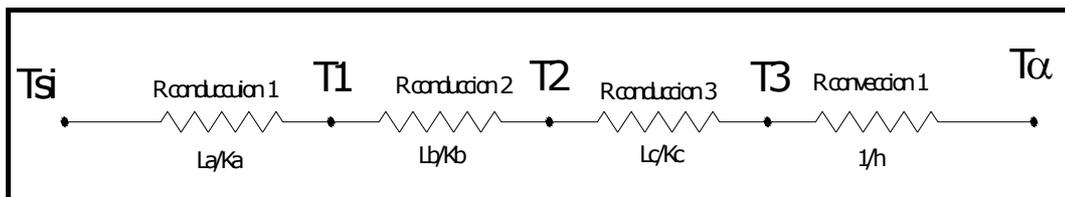


Figura 2.6 Circuito de resistencias:

$$R_T = \frac{L_a}{K_a} + \frac{L_b}{K_b} + \frac{L_c}{K_c} + \frac{1}{h} \tag{2.29}$$



Donde:

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

$\frac{L_a}{K_a}$ y $\frac{L_c}{K_c}$: Resistencias térmicas por conducción a través del ladrillo

$\frac{L_b}{K_b}$: Resistencia térmica del Poliuretano

$$R_T = \frac{0,08m}{0,72W / m K} + \frac{0,07m}{0,372W / m K} + \frac{0,08m}{0,72W / m K} + \frac{1}{5,01W / m^2 K}$$

$$R_T = \underline{\underline{0,6099 K m^2 / W}}$$

2.3.6.5.4 Calculo del coeficiente de transferencia de calor por convección (h)

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

$$R_e = \frac{V \cdot L}{\nu} \quad (2.30)$$

Donde:

$V = 3,3 m / s$ (velocidad del fluido (aire))

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

$L = 2m$ (longitud característica vertical para cada una de las paredes laterales del secador)

$$R_e = \frac{3,3m/s \cdot 2m}{14,85 \cdot 10^{-6} m^2/s}$$

$$R_e = \underline{\underline{444444}}$$

Con el valor del Reynolds y para valores de Prandtl mayores que 0,6 se escoge la ecuación del Nusselt (N_u) (ecuación 7.31, página 354 Incropera (2003))

$$N_u = 0,664 \cdot R_e^{1/2} \cdot P_r^{1/3} \quad (2.31)$$

donde :

$$P_r = 0,71 \text{ (numero de Prandtl)}$$

$$N_u = 0,664 \cdot 444444^{0,5} \cdot 0,71^{0,33}$$

$$N_u = \underline{\underline{395,35}}$$

$$h = \frac{N_u \cdot K_f}{L} \quad (2.32)$$

donde:

$$K_f = 25,38 \cdot 10^{-3} W/mK \text{ (coeficiente de conductividad térmica del fluido)}$$

$$h = \frac{395,25 \cdot 25,38 \cdot 10^{-3} W/mK}{2m}$$

$$h = \underline{\underline{5,01 W/m^2 K}}$$

$$U_e = \frac{1}{R_T} \quad (2.33)$$

$$U_e = \frac{1}{0,6099K \cdot m^2/W}$$

$$U_e = 1,64 W/m^2 K$$

$$U_e = \underline{5,90 \text{ kJ/m}^2 \text{ h K}}$$

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

2.3.6.5.5 Determinación del coeficiente total de pérdidas (U_l).

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

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

- ◆ U_t coeficiente de pérdida por la cubierta.
- ◆ U_b coeficiente de perdidas por fondo
- ◆ U_e coeficiente reducido de perdidas laterales.

$$U_l = U_t + U_e + U_b \tag{2.34}$$

$$U_t = 20,57 \text{ kJ/m}^2 \text{ h K}$$

$$U_e = 5,90 \text{ kJ/m}^2 \text{ h K}$$

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

$$U_l = (20,57 + 5,90 + 0) \text{ kJ/m}^2 \text{ h K}$$

$$U_l = \underline{26,47 \text{ kJ/m}^2 \text{ h K}}$$

2.3.6.6 Cálculo del flujo de aire

2.3.6.6.1 Determinación del flujo de aire que puede calentar el secador en condiciones medias diarias (\dot{m}).

Sabiendo que:

$$U_1 = 26,47 \text{ kJ/m}^2 \text{ h K}$$

$C_p = 1,0079 \text{ kJ/Kg K}$ (calor específico del aire tomado de la tabla A4 Pagina 839 Incropera (2003))

$$T_f = 50 \text{ }^\circ\text{C} = 323,15 \text{ K}$$

$$T_a = 15,5 \text{ }^\circ\text{C} = 288,65 \text{ K}$$

$$S = 11212,58 \text{ kJ/m}^2 \text{ h K}$$

$F' = 1$ (factor de eficiencia del colector)

Entonces:

$$U = \frac{S - U_1 \cdot (T_f - T_a)}{[S - U_1 \cdot (T_f - T_a) - (U_1 \cdot F' \cdot (T_f - T_a))]} \quad (2.35)$$

$$U = \frac{11212,58 - 26,47 \cdot (323,15 - 288,65)}{[11212,58 - 26,47 \cdot (323,15 - 288,65) - ((26,47) \cdot (1) \cdot (323,15 - 288,65))]}$$

$$U = 1,097$$

$$\ln U = 0,093$$

$$\dot{m} = \frac{U_1 \cdot F' \cdot A_c}{C_p \cdot \ln U} \quad (2.36)$$

$$\dot{m} = \frac{(26,47) \cdot (1) \cdot (21)}{1,0079 \cdot (0,093)}$$

$$\dot{m} = \underline{5940 \text{ kg/h}}$$

$m = 5940 \text{ kg/h}$ de aire pueden recircularse como termino medio y expulsarse en forma regulada para garantizar el secado en el día (durante las horas diurnas).

2.3.6.6.2 Determinación del factor de remoción del calor (F_r).

$$F_r = \left\{ \left[\frac{\dot{m} \cdot C_p}{A_c \cdot U_1} \right] \cdot \left[1 - e^{-\left(\frac{U_1 \cdot F' \cdot A_c}{\dot{m} \cdot C_p} \right)} \right] \right\} \quad (2.37)$$

$$F_r = \left\{ \left[\frac{5940 \cdot 1,0079}{21 \cdot 26,47} \right] \cdot \left[1 - e^{-\left(\frac{(26,47) \cdot (1) \cdot (21)}{(5940) \cdot (1,0079)} \right)} \right] \right\}$$

$$F_r = \underline{0,955}$$

Este factor de remoción da la relación entre el calor absorbido por el secador solar y el calor que absorbería si todo el plato absorbedor estuviera a la temperatura de entrada del fluido.

2.3.6.7 Parámetros globales. Energía Ganada y Eficiencia.

2.3.6.7.1 Determinación de la Energía Total horaria ganada por el calentador solar (Q_u).

$$Q_u = A_c \cdot F_r \cdot [S - U_1 \cdot (T_f - T_{ma})] \quad (2,38)$$

Y los valores de S fueron tomados de la tabla 2.9 en donde se muestran los valores horarios de S por m^2 y totales obteniendo así:

Tabla 2.12. Valores del calor Útil

Horas del día	S ($\text{kJ/m}^2 \text{ h}$)	Q_u (kJ/h)
6 - 7 17 - 18	175,25	-
7 - 8 16 - 17	526,25	7928
8 - 9 15 - 16	880,79	15040
9 - 10 14 - 15	1188	21210
10 - 11 13 - 14	1384	25140
11 - 12 12 - 13	1452	26500

2.3.6.7.2 Cálculo de la Eficiencia diaria del secador solar (η).

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

$$\eta_{dia} = \frac{\sum Q_U}{A_c \sum H_T} \quad (2,39)$$

$$\eta_{dia} = \frac{94073}{21 \cdot 7328,34}$$

$$\eta_{dia} = \frac{94073}{153895,14}$$

$$\eta_{dia} = \underline{\underline{0,61}}$$

2.4 Tiempo de secado

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

$$T = \frac{Q_n}{2 \sum Q_u} \quad (2.40)$$

donde:

Q_n : Energía necesaria para los $6m^3$

$$Q_n = Q \cdot V_m \quad (2.41)$$

$Q = 379100 \text{ kJ} / m^3 \text{ de madera}$

V_m : Volumen de madera

$$V_m = 6m^3$$

$$Q_n = 379100 \text{ kJ} / m^3 \cdot 6m^3$$

$$Q_n = \underline{\underline{2274600 \text{ kJ}}}$$

$$T = \frac{2274600 \text{ kJ}}{2 \cdot 95818 \text{ kJ} / \text{dia}}$$

$$T = \underline{\underline{11,86 \text{ días} \cong 12 \text{ días}}}$$

2.5 Selección de los ventiladores para el secado de la madera.

Los ventiladores para mover el aire, que se usan en diversos procedimientos de secado, entre ellos el secado a bajas temperaturas. Los costos de instalación y funcionamiento de dichos dispositivos se tornan cada día más costosos. Es necesario, pues, que el proyectista de sistemas de secado a bajas temperaturas elija y aplique el mejor equipo para mover el aire, teniendo en cuenta los factores técnicos y económicos correspondientes.

El ventilador sopla o aspira aire en forma continua, por acción aerodinámica, transformando energía mecánica en cinética para mover una cantidad de aire a través de



un sistema conectado a él, y generar presión estática suficiente para vencer las resistencias al movimiento del aire.

Los ventiladores se clasifican en dos categorías generales:

- a) ventiladores axiales
- b) ventiladores centrífugos.

Los *ventiladores centrífugos* que se ocupan en el secado a bajas temperaturas son, generalmente, del tipo de aspas vueltas hacia atrás.

Los *ventiladores axiales* están destinados a aplicaciones en lugares donde las presiones estáticas que hay que vencer son bajas y los flujos son elevados; los centrífugos sirven para las presiones estáticas elevadas.

Para poder seleccionar los ventiladores necesitamos conocer también:

- ◆ Cantidad de humedad a evaporar.
- ◆ Cantidad específica de aire.
- ◆ Cantidad de aire necesaria.

Deben evitarse velocidades del aire excesivas ya que conllevaría un secado muy rápido de la superficie de la madera mientras que la parte interior de esta se mantendría húmeda y con ello se producirían grietas y deformaciones no deseadas del producto.

2.5.1 Cantidad de humedad a evaporar diariamente por m³ de madera.

$$W_1 = \frac{W_t}{T} \tag{2.42}$$

$$W_1 = \frac{143,18}{12}$$

$$W_1 = \underline{\underline{11,93 \text{ kg de humedad /m}^3 \text{ de madera .}}}$$

2.5.2 Cantidad específica de aire.

$$l = \frac{1}{X_f - X_o} \quad (2.43)$$

$$l = \frac{1}{(0.0589 - 0.0075) \text{ kg de humedad / kg de aire seco}}$$

$$l = \underline{\underline{19,45 \text{ kg de aire / kg de humedad}}}$$

2.5.3 Cantidad de aire necesario cada día por m^3 de madera.

$$L = l \cdot W_i \quad (2.44)$$

$$L = 19,45 \cdot 11,93$$

$$L = \underline{\underline{232,03 \text{ kg de aire / m}^3 \text{ de madera.}}}$$

2.5.4 Cantidad de aire total para secar 6m^3 de madera.

$$L_t = L \cdot V_m \quad (2.45)$$

$$L_t = (232,03 \text{ kg de aire / m}^3 \text{ de madera}) \cdot (6\text{m}^3)$$

$$L_t = \underline{\underline{1392,18 \text{ kg de Aire. / día.}}}$$

2.5.5 Caudal total de aire diario.

$$Q_a = \frac{L_t}{\rho} \quad (2.46)$$

$$Q_a = \frac{1392,18 \text{ kg de aire}}{1,08 \text{ kg / m}^3}$$



$$Q_a = \underline{1290 \text{ m}^3 \text{ de aire.}}$$

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

$$Q_{av} = 645 \text{ m}^3 \text{ de aire / min.}$$

Para garantizar la velocidad del flujo de aire entre 0,8 a 1,2 m /s recomendada por Griñán (2001) este flujo de aire tiene que pasar en un tiempo mayor que el que se a estimado en un minuto y medio quedándonos un caudal de:

$$Q_{an} = 430 \text{ m}^3 \text{ de aire / min}$$

Con este caudal seleccionamos dos ventiladores para garantizar la circulación del aire pre-calentado a través de los espacios formados por los separadores colocados entre las piezas de madera para extraer la humedad por sus caras.

Marca: Sheldons Engineering.

Datos de los ventiladores tomados del catalogo 365B- 87.

Modelo: 330 F

Diámetro del ventilador: 33''

Flujo de salida: 7,55 m³/s

Velocidad de salida: 12,06 m / s

Potencia: 2,43 kW

Mínima rpm: 237

Máxima. rpm : 500

2.6 Funcionamiento del Secador Solar de Madera.

El secado de la madera ocurre por la evaporación del agua de la superficie de la misma y por el paso del agua del interior a la superficie. En este tipo de secador solar ambos efectos se producen durante todo el día, pero el primero tiene preferencia durante el día y el segundo durante la noche. De esta forma se alcanza un equilibrio entre los dos efectos durante las 24 horas, lo que garantiza la buena calidad en el secado, este

proceso termina cuando se alcanza la humedad requerida, según el uso que se le dará a la madera.

Luego de colocada la madera convenientemente dentro del secador, este se cierra herméticamente, se ponen en funcionamiento los ventiladores de recirculación del aire interior, los cuales trabajarán de forma constante. Este funcionamiento se realizará solamente en el horario diurno de 8:00 AM hasta las 5:00 PM y se realizara manualmente.

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

Con las ventilas de la secadora se puede controlar la circulación del aire en el interior de la cámara;, cuando se mantienen cerradas existe una recirculación interior debido a que el aire caliente pasa del colector hacia la madera y de la madera hacia el colector calentándose nuevamente (figura 2.7)

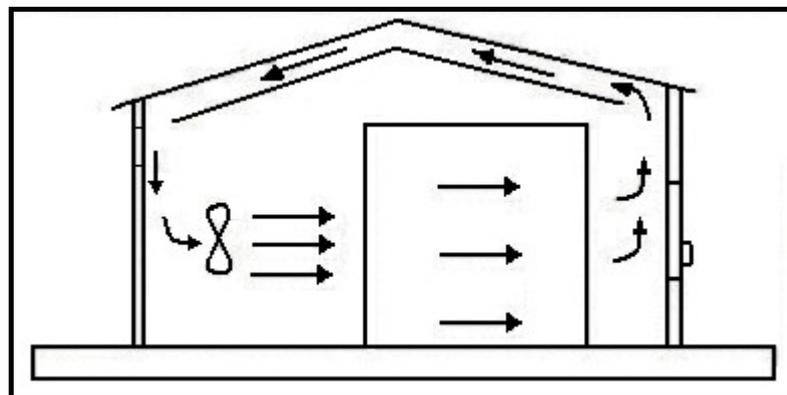


Figura 2.7 Funcionamiento del secador con las ventilas cerradas.

Pero si se mantienen abiertas, el aire caliente pasará del colector a la madera y después saldrá por las ventilas, inyectando así aire del medio ambiente hacia el colector (figura 2.8).

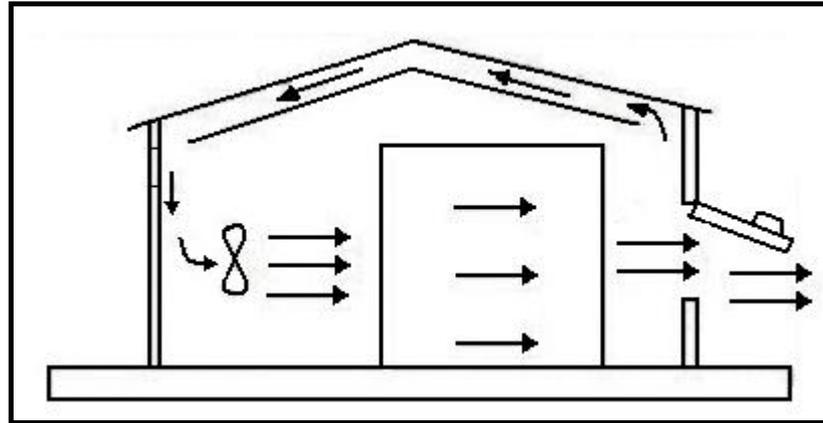


Figura 2.8 Funcionamiento del secador con las ventilas abiertas.

2.6.1 Control de humedad y temperatura.

Para llevar el manejo y control de la cámara de secado, se cuenta con medidores de temperatura y de humedad relativa, los que permiten llevar un registro de las condiciones que se tienen en el interior del secador durante el tiempo que dura el proceso.

Esta información es útil para tomar decisiones sobre el manejo del secador y para mejorar el proceso de secado, debido a que en el secado solar la temperatura y la humedad están determinadas por la condiciones del medio ambiente en que se encuentra el secador.

La guía de secado básica que se usa, consiste en abrir y cerrar las ventilas a determinadas horas durante el tiempo que permanezca funcionando el secador, para controlar de esta manera la humedad relativa y temperatura en el interior. Es muy importante tener un buen control para perder la menor cantidad posible de calor.

El procedimiento consiste en encender los ventiladores a las ocho o nueve de la mañana abriendo las ventilas durante media hora. Esto, con la finalidad de permitir la salida de la humedad que pudiera haberse concentrado durante el tiempo que el secador estuvo sin funcionar; posteriormente se cierran las ventilas y se mantienen así, para que el aire circule en el interior del secador.



Después de este período se pueden abrir nuevamente durante media hora, alrededor del medio día para extraer el aire húmedo del interior, si se considera necesario. Durante esta etapa se debe tener especial cuidado en conocer la relación que existe entre el valor de humedad interior y el del exterior del secador para poder decidir si es apropiado abrir las ventilas, debido a que la humedad en el exterior pudiera ser mucho más alta que en el interior.

Al concluir esto, se cierran nuevamente las ventilas y se vuelven a abrir entre las 4 y 6 de la tarde durante media hora., al cabo de la cual se cierran y se apaga el sistema, repitiendo el procedimiento al día siguiente y los que dure el proceso de secado, hasta alcanzar el contenido de humedad deseado en la madera.

En la presente propuesta de guía básica de secado; vale la pena mencionar que para cada carga pueden existir variaciones en los horarios propuestos y en el número de veces que se deben abrir las ventilas, puesto que se regirán por las condiciones de temperatura y humedad que se tengan en el interior y exterior del secador, así como por el contenido de humedad que presente la madera que se esté secando.

Con la finalidad de poder llevar una mejor secuencia en el proceso de secado, el operario deberá siempre tomar en cuenta las mediciones de temperatura y humedad, para decidir los pasos a seguir durante el proceso y evitar al máximo un posible deterioro en la madera. Hay que considerar este punto como uno de los de mayor importancia, pues si el operario del proceso de secado no tiene estos conocimientos básicos, la calidad de la madera puede disminuir notablemente.



CAPITULO 2: CALCULO PARA EL DISEÑO Y SELECCIÓN DE HORNOS SOLARES EN EL SECADO DE MADERA.

2.1 Introducción

La aplicación de los secadores solares ha adquirido una gran importancia en el tratamiento de productos para acelerar el tiempo de secado,

Aunque se ha desarrollado cierta variedad de secadores solares, desde el punto de vista constructivo estos equipos tienen similitud, ya que todos cuentan con una cámara de secado con un adecuado aislamiento y una superficie captadora de la energía de la radiación solar.

El diseño de estos equipos se ha encaminado a dar soluciones geométricas de la superficie absorbadora que incrementen el rendimiento de la captación solar, conjuntamente con el empleo de materiales de mejores propiedades ópticas. Esto ha conllevado a que las diferencias de estos equipos se encuentran fundamentalmente en la configuración del plato absorbedor.

Para diseñar secadores solares se usan métodos que se apoyan fundamentalmente en dos elementos, que son los balances de energía y el uso de modelos del comportamiento térmico del sistema. Los algoritmos basados en el comportamiento térmico del sistema son los más empleados por su facilidad y probada eficacia, y los datos se obtienen de evaluaciones de prototipos o mediante el análisis del comportamiento del secador, empleando un modelo matemático y un programa de computación.

2.2 Principios técnicos del secado

Básicamente, el secado consiste en retirar por evaporación el agua de la superficie del producto y traspasarla al aire circundante. La rapidez de este proceso depende del aire (la velocidad con la que éste circule alrededor del producto, su grado de sequedad,



temperatura, etcétera), y de las características del producto (su composición, su contenido de humedad, el tamaño de las partículas, etcétera).

Según la temperatura dentro de la cámara de secado, el aire puede admitir más o menos humedad. Por ejemplo el aire a 60 ° C se satura con 130.3 gramos de agua por metro cúbico. Si a dicha temperatura no lleva más que 65 gramos de agua este se encontrará semisaturado y su humedad relativa será del 50 %. Si el aire se enfría 40 ° C (a esta temperatura la saturación se verifica con 50.8 gramos de agua) no podrá contener toda la humedad que lleva y precipitará el exceso de $(65 - 50.8 = 14.2)$ gramos de agua por metro cúbico como rocío sobre los objetos que se hallen en contacto con él. Esta es la razón por la cual con el aumento de la temperatura aumenta la capacidad del aire para absorber la humedad.

La cantidad de vapor de agua presente en el aire se llama humedad. Un aire absolutamente seco, sin vapor de agua en su interior, contiene una humedad relativa de 0%, mientras que uno saturado de agua tiene una humedad relativa de 100%. La cantidad de vapor de agua que el aire puede absorber depende, en gran medida, de su temperatura. Existen tablas que permiten calcular la cantidad adicional de vapor de agua que el aire puede absorber a una temperatura y una humedad relativa determinada. A medida que el aire se calienta, su humedad relativa decae y, por tanto, puede absorber más humedad. Al calentarse el aire alrededor del producto, éste se deshidrata más rápidamente.

En la Tabla 2.1 puede apreciarse cómo, a mayor temperatura, más capacidad del aire de absorber agua. Cuanto mayor sea el flujo de aire más rápidamente se eliminará el agua del producto que se está secando. En ella se muestra la cantidad de agua que, en teoría, puede absorber el aire. Sin embargo, en la práctica nunca se alcanzan estos niveles.

Existen muchas razones para ello: la eficiencia con la que el aire se mezcla con el producto, la naturaleza del producto y otras. En condiciones normales, el aire puede retirar un 30 a 50% de esta cantidad teórica. Esta capacidad se conoce como "factor de arrastre" y se convierte en una guía para quienes diseñan equipos de secado.

Tabla 2.1. Cantidad de agua que puede absorber el aire

Temperatura °C	HR	Gramos de agua que pueden ser retirados por kg. de aire seco
29	90	0.6
30	50	7
40	28	14.5
50	15	24

2.3 Propiedades de la madera.

Las características del producto, su naturaleza y el tamaño de las partículas influyen de forma significativa en el nivel de secado.

De las propiedades físicas de la madera, la que reviste mayor importancia para el usuario es la Densidad. Esta es un indicativo de cuanto material leñoso, en gramos, presenta una madera por unidad de volumen expresada en g/cm^3 . La densidad también varía de acuerdo a la cantidad de humedad y de sustancias en las células. A mayor densidad mayor fortaleza mecánica. Por eso las maderas más densas son más durables que las livianas, aunque son más difíciles de trabajar, de hornear y de inmunizar.

Con respecto a la densidad, se debe tener en cuenta que el término “verde” se refiere a la madera con un contenido de humedad mayor 30% y la densidad verde, es la relación entre el peso y el volumen verde.

El contenido de humedad se refiere al peso del agua de una pieza de madera que se expresa en porcentaje, el cual tiene gran influencia en el peso de la madera y sus propiedades mecánicas. Pero cuando la madera es secada por debajo del 30% las paredes celulares se vuelven más duras y rígidas. Por lo tanto al vender o comprar la madera se debe especificar su humedad para saber que se puede esperar de la misma desde el punto de vista mecánico.

Otra propiedad es la Contracción, y es importante desde el punto de vista de su utilización. Toda madera que se seca, se contrae, ocasionando una disminución de sus dimensiones, lo cual hace que la madera se tuerza y se raje. La contracción se expresa como un porcentaje de las dimensiones en estado verde.

2.3.1 Importancia del Contenido de Humedad de Equilibrio

El conocimiento de la humedad de equilibrio (**CHE**) de la madera es fundamental para la conducción del secado artificial, porque es el parámetro que ayuda a guiar la manipulación de la temperatura y la depresión psicrométrica en el interior del secador, hasta alcanzar el nivel de humedad al que la madera será procesada o utilizada.

Como las condiciones ambientales de todos los sitios varían constantemente, ninguna madera se encuentra en equilibrio estable, sino que el contenido de humedad sigue las fluctuaciones que le condiciona el medio ambiente. Es por ello que el valor del equilibrio higroscópico de una pieza de madera hay que referirlo al lugar y momento de su verificación.

Toda la madera, de árboles en crecimiento contiene una considerable cantidad de agua, comúnmente llamada savia. Las maderas pierden o ganan humedad en un intento de alcanzar un estado de equilibrio o balance con las condiciones del ambiente. Este estado de equilibrio depende de la humedad relativa y la temperatura del ambiente.

La cantidad de humedad en la madera esta en términos del contenido de agua o humedad. Esta puede estar expresada en porcentaje de peso húmedo o seco. Para muchos propósitos el contenido de humedad en madera esta en peso seco.

La cantidad de agua en maderas verdes varia considerablemente, dependiendo principalmente de la especie. El contenido de humedad de algunas especies puede ser tan bajo como 30% de contenido de humedad en equilibrio considerando que otras puede ser tan alto como 200%.

Tabla 2.2 Denominación de la madera en función de su contenido de humedad

Denominación del estado de la madera	Nivel de humedad	Lugar de ubicación
Madera verde	80 a + 200%	de bajo cubierta en el bosque
Madera húmeda	25 a 80 %	recién cortada, en patio a la intemperie
Madera poco seca	de 20 a 25%	aire libre
Madera seca al aire	15 a 20%	de bajo techo
Madera muy seca	de 8 a 15%	interiores
Madera anhidra	0%	en laboratorio

2.3.2 Método para determinar el Contenido de Humedad.

Existen varios métodos para determinar el contenido de humedad de la madera, uno de los más comunes es el método gravimétrico o por diferencias de pesadas y es el método que hemos utilizado en este trabajo.

En este método se emplea una balanza con una precisión aproximada de 0,1 g para pesar la muestra (peso húmedo) al momento de su obtención y después se determina el peso anhidro, este método es uno de los más exactos y confiables.

2.3.3 Formula para calcular el contenido de humedad (CH)

El nivel de humedad de la madera se calcula como un porcentaje del peso del agua que contiene, respecto al peso del material seco:

$$CH = \frac{Ph - Po}{Po} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

Donde:

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

Po = Peso de la madera anhidra (kg)

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

Para calcular el contenido de humedad, se emplea una probeta pequeña de madera. El peso seco o anhidro se determina después de exponer la probeta a una temperatura de aproximadamente 103 °C, hasta que su peso no varíe.

Esta expresión es relativa y no proporciona una medida de la cantidad absoluta de humedad, a no ser que se tome en cuenta la densidad o peso específico básico del material.

2.3.4 Humedad límite de la madera o equilibrio higroscópico

Pasado cierto tiempo, la humedad contenida en la madera adquiere un estado estacionario, oscilando entre valores que no se diferencian mucho entre sí, siempre y cuando las condiciones ambientales no varíen mucho. Así, se puede comprobar que durante el transcurso del tiempo la madera va perdiendo paulatinamente su humedad hasta llegar un momento a partir del cual su contenido de humedad permanece invariable.

Puede afirmarse que transcurrido un tiempo determinado se establece siempre un equilibrio entre la humedad contenida en el aire que rodea la madera y el grado de humedad de esta última.

Es necesario conocer cuál es la humedad límite de la madera para cada temperatura y estado higrométrico del aire ambiente del lugar donde ha de emplearse dicha madera, secarla más sería un trabajo inútil y aumentaría sólo el costo de la operación sin utilidad.

A continuación la Tabla 2.3 presenta las humedades límites aproximadas de la madera, en función directa de la de la humedad relativa y de la temperatura del aire que la rodea.

Tabla 2.3 Humedad límite de la madera (en %)

Humedad relativa del aire (%)	Temperatura (°C)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
10	3	3	2.5	2.5	2	2	2	1.5	1	1
20	5	5	4.5	4	4	3.5	3	3	2.5	2
30	6	6	6	6	5.5	5	4.5	4	3	3
40	8	8	7.5	7	6.5	6	5.5	5	4.5	4
50	10	9.5	9	8.5	8	7	7	6	5.5	5
60	11.5	11	11	10.5	10	9	8	7.5	7	6
70	14	14	13	12.5	11.5	11	10	9	8.5	8
80	18	17.5	17	16	15	14	13	12	11	10.5
90	22	22	21	21	20	18.5	17.5	16.5	15.5	15
100	32	31	29.5	29	28	27	26	25	24	23



Observando atentamente la tabla anterior, vemos que se puede alcanzar una misma humedad límite con temperaturas y estados higrométricos diferentes. Esta circunstancia facilitará el secado artificial de la madera hasta el grado de humedad deseado regulando las condiciones de temperatura y humedad de la atmósfera del secador, de acuerdo con las características más apropiadas de las instalaciones que se posean. En general se podrá secar la madera usando temperaturas y estados higrométricos elevados, o por el contrario, usando temperaturas y estados higrométricos bajos.

2.3.5 Cálculo de los parámetros fundamentales del secador

Para el cálculo de los parámetros fundamentales de la instalación de secado de madera se ha seleccionado el pino, por ser el tipo de madera más común.

Todos los cálculos se han hecho en base a un 1 m^3 de madera, lo que permite posteriormente diseñar un secador de cualquier capacidad.

2.3.5.1 Datos de la madera:

- Tipo de madera: Pino
- Peso específico: $P_o = 600 \text{ kg} / \text{m}^3$
- Contenido de Humedad Inicial: $w_o = 33\%$
- Contenido de Humedad Final: $w_f = 12\%$
- Volumen de la madera a secar: $V_m = 1 \text{ m}^3$

2.3.5.2 Datos del Aire:

- Temperatura inicial del aire: $t_o = 15,5^\circ \text{C}$
- Temperatura final del aire: $t_f = 50^\circ \text{C}$
- Humedad relativa inicial: $n_o = 70 \%$
- Humedad relativa final: $n_f = 70 \%$
- Entalpía Inicial: $I_o = 51,49 \text{ kJ} / \text{kg. de aire seco}$

- Entalpía Final: $I_f = 187,57 \text{ kJ / kg. de aire seco}$
- Contenido de humedad inicial: $X_o = 0,0075 \text{ kg. de humedad / kg. de aire seco.}$
- Contenido de humedad Final: $X_f = 0,0589 \text{ kg. de humedad / kg. de aire seco.}$

2.3.5.3 Humedad total a extraer por m^3 de madera:

$$W_t = P_o \cdot V_m \frac{W_o - W_f}{100 - W_f} \quad (2.2)$$

$$W_t = 600 \text{ kg} \cdot (1 \text{ m}^3) \frac{33 - 12}{100 - 12}$$

$$W_t = 143,48 \text{ Kg de humedad / m}^3 \text{ de madera}$$

2.3.5.4 Consumo Especifico de Calor

$$q = \frac{I_f - I_o}{X_f - X_o} \quad (2.3)$$

$$q = \frac{(187,57 - 51,49) \text{ kJ / kg de aire seco}}{(0,0589 - 0,0075) \text{ kg de humedad / kg de aire seco}}$$

$$q = 2647,47 \text{ kJ / kg de a humedad.}$$

2.3.5.5 Calor total necesario para cada m^3 de madera (Q).

$$Q = q \cdot W_t \quad (2.4)$$

$$Q = (2647 \text{ KJ / kg de humedad}) \cdot (143,18 \text{ kg de humedad / m}^3 \text{ de madera})$$

$$Q = 379100,46 \text{ kJ / m}^3 \text{ de madera}$$

Con estos datos y con los criterios expuestos en tópicos anteriores, se procede a determinar la forma y dimensiones de la instalación. Para lograr el correcto movimiento del aire y un secado uniforme se selecciona una relación entre el volumen de la cámara (V_c) y el volumen de la madera (V_m) igual a 7 esto es :

$$\frac{V_c}{V_m} = 7 \quad (2.5)$$

Para nuestra instalación se requiere una capacidad de secado de 6 m^3 de madera, por tanto los parámetros fundamentales de la cámara de secado son:

El volumen de la cámara calculado por la relación anterior es:

$$V_c = V_m \cdot 7 \quad (2.5.a)$$

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

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

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

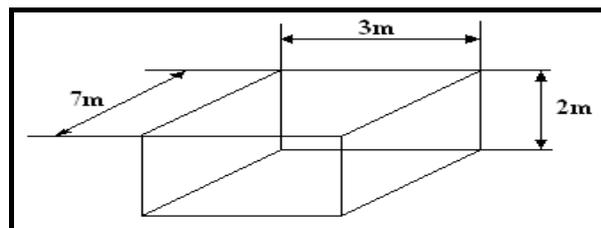


Figura 2.1 . Dimensiones de la cámara de secado

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

Ancho: $A_n = 3 \text{ m}$

Alto: $H_c = 2 \text{ m}$

Largo: $L_c = 7 \text{ m}$

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



Para lograr una mejor distribución de la energía solar en el interior de secador durante el día, se sitúa el eje longitudinal de la cámara en dirección Norte – Sur.

Con estos valores el área de captación del secador sería de $21m^2$.

2.3.6 Cálculo de la energía útil del secador

Para el diseño o selección de un secador solar es necesario conocer las condiciones de operación a la que estará sometido el equipo, en nuestro caso se exponen las condiciones de la ciudad de Loja en Ecuador.

2.3.6.1 Condiciones de operación

Latitud (ϕ): - 4° (Loja)

Mes y día escogidos para el cálculo: 12 junio (i) (día promedio de radiación solar)

Velocidad media del viento (V): 3,3 m/s. *

Temperatura ambiental (T_a): 15,5 °C*

* (Datos proporcionados por la estación Metereológica “LA ARGELIA” de la ciudad de Loja)

Se considera que respecto al comportamiento de la radiación solar, el día es simétrico.

2.3.6.2 Características del secador solar

Plato de absorción de Acero

Número de cubiertas de vidrio (N): 2

Área del Secador Solar (A_c): $21m^2$

Área lateral (A_l): $40m^2$

Espesor de la lámina de vidrio (L): $5mm = 0,005m$

Coefficiente de absorción del vidrio (K_a): $2,5 m^{-1}$



Absorbencia del plato: $\alpha=0,95$

Espesor de la plancha del plato de absorción (d): $2mm = 0,002 m$

Temperatura de entrada del fluido (T_f): $15^\circ C$

Incremento de temperatura del fluido ($\Delta T_f = 35^\circ C$)

Espesor del aislante de los laterales:

$L_b = 70mm$ (poliuretano)

$L_a = L_c = 80mm$ (ladrillo)

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

Inclinación del calentador solar: $S = 14^\circ$ ($S = \text{Latitud} + 10 \text{ grados}$)**

**Criterio utilizado por diversos autores (Duffie & Beckmann)

2.3.6.3 Parámetros de la cinemática solar

2.3.6.3.1 Determinación de la declinación solar para el día medio del mes de Junio (δ) y energía incidente.

Para nuestro caso hemos creído conveniente trabajar con el día 12 del mes de junio por ser este mes el de mas baja radiación en la ciudad de Loja

Teniendo así el valor de (n) de la tabla 1.6.1 de Duffie (1991) que transforma el día correspondiente del mes en el día correspondiente del año siendo para el mes de junio:

$$n = 151 + i \quad (2.6)$$

entonces:

$$n = 151 + 12$$

$$n = 163$$

Siendo n : el día medio del mes de junio ($n = 163$)

$$\delta = 23,45 \cdot \text{sen} \left(360 \left(\frac{284 + n}{365} \right) \right) \quad (2.7)$$

$$\delta = 23,45 \cdot \text{sen} \left(360 \left(\frac{284 + 163}{365} \right) \right)$$

$$\delta = \underline{\underline{23,153^\circ}}$$

2.3.6.3.2 Angulo horario de salida del sol (W_s).

El Angulo Horario de Salida del Sol se calcula según la ecuación tomada del Duffie (1991) para $n = 163$.

$$W_s = \cos^{-1}(-\text{tg}\phi \cdot \text{tg}\delta) \quad (2.8)$$

$$W_s = \cos^{-1}(-\text{tg}(-4) \cdot \text{tg}(23,153))$$

$$W_s = \cos^{-1}(0,0299027952)$$

$$W_s = \underline{\underline{88,28^\circ}}$$

2.3.6.3.3 Determinación de la radiación solar extraterrestre sobre una superficie normal al sol (H_o).

Este valor se puede escoger de tablas para cada día del año, o se determina según Duffie (1991) para cada día del año por medio de una ecuación empírica, siendo:

$$H_o' = \frac{24 \cdot 3600 \cdot I_{sc}}{\pi} \left(1 + 0,033 \cos \left(\frac{360 \cdot (n)}{365} \right) \right) \cdot \left(\cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \text{sen}W_s + \left(\frac{\pi \cdot W_s}{180} \right) \text{sen}\phi \cdot \text{sen}\delta \right) \quad (2.9)$$

Donde:

I_{sc} es la Constante Solar y tiene un valor de 1367 W/m^2

Luego tenemos que:

$$H_o' = \frac{(24) \cdot (3600) \cdot (1367)}{\pi} \left(1 + 0,033 \cos \left(\frac{360 \cdot (163)}{365} \right) \right) \cdot \left(\cos(-4) \cdot \cos(23,153) \cdot \text{sen}(88,28) + \left(\frac{\pi \cdot (88,28)}{180} \right) \text{sen}(-4) \cdot \text{sen}(23,153) \right)$$

El valor de radiación solar extraterrestre es de:

$$H_o' = \underline{\underline{31,85 \text{ MJ/m}^2 \text{ h}}}$$

En la tabla 1.10.1 de la Página. 42 del Duffie (Duffie J. A., 1991) aparecen los valor de la radiación solar extraterrestre diaria y haciendo una interpolación se obtiene en valor de 31,85MJ/m² día para -4° en el mes de junio como un promedio mensual de radiación diaria extraterrestre el cual es muy semejante al obtenido con la ecuación.

2.3.6.3.4 Cálculo de la radiación total diaria por unidad de área de una superficie horizontal (H').

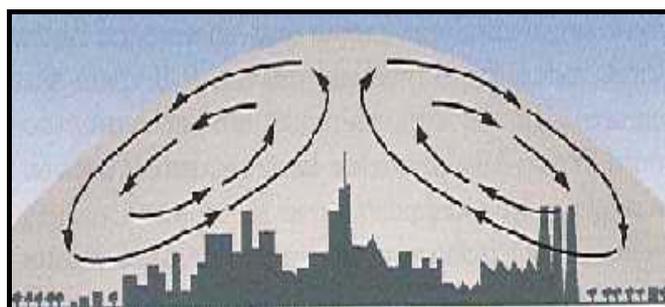


Figura 2.2. Cúpula de polvo sobre una ciudad

$$H' = K_T \cdot H_o' \tag{2.10}$$

esto es una función de

$$K_T = \frac{H'}{H_0'}$$

Siendo:

K_T : (Coeficiente de nubosidad o factor de turbiedad de la atmósfera y tiene en cuenta la transparencia de la atmósfera por efectos de nubes, polvo, aerosoles, ozono, etc.). su valor es 0,383 para el mes de junio en Loja - Ecuador.

$$H' = 0,383 \cdot (31 \cdot 85^3) \text{ kJ/m}^2 \text{ h}$$

$$H' = \underline{12,20 \times 10^3 \text{ kJ/m}^2 \text{ h}}$$

2.3.6.3.5 Cálculo de la radiación difusa diaria que cae sobre una superficie horizontal (H_d').

$$H_d' = f(K_T) \cdot H' \quad (2.11)$$

Según Liu-Jordán (1960) $f(K_T)$ viene dada por la siguiente expresión:

$$f(K_T) = 1,3903 - 4,0273 \cdot (K_T) + 5,5315 \cdot (K_T)^2 - 3,1080 \cdot (K_T)^3 \quad (2.12)$$

para valores de $0,3 < K_T < 0,7$

de lo cual tenemos:

$$f(K_T) = 1,3903 - 4,0273 \cdot (0,383) + 5,5315 \cdot (0,383)^2 - 3,1080 \cdot (0,383)^3$$

$$f(K_T) = 0,485$$

entonces:

$$H_d' = 0,485 \cdot 12,20 \cdot 10^3 \text{ kJ/m}^2 \text{ h}$$

$$H_d' = \underline{5,91 \times 10^3 \text{ kJ/m}^2 \text{ h}}$$

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

$$H = K \cdot H' \tag{2.13}$$

Siendo:

K, la relación entre la radiación solar horaria y la radiación solar total diaria y se calcula por la siguiente expresión tomada de Duffie (1991) :

$$K = \left(\frac{\pi}{24}\right) \cdot (a + b \cdot \cos W) \cdot \left(\frac{(\cos W - \cos W_s)}{\text{sen}W_s - \left(\frac{(\pi \cdot W_s)}{180}\right) \cdot \cos W_s} \right) \tag{2.14}$$

$$a = 0,409 + 0,5016 \text{ sen } (W_s - 60) = 0,646 \tag{2.15}$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \text{ sen } (W_s - 60) = 0,434 \tag{2.16}$$

y *W* es el ángulo Horario que toma valor 0 para el mediodía solar y varía 15° cada hora.

A partir de lo anterior se hallan los valores de *K* para cada hora del día y se calcula la Radiación Solar Total horaria por unidad de área sobre una superficie horizontal (*H*).

Tabla. 2.4. Radiación solar total horaria por unidad de área

Horas del día	W	K	H (kJ/m ² h)
6 - 7 17 - 18	75°	0,024	290,75
7 - 8 16 - 17	60°	0,056	679,68
8 - 9 15 - 16	45°	0,089	1081
9 - 10 14 - 15	30°	0,117	1432
10 - 11 13 - 14	15°	0,137	1671
11 - 12 12 - 13	0°	0,144	1755

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

En la Página 91 del Duffie (1991) aparece la ecuación de la relación entre la radiación difusa horaria y la radiación difusa diaria sobre una superficie horizontal como función de la longitud del día. De esta ecuación se obtienen los valores de K_d .

$$H_d = K_d \cdot H_d' \tag{2.17}$$

Los valores de K_d fueron encontrados por la siguiente ecuación:

$$K_d = \left(\frac{\pi}{24}\right) \cdot \left(\frac{(\cos W - \cos W_s)}{\text{sen}W_s - \left(\frac{(\pi \cdot W_s)}{180}\right) \cdot \cos W_s} \right) \tag{2.18}$$

Con los valores horarios de K_d obtenidos con la ecuación 2.18 se calculan los valores de H_d los cuales se muestran a continuación:

Tabla 2.5. Radiación difusa horaria por unidad de área

Horas del día	W	K_d	$H_d(kJ/m^2 h)$
6 - 7 17 - 18	75°	0.031	185,76
7 - 8 16 - 17	60°	0.065	381,58
8 - 9 15 - 16	45°	0.093	549,73
9 - 10 14 - 15	30°	0.115	678,76
10 - 11 13 - 14	15°	0.129	759,73
11 - 12 12 - 13	0°	0.133	787,53

2.3.6.3.8 Determinación del valor del ángulo de incidencia horario de la radiación solar directa sobre el calentador solar (θ_i).

El ángulo de inclinación de la superficie captadora depende de la forma en que se utilizará el secador, esto es, de la estación del año en que el mismo funcione, principalmente si será invierno, verano o todo el año. En dependencia de esto habrá una inclinación específica para la superficie captadora. Si se desea un máximo rendimiento anual, se recomienda a darle a esta superficie una inclinación igual a la latitud del lugar.

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

$$\begin{aligned} \cos \theta_i = & (\text{sen} \delta \cdot \text{sen} \phi \cdot \cos S - \text{sen} \delta \cdot \cos \delta \cdot \text{sen} S \cdot \cos \gamma + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos S \cdot \cos W +) \\ & (+ \cos \delta \cdot \text{sen} \phi \cdot \text{sen} S \cdot \cos \gamma \cdot \cos W + \cos \delta \cdot \text{sen} S \cdot \text{sen} \gamma \cdot \text{sen} W) \end{aligned} \quad (2.19)$$

y para el hemisferio sur tenemos:

$$\cos \theta_i = [\cos(\phi + S) \cdot \cos \delta \cdot \cos W + (\text{sen}(\phi + S) \cdot \text{sen} \delta)] \quad (2.19.a)$$

$$\theta_i = \arccos[\cos(\phi + S) \cdot \cos \delta \cdot \cos W + (\text{sen}(\phi + S) \cdot \text{sen} \delta)] \quad (2.19.b)$$

Donde:

$S = 14^\circ$ (ángulo de inclinación de la superficie captadora.)

$\phi = -4^\circ$ (latitud de Loja)

$\delta = 23,153^\circ$ (Declinación Solar para el día medio del mes de Junio)

$W =$ ángulo horario que toma valor 0 para el mediodía solar y varía 15° cada hora.

Los resultados tanto de θ_i como de $\text{Cos } \theta_i$ son los que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2.6. Angulo de incidencia horario

Horas del día	W	$\text{Cos } \theta_i$	θ_i
6 - 7 17 - 18	75°	0,303	72,38
7 - 8 16 - 17	60°	0,521	58,59
8 - 9 15 - 16	45°	0,709	44,88
9 - 10 14 - 15	30°	0,852	31,52
10 - 11 13 - 14	15°	0,943	19,45
11 - 12 12 - 13	0°	0,974	13,15

2.3.6.3.9 Determinación del ángulo cenital (θ_z).

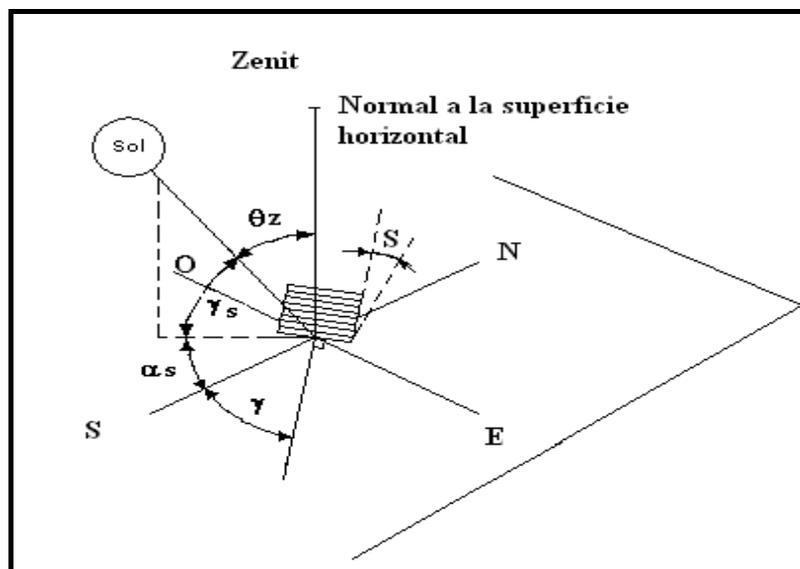


Figura 2.3 Angulo Zenital

Estos valores se calculan a partir de la expresión teniendo en cuenta que la cubierta está orientada al norte entonces el acimut $\gamma = 0^\circ$, por lo que el Ángulo cenital se calcula según la siguiente formula tomada de la página 16 del Duffie (1991).

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos W + \sin \delta \cdot \sin \phi \tag{2.20}$$

Los valores del ángulo cenital son los que se muestran en la Tabla 2.5. Los valores de θ_z se hallan para cada hora considerando que W es el ángulo horario que toma valor 0 para el mediodía solar y varía 15° cada hora.

Tabla 2.7. Valores ángulo cenital

Horas del día	W	Cos θ_z	θ_z
6-7 17-18	75°	0,210	77,88
7 - 8 16 - 17	60°	0,431	64,45
8 - 9 15 - 16	45°	0,621	51,6
9 - 10 14 - 15	30°	0,767	39,92
10 - 11 13 - 14	15°	0,859	30,84
11 - 12 12 - 13	0°	0,890	27,15

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

Este coeficiente nos da la relación entre la radiación que incide sobre una superficie inclinada y la que incide sobre una superficie horizontal como se observa en la figura

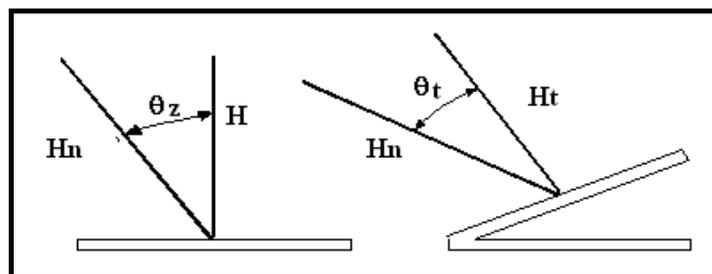


Figura 2.4. Radiación directa en superficies horizontal e inclinada

y viene dada por la siguiente expresión:

$$R_b = \frac{H_t}{H} = \frac{H_n \cos \theta_t}{H_n \cos \theta_z} \tag{2.21}$$

$$R_b = \frac{\cos \theta_t}{\cos \theta_z} \tag{2.21a}$$

De la ecuación 2.21.a se determina el valor de R_b para cada hora obteniendo los siguientes valores:

Tabla 2.8. Valores R_b para cada hora del día

Horas del día	W	R_b
6 - 7 17 - 18	75°	1,441
7 - 8 16 - 17	60°	1,208
8 - 9 15 - 16	45°	1,141
9 - 10 14 - 15	30°	1,112
10 - 11 13 - 14	15°	1,098
11 - 12 12 - 13	0°	1,094

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

La Radiación Solar Total Horaria se calcula según Duffie (1991) página 126 por la siguiente expresión.

$$H_t = (H - H_d) \cdot R_b + H_d \left(\frac{1 + \cos S}{2} \right) + H \cdot \rho_t \left(\frac{1 - \cos S}{2} \right) \tag{2.22}$$

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

- La energía producida por la radiación directa.

$$(H - H_d) \cdot R_b$$

- La energía producto de la radiación difusa.

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

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

$$H \cdot \rho_t \left(\frac{1 - \cos S}{2} \right)$$

Tabla 2.9. Valores de radiación solar total horaria

Horas del día	H_t ($\text{kJ/m}^2 \text{ h}$)	$H_t(\text{kJ/h})$ para $A=21\text{m}^2$
6 - 7 17 - 18	335,2	7035
7 - 8 16 - 17	738,14	15500,94
8 - 9 15 - 16	1151	24171
9 - 10 14 - 15	1510	31710
10 - 11 13 - 14	1754	36834
11 - 12 12 - 13	1840	38640

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

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

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

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

$$(\tau\alpha)_e = (\tau\alpha) + 0,27(1 - \tau) \quad (2.23)$$

O con el empleo de la figura 5.3.1 de la página 225 del Duffie (1991). Para nuestro caso los valores de $(\tau\alpha)_e$ los obtuvimos con el empleo de dicha figura, para cada valor de θ_t y se muestran en la Tabla 2.9:

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

α : Coeficiente de absorbencia del plato de absorción.

τ : Coeficiente de Transmisividad total de la cubierta de vidrio.

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

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

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

$$K_a \cdot L = 0,0125$$

se utilizan dos cubiertas.

Tabla 2.10. Valores de $(\tau\alpha)_e$ utilizando el método gráfico

Horas del día	θ_t	$(\tau\alpha)_e$
6 - 7 17 - 18	72,38	0,550
7 - 8 16 - 17	58,59	0,750
8 - 9 15 - 16	44,88	0,805
9 - 10 14 - 15	31,52	0,828
10 - 11 13 - 14	19,45	0,830
11 - 12 12 - 13	13,15	0,830

2.3.6.4 Energía absorbida

2.3.6.4.1 Cálculo de la energía absorbida por el secador solar en la unidad de área (S), y en toda su superficie.

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

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

$$S = H_t \cdot (\tau\alpha)_e \cdot (1 - a) \cdot (1 - b) \quad (2.24)$$

Donde:

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

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

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

Siendo a y b coeficientes que tienen en cuenta la suciedad y efecto de sombra de los laterales de la cubierta del secador, respectivamente y pueden tener los siguientes valores Duffie (1991).

$$a = 0,02$$

$$b = 0,03$$

y tenemos:

$$S = H_t \cdot (\tau\alpha)_e \cdot (0,9506)$$

Tabla 2.11. Valores de energía absorbida

Horas del día	S (kJ/m ² h)	S (kJ/h)
6 – 7 17 – 18	175,25	3680,25
7 – 8 16 – 17	526,25	11051,25
8 – 9 15 – 16	880,79	18496,59
9 – 10 14 – 15	1188	24948
10 – 11 13 – 14	1384	29064
11 – 12 12 – 13	1452	30492

2.3.6.5 Pérdidas de energía específicas

2.3.6.5.1 Determinación del coeficiente de pérdida por la cubierta del calentador solar (U_t).

El coeficiente de perdidas de mayor importancia es el U_t . Este puede evaluarse de forma directa por medio de la formula de Klein (1975), tomada del Duffie (1991) página 260.

$$U_t = \left\{ \frac{N}{\frac{C}{T_{pm}} \left[\frac{(T_{pm} - T_a)}{(N + f)} \right]^e} + \frac{1}{h_w}} \right\}^{-1} + \frac{\sigma \cdot (T_{pm} + T_a)(T_{pm}^2 + T_a^2)}{(\varepsilon_p + 0,00591N \cdot h_w)^{-1} + \frac{2N + f - 1 + 0,133 \cdot \varepsilon_p - N}{\varepsilon_g}} \quad (2.25)$$

$S = 14^\circ$ (ángulo de inclinación de la cubierta)

$W = 3,3 \text{ m/s}$ (velocidad del viento)

$\varepsilon_g = 0.88$ (emitancia del vidrio)

$\varepsilon_p = 0.95$ (emitancia de la placa absorbadora)

$N = 2$ (Número de cubiertas)

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

$T_a = 15.5^\circ\text{C} = 288,65 \text{ K}$ (Temperatura del aire ambiente)

Donde:

σ : Constante de Boltzmann

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

$$\sigma = 0,000000204 \text{ kJ/m}^{-2} \text{ K}^{-4} \text{ h}$$

h_w : Coeficiente de transferencia de calor por convección del viento

$$h_w = 5,7 + 3,8 \cdot W \quad (2.26)$$

$$h_w = 5,7 + 3,8 \cdot 3,3 \text{ m/s}$$

$$h_w = 18,24 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$h_w = 65,66 \text{ kJ/m}^2 \text{ h K}$$

$$e = 0,430 \cdot \left(1 - \frac{100}{T_{pm}} \right) \quad (2.27)$$

$$e = 0,312$$

El coeficiente f se determina por la siguiente ecuación:

$$f = (1,0 + 0,089 \cdot h_w - 0,01166 h_w \cdot \varepsilon_p) \cdot (1 + 0,7866 \cdot N) \quad (2.28)$$

$$f = -0,497$$

Con todos estos valores remplazados en la ecuación de perdidas por cubierta tenemos que:

$$U_t = \underline{\underline{20,57 \text{ kJ} / \text{m}^2 \text{ h K}}}$$

Un método empleado de forma frecuente para el calculo de U_t es el grafico que se describe a continuación.

Las graficas del coeficiente de perdida están en la página 260, 261, 262 y 263 del Duffie (1991), donde a partir de la temperatura media, la emitancia del plato de absorción, el coeficiente de transferencia de calor por convección del viento y la cantidad de cubiertas se elige el valor de U_t .

Además para el calculo del coeficiente de perdidas por cubiertas (U_t) utilizando este método es necesario considerar el factor de corrección que se encuentra en la página 264 del Duffie (1991), para ello se utiliza la figura 6.4.6 que esta en función del ángulo de inclinación (S) y la emitancia del plato.

2.3.6.5.2 Determinación del coeficiente de pérdida por el fondo (U_b).

Las perdidas por el fondo en este caso se desprecian ya que las perdidas por conduccion desde el fondo del secador hacia la tierra son minimas asumiendo un valor de $U_b = 0$

2.3.6.5.3 Determinación del coeficiente de pérdidas laterales (U_e).

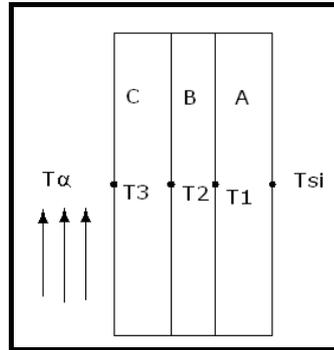


Figura 2.5. Esquema de la sección transversal de la pared del horno

Donde:

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

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

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

El material B corresponde a una pared de poliuretano:

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

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

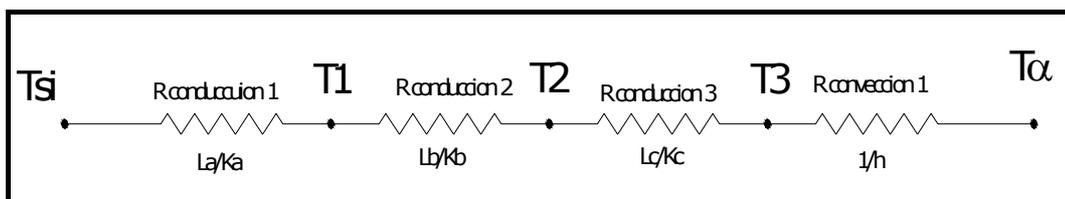


Figura 2.6 Circuito de resistencias:

$$R_T = \frac{L_a}{K_a} + \frac{L_b}{K_b} + \frac{L_c}{K_c} + \frac{1}{h} \tag{2.29}$$



Donde:

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

$\frac{L_a}{K_a}$ y $\frac{L_c}{K_c}$: Resistencias térmicas por conducción a través del ladrillo

$\frac{L_b}{K_b}$: Resistencia térmica del Poliuretano

$$R_T = \frac{0,08m}{0,72W / m K} + \frac{0,07m}{0,372W / m K} + \frac{0,08m}{0,72W / m K} + \frac{1}{5,01W / m^2 K}$$

$$R_T = \underline{\underline{0,6099 K m^2 / W}}$$

2.3.6.5.4 Calculo del coeficiente de transferencia de calor por convección (h)

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

$$R_e = \frac{V \cdot L}{\nu} \quad (2.30)$$

Donde:

$V = 3,3 m / s$ (velocidad del fluido (aire))

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

$L = 2m$ (longitud característica vertical para cada una de las paredes laterales del secador)

$$R_e = \frac{3,3m/s \cdot 2m}{14,85 \cdot 10^{-6} m^2/s}$$

$$R_e = \underline{\underline{444444}}$$

Con el valor del Reynolds y para valores de Prandtl mayores que 0,6 se escoge la ecuación del Nusselt (N_u) (ecuación 7.31, página 354 Incropera (2003))

$$N_u = 0,664 \cdot R_e^{1/2} \cdot P_r^{1/3} \quad (2.31)$$

donde :

$$P_r = 0,71 \text{ (numero de Prandtl)}$$

$$N_u = 0,664 \cdot 444444^{0,5} \cdot 0,71^{0,33}$$

$$N_u = \underline{\underline{395,35}}$$

$$h = \frac{N_u \cdot K_f}{L} \quad (2.32)$$

donde:

$$K_f = 25,38 \cdot 10^{-3} W/mK \text{ (coeficiente de conductividad térmica del fluido)}$$

$$h = \frac{395,25 \cdot 25,38 \cdot 10^{-3} W/mK}{2m}$$

$$h = \underline{\underline{5,01 W/m^2 K}}$$

$$U_e = \frac{1}{R_T} \quad (2.33)$$

$$U_e = \frac{1}{0,6099K \cdot m^2/W}$$

$$U_e = 1,64 W/m^2 K$$

$$U_e = \underline{5,90 \text{ kJ/m}^2 \text{ h K}}$$

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

2.3.6.5.5 Determinación del coeficiente total de pérdidas (U_l).

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

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

- ◆ U_t coeficiente de pérdida por la cubierta.
- ◆ U_b coeficiente de perdidas por fondo
- ◆ U_e coeficiente reducido de perdidas laterales.

$$U_l = U_t + U_e + U_b \tag{2.34}$$

$$U_t = 20,57 \text{ kJ/m}^2 \text{ h K}$$

$$U_e = 5,90 \text{ kJ/m}^2 \text{ h K}$$

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

$$U_l = (20,57 + 5,90 + 0) \text{ kJ/m}^2 \text{ h K}$$

$$U_l = \underline{26,47 \text{ kJ/m}^2 \text{ h K}}$$

2.3.6.6 Cálculo del flujo de aire

2.3.6.6.1 Determinación del flujo de aire que puede calentar el secador en condiciones medias diarias (\dot{m}).

Sabiendo que:

$$U_1 = 26,47 \text{ kJ/m}^2 \text{ h K}$$

$C_p = 1,0079 \text{ kJ/Kg K}$ (calor específico del aire tomado de la tabla A4 Pagina 839 Incropera (2003))

$$T_f = 50 \text{ }^\circ\text{C} = 323,15 \text{ K}$$

$$T_a = 15,5 \text{ }^\circ\text{C} = 288,65 \text{ K}$$

$$S = 11212,58 \text{ kJ/m}^2 \text{ h K}$$

$F' = 1$ (factor de eficiencia del colector)

Entonces:

$$U = \frac{S - U_1 \cdot (T_f - T_a)}{[S - U_1 \cdot (T_f - T_a) - (U_1 \cdot F' \cdot (T_f - T_a))]} \quad (2.35)$$

$$U = \frac{11212,58 - 26,47 \cdot (323,15 - 288,65)}{[11212,58 - 26,47 \cdot (323,15 - 288,65) - ((26,47) \cdot (1) \cdot (323,15 - 288,65))]}$$

$$U = 1,097$$

$$\ln U = 0,093$$

$$\dot{m} = \frac{U_1 \cdot F' \cdot A_c}{C_p \cdot \ln U} \quad (2.36)$$

$$\dot{m} = \frac{(26,47) \cdot (1) \cdot (21)}{1,0079 \cdot (0,093)}$$

$$\dot{m} = \underline{5940 \text{ kg/h}}$$

$m = 5940 \text{ kg/h}$ de aire pueden recircularse como termino medio y expulsarse en forma regulada para garantizar el secado en el día (durante las horas diurnas).

2.3.6.6.2 Determinación del factor de remoción del calor (F_r).

$$F_r = \left\{ \left[\frac{\dot{m} \cdot C_p}{A_c \cdot U_1} \right] \cdot \left[1 - e^{-\left(\frac{U_1 \cdot F \cdot A_c}{\dot{m} \cdot C_p} \right)} \right] \right\} \quad (2.37)$$

$$F_r = \left\{ \left[\frac{5940 \cdot 1,0079}{21 \cdot 26,47} \right] \cdot \left[1 - e^{-\left(\frac{(26,47) \cdot (1) \cdot (21)}{(5940) \cdot (1,0079)} \right)} \right] \right\}$$

$$F_r = \underline{0,955}$$

Este factor de remoción da la relación entre el calor absorbido por el secador solar y el calor que absorbería si todo el plato absorbedor estuviera a la temperatura de entrada del fluido.

2.3.6.7 Parámetros globales. Energía Ganada y Eficiencia.

2.3.6.7.1 Determinación de la Energía Total horaria ganada por el calentador solar (Q_u).

$$Q_u = A_c \cdot F_r \cdot [S - U_1 \cdot (T_f - T_{ma})] \quad (2,38)$$

Y los valores de S fueron tomados de la tabla 2.9 en donde se muestran los valores horarios de S por m^2 y totales obteniendo así:

Tabla 2.12. Valores del calor Útil

Horas del día	S ($\text{kJ/m}^2 \text{ h}$)	Q_u (kJ/h)
6 - 7 17 - 18	175,25	-
7 - 8 16 - 17	526,25	7928
8 - 9 15 - 16	880,79	15040
9 - 10 14 - 15	1188	21210
10 - 11 13 - 14	1384	25140
11 - 12 12 - 13	1452	26500

2.3.6.7.2 Cálculo de la Eficiencia diaria del secador solar (η).

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

$$\eta_{dia} = \frac{\sum Q_U}{A_c \sum H_T} \quad (2,39)$$

$$\eta_{dia} = \frac{94073}{21 \cdot 7328,34}$$

$$\eta_{dia} = \frac{94073}{153895,14}$$

$$\eta_{dia} = \underline{\underline{0,61}}$$

2.4 Tiempo de secado

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

$$T = \frac{Q_n}{2 \sum Q_u} \quad (2.40)$$

donde:

Q_n : Energía necesaria para los $6m^3$

$$Q_n = Q \cdot V_m \quad (2.41)$$

$Q = 379100 \text{ kJ} / m^3 \text{ de madera}$

V_m : Volumen de madera

$$V_m = 6m^3$$

$$Q_n = 379100 \text{ kJ} / m^3 \cdot 6m^3$$

$$Q_n = \underline{\underline{2274600 \text{ kJ}}}$$

$$T = \frac{2274600 \text{ kJ}}{2 \cdot 95818 \text{ kJ} / \text{dia}}$$

$$T = \underline{\underline{11,86 \text{ días} \cong 12 \text{ días}}}$$

2.5 Selección de los ventiladores para el secado de la madera.

Los ventiladores para mover el aire, que se usan en diversos procedimientos de secado, entre ellos el secado a bajas temperaturas. Los costos de instalación y funcionamiento de dichos dispositivos se tornan cada día más costosos. Es necesario, pues, que el proyectista de sistemas de secado a bajas temperaturas elija y aplique el mejor equipo para mover el aire, teniendo en cuenta los factores técnicos y económicos correspondientes.

El ventilador sopla o aspira aire en forma continua, por acción aerodinámica, transformando energía mecánica en cinética para mover una cantidad de aire a través de



un sistema conectado a él, y generar presión estática suficiente para vencer las resistencias al movimiento del aire.

Los ventiladores se clasifican en dos categorías generales:

- a) ventiladores axiales
- b) ventiladores centrífugos.

Los *ventiladores centrífugos* que se ocupan en el secado a bajas temperaturas son, generalmente, del tipo de aspas vueltas hacia atrás.

Los *ventiladores axiales* están destinados a aplicaciones en lugares donde las presiones estáticas que hay que vencer son bajas y los flujos son elevados; los centrífugos sirven para las presiones estáticas elevadas.

Para poder seleccionar los ventiladores necesitamos conocer también:

- ◆ Cantidad de humedad a evaporar.
- ◆ Cantidad específica de aire.
- ◆ Cantidad de aire necesaria.

Deben evitarse velocidades del aire excesivas ya que conllevaría un secado muy rápido de la superficie de la madera mientras que la parte interior de esta se mantendría húmeda y con ello se producirían grietas y deformaciones no deseadas del producto.

2.5.1 Cantidad de humedad a evaporar diariamente por m³ de madera.

$$W_1 = \frac{W_t}{T} \tag{2.42}$$

$$W_1 = \frac{143,18}{12}$$

$$W_1 = \underline{\underline{11,93 \text{ kg de humedad /m}^3 \text{ de madera .}}}$$

2.5.2 Cantidad específica de aire.

$$l = \frac{1}{X_f - X_o} \quad (2.43)$$

$$l = \frac{1}{(0.0589 - 0.0075) \text{ kg de humedad / kg de aire seco}}$$

$$l = \underline{\underline{19,45 \text{ kg de aire / kg de humedad}}}$$

2.5.3 Cantidad de aire necesario cada día por m^3 de madera.

$$L = l \cdot W_i \quad (2.44)$$

$$L = 19,45 \cdot 11,93$$

$$L = \underline{\underline{232,03 \text{ kg de aire / m}^3 \text{ de madera.}}}$$

2.5.4 Cantidad de aire total para secar 6m^3 de madera.

$$L_t = L \cdot V_m \quad (2.45)$$

$$L_t = (232,03 \text{ kg de aire / m}^3 \text{ de madera}) \cdot (6\text{m}^3)$$

$$L_t = \underline{\underline{1392,18 \text{ kg de Aire. / día.}}}$$

2.5.5 Caudal total de aire diario.

$$Q_a = \frac{L_t}{\rho} \quad (2.46)$$

$$Q_a = \frac{1392,18 \text{ kg de aire}}{1,08 \text{ kg / m}^3}$$



$$Q_a = \underline{1290 \text{ m}^3 \text{ de aire.}}$$

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

$$Q_{av} = 645 \text{ m}^3 \text{ de aire / min.}$$

Para garantizar la velocidad del flujo de aire entre 0,8 a 1,2 m /s recomendada por Griñán (2001) este flujo de aire tiene que pasar en un tiempo mayor que el que se a estimado en un minuto y medio quedándonos un caudal de:

$$Q_{an} = 430 \text{ m}^3 \text{ de aire / min}$$

Con este caudal seleccionamos dos ventiladores para garantizar la circulación del aire pre-calentado a través de los espacios formados por los separadores colocados entre las piezas de madera para extraer la humedad por sus caras.

Marca: Sheldons Engineering.

Datos de los ventiladores tomados del catalogo 365B- 87.

Modelo: 330 F

Diámetro del ventilador: 33''

Flujo de salida: 7,55 m³/s

Velocidad de salida: 12,06 m / s

Potencia: 2,43 kW

Mínima rpm: 237

Máxima. rpm : 500

2.6 Funcionamiento del Secador Solar de Madera.

El secado de la madera ocurre por la evaporación del agua de la superficie de la misma y por el paso del agua del interior a la superficie. En este tipo de secador solar ambos efectos se producen durante todo el día, pero el primero tiene preferencia durante el día y el segundo durante la noche. De esta forma se alcanza un equilibrio entre los dos efectos durante las 24 horas, lo que garantiza la buena calidad en el secado, este

proceso termina cuando se alcanza la humedad requerida, según el uso que se le dará a la madera.

Luego de colocada la madera convenientemente dentro del secador, este se cierra herméticamente, se ponen en funcionamiento los ventiladores de recirculación del aire interior, los cuales trabajarán de forma constante. Este funcionamiento se realizará solamente en el horario diurno de 8:00 AM hasta las 5:00 PM y se realizara manualmente.

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

Con las ventilas de la secadora se puede controlar la circulación del aire en el interior de la cámara;, cuando se mantienen cerradas existe una recirculación interior debido a que el aire caliente pasa del colector hacia la madera y de la madera hacia el colector calentándose nuevamente (figura 2.7)

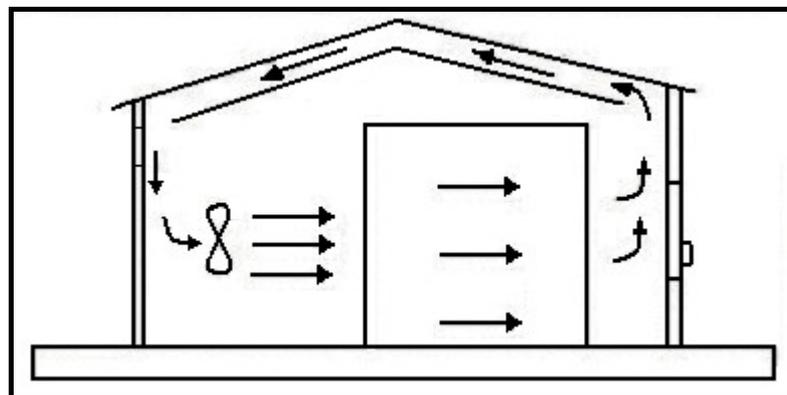


Figura 2.7 Funcionamiento del secador con las ventilas cerradas.

Pero si se mantienen abiertas, el aire caliente pasará del colector a la madera y después saldrá por las ventilas, inyectando así aire del medio ambiente hacia el colector (figura 2.8).



Después de este período se pueden abrir nuevamente durante media hora, alrededor del medio día para extraer el aire húmedo del interior, si se considera necesario. Durante esta etapa se debe tener especial cuidado en conocer la relación que existe entre el valor de humedad interior y el del exterior del secador para poder decidir si es apropiado abrir las ventilas, debido a que la humedad en el exterior pudiera ser mucho más alta que en el interior.

Al concluir esto, se cierran nuevamente las ventilas y se vuelven a abrir entre las 4 y 6 de la tarde durante media hora., al cabo de la cual se cierran y se apaga el sistema, repitiendo el procedimiento al día siguiente y los que dure el proceso de secado, hasta alcanzar el contenido de humedad deseado en la madera.

En la presente propuesta de guía básica de secado; vale la pena mencionar que para cada carga pueden existir variaciones en los horarios propuestos y en el número de veces que se deben abrir las ventilas, puesto que se regirán por las condiciones de temperatura y humedad que se tengan en el interior y exterior del secador, así como por el contenido de humedad que presente la madera que se esté secando.

Con la finalidad de poder llevar una mejor secuencia en el proceso de secado, el operario deberá siempre tomar en cuenta las mediciones de temperatura y humedad, para decidir los pasos a seguir durante el proceso y evitar al máximo un posible deterioro en la madera. Hay que considerar este punto como uno de los de mayor importancia, pues si el operario del proceso de secado no tiene estos conocimientos básicos, la calidad de la madera puede disminuir notablemente.

**BIBLIOGRAFÍA**

1. Duffie, J. A. and Beckman, W. A., “Solar Engineering of Thermal Processes”, Second Edition, Mc Graw-Hill, Inc., New York, 1991.
2. Centro de Estudios de la Energía. “El sol, un viejo conocido: introducción a la energía solar”. Madrid: Centro de Estudios de la Energía, 1982.
3. Centro de Estudios de la Energía Solar. “La energía solar: aplicaciones prácticas.” Sevilla: Promotora General de Estudios, 1993.
4. Dickson, D. “Tecnología alternativa”. Barcelona: Editorial Blume, 1980.
5. Acosta Rubio, José. “Energía solar: Utilización y aprovechamiento”. Madrid: Editorial Paraninfo, 1983.
6. Alvarez Noves, H. y Fernández, J. I., “Desarrollo de un Modelo INIA para el Secado de la Madera Aserrada”, Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias, Madrid, 1989.
7. Lara, M. A., “Secado Solar de Madera Aserrada”, Actas de la 15ta. Reunión de ASADES, Tomo II, Catamarca, 1992 .
8. Perry, R. H., Chilton, C. H., “Biblioteca del Ingeniero Químico”, Quinta Edición, Mc Graw-Hill, 1991.
9. Corvalan , R, et al.: Ingeniería del Secado solar, 1997.
10. B. Liu y R. Jordan “ Daily Insolation on Surfaces Tilted Toward the Equator”, Trans ASHRAE (1962)
11. Griñán V. Pedro A, Bergues Ciro y otros, “La madera y el secado solar” Santiago de Cuba, 2001.
12. Bértiz L. et. al. “Secador Solar de madera”, ACC, Centro de investigaciones de Energía Solar (CIES) Cuba, 1990.
13. Grigoriev. M.A., “Estudio de materiales para Ebanistas y Carpinteros.” Editorial MIR, Moscú, 1985.
14. Potapov B., Peraza F., “Protección superficial de la madera”, CTBA, Francia.



PAGINAS DE INTERNET

1. <http://www.oas.org/>
2. <http://www.unl.edu.ec/areas>
3. <http://www.cideiber.com/infopaises/Ecuador/Ecuador-04.html>
4. <http://centros5.pntic.mec.es/>