

**UNIVERSIDAD NACIONAL
"TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA"
DE AMAZONAS**



**FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE
INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL**

TÍTULO

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR DE MADERA
CEDRO COLORADO (*Cedrela odorata* L.) CON CALEFACCIÓN A
LEÑA, PARA LA CARPINTERÍA "J Y M HERMANOS",
CHACHAPOYAS - AMAZONAS**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AGROINDUSTRIAL**

AUTOR : Br. Henry Huamán Cubas

ASESOR : Ms.C. Miguel Ángel Barrena Gurbillón

Chachapoyas - Amazonas

2010

**UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA
DE AMAZONAS**



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE
INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL**

TÍTULO

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR DE MADERA
CEDRO COLORADO (*Cedrela odorata* L.) CON CALEFACCIÓN A
LEÑA, PARA LA CARPINTERÍA "J Y M HERMANOS",
CHACHAPOYAS – AMAZONAS**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AGROINDUSTRIAL**

AUTOR : Br. Henry Huamán Cubas

ASESOR : Ms.C. Miguel Ángel Barrena Gurbillón

Chachapoyas – Amazonas 2010

DEDICATORIA

A Doris y Salatiel mis
Padres; Percy, Milagros,
Fredy y Marianela mis
Hermanos, con mucho cariño.

AGRADECIMIENTO

- A la Universidad Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, por que sin su apoyo Institucional no habría podido formarme como profesional.
- A los Docentes de la Facultad de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad, por sus conocimientos vertidos en mi preparación profesional.
- Al los socios del Taller de Carpintería J & M Hermanos, en la Región de Amazonas, quienes han financiado el presente trabajo de investigación.
- Al Ms.C. Miguel Ángel Barrena Gurbillón, por su gentil colaboración y apoyo constante en el asesoramiento de este trabajo.
- A todas aquellas personas que directa o indirectamente cooperaron en la realización del trabajo de tesis.

**AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS**

**Dr. VICENTE MARINO CASTAÑEDA CHÁVEZ
RECTOR**

**Ms.C. MIGUEL ÁNGEL BARRENA GURBILLÓN
VICERRECTOR ACADÉMICO**

**Dra. FLOR TERESA GARCIA HUAMAN
VICERRECTOR ADMINISTRATIVO**

**Ing. GUILLERMO IDROGO VÁSQUEZ
DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA**

VISTO BUENO DEL ASESOR

El Docente de la UNAT-A que suscribe, hace constar que ha asesorado la realización de la tesis titulada “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR DE MADERA CEDRO COLORADO (*Cedrela odorata* L.) CON CALEFACCIÓN A LEÑA, PARA LA CARPINTERÍA J & M HERMANOS, CHACHAPOYAS – AMAZONAS**”, del egresado de la Carrera Profesional de Ingeniería Agroindustrial, Facultad de Ingeniería de la UNAT-A.

Br. Henry Huamán Cubas

El Docente de la UNAT-A que suscribe, da el Visto Bueno al Informe Final de la Tesis mencionada, dándole pase para que sea sometida a la revisión del Jurado Evaluador, comprometiéndose a supervisar el levantamiento de las observaciones dadas por el Jurado Evaluador, para su posterior sustentación

Chachapoyas, 24 de marzo del 2010



Ms.C. MIGUEL ÁNGEL BARRENA GURBILLÓN

Profesor Principal D.E. UNAT – A

Ésta tesis fue aprobada por el **JURADO EVALUADOR** de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Agroindustrial, Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, integrada por los siguientes docentes:



Ing. HELI HUMBERTO AGUIRRE ZAQUINAULA

PRESIDENTE



Blgo. OSCAR ANDRES GAMARRA TORRES

SECRETARIO



Ing. ERICK ALDO AUQUINIVIN SILVA

VOCAL

TABLA DE CONTENIDOS

Contenido	pág.
DEDICATORIA.....	I
AGRADECIMIENTO.....	II
PAGINA DE AUTORIDADES DE LA UNAT-AMAZONAS.....	III
PAGINA DE VISTO BUENO DEL ASESOR.....	IV
JURADO EVALUADOR.....	V
TABLA DE CONTENIDOS.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
RESUMEN.....	XIII
ABSTRACT.....	XIV
INTRODUCCIÓN.....	1
Cedro.....	3
Familia.....	3
Nombre científico.....	3
Nombres comunes.....	3
Datos ambientales.....	3
Cultivo.....	3
Cosecha.....	4
Estructura y propiedades térmicas de la madera.....	4
Secado.....	4
Variables de Forma.....	5
Conocimiento del proceso de secado.....	5
Definición de los criterios de calidad.....	6

Equipos e Instrumentos adecuados.....	8
Estabilidad constructiva.....	8
Dimensiones de la cámara.....	8
Ingeniería del secadero.....	9
Consumo energético.....	9
El secado de madera.....	9

MATERIAL Y MÉTODOS

Material.....	13
Metodología.....	13
Determinación de la Humedad de la madera.....	13
Determinación de condiciones de secado en el secador de bandejas de laboratorio.....	14
Construcción del secador experimental.....	14
Colector de energía o ducto de sección rectangular.....	15
Primer ensayo.....	15
Segundo ensayo.....	16
Cámara de combustión.....	16
Cámara de secado.....	17
Capacidad de carga.....	18
Material estructural y de aislante.....	18
Material del interior de la cámara de secado.....	18
Sistema de impulsión del aire de secado.....	18
Habilitación del secador de madera.....	19
Carga de las muestra de madera a secar.....	19
Operación del secador de madera.....	19

RESULTADOS

Humedad de la madera de cedro colorado (<i>Cedrela odorata</i> L.).....	20
Resultados experimentales obtenidos en el secador de bandejas del Laboratorio de Ingeniería de la UNAT-A.....	20
Muestra 1.....	20
Muestra 2.....	21
Muestra 3.....	23
Resultados experimentales empleados en el diseño del secador de madera.....	25
Colector de energía o ducto de sección rectangular.....	25
Primer ensayo.....	25
Segundo ensayo.....	25
Cámara de combustión.....	26
Cámara de secado.....	27
Material de conducción de calor y soporte.....	27
Material estructural y aislante.....	27
Capacidad de carga.....	27
Sistema de impulsión del aire.....	28
Operación del secador construido.....	28
Secador sin carga.....	29
Las pruebas definitivas.....	30
Curvas de secado.....	31
Costo de combustible para la cámara de combustión.....	33
Costos de construcción y operación del secador.....	33
Costo por pie tablar de producto secado.....	34

DISCUSIÓN.....	36
CONCLUSIONES.....	39
RECOMENDACIONES.....	40
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	41
ANEXOS.....	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Recomendaciones del Grupo Europeo de Secado (EDG).....	7
Tabla 2. Humedad final de la madera según usos.....	10
Tabla 3. Humedad de la madera de cedro colorado (<i>Cedrela odorata</i> L.).....	20
Tabla 4. Costos de construcción del secador.....	34
Tabla 5. Costo por pie tablar de cedro colorado seco.....	35
Tabla 6. Porcentaje de humedad perdida en base seca como en base húmeda de la Muestra 1.....	51
Tabla 7. Porcentaje de humedad perdida en base seca como en base húmeda de la Muestra 2.....	53
Tabla 8. Porcentaje de humedad perdida en base seca como en base húmeda de la MUESTRA 3.....	55
Tabla 9. Porcentaje de humedad perdida en base seca como en base húmeda de la PRUEBA 01.....	57
Tabla 10. Porcentaje de humedad perdida en base seca como en base húmeda de la PRUEBA 02.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Colector de energía y cámara de combustión.....	17
Figura 2. Esquema del secador de madera.....	18
Figura 3. Cambio de color en la muestra 1 después del secado	20
Figura 4. Tiempo de secado vs % de humedad a una temperatura del aire de secado de 60°C y una velocidad de 3,0 m/s.....	21
Figura 5. Grietas en la muestra 2.....	22
Figura 6. Tiempo de secado vs % de humedad a una temperatura del aire de secado de 70°C y una velocidad de 4,2 m/s.....	22
Figura 7. Muestra 3 después del secado.....	23
Figura 8. Tiempo de secado vs % de humedad a una temperatura del aire de secado de 65°C y una velocidad de 4,0 m/s.....	24
Figura 9. Colector de energía, tubo de sección rectangular instalado sobre a la cámara de combustión, cubierto con ladrillo y barro como aislante.....	26
Figura 10. Medición de la temperatura en el secador sin carga.	30
Figura 11. Pruebas definitivas en el secador construido.	31
Figura 12. Prueba 1. Tiempo de secado vs % de humedad a una temperatura del aire de secado de 62°C y una velocidad de 3,8 m/s.....	32
Figura 13. Prueba 2. Tiempo de secado vs % de humedad a una temperatura del aire de secado de 62°C y una velocidad de 3,8 m/s.....	32
Figura 14. Usando el secador de bandejas para el secado de cedro colorado.....	61
Figura 15. Cedro colorado seco de la Muestra 1.....	61
Figura 16. Cedro colorado seco de la Muestra 2.....	61
Figura 17. Cedro colorado seco de la Muestra 3.....	61
Figura 18. Elaboración del tubo rectangular.....	62

Figura 19. Colocación del tubo rectangular en la cámara de combustión 1ª prueba.....	62
Figura 20. Colocación del tubo rectangular en la cámara de combustión 2ª prueba.....	62
Figura 21. Ventilador con su adaptación para colocar en el tubo rectangular.....	62
Figura 22. Cámara de combustión con el tubo rectangular y el ventilador.....	62
Figura 23. Colocando la plancha galvanizada.....	63
Figura 24. Colocando el aislante (teknoport).....	63
Figura 25. Colocando la madera y el aislante (teknoport).....	63
Figura 26. Colocando el triplay para la protección y mejor acabado.....	63
Figura 27. Cámara de secado.....	63
Figura 28. Secador de madera culminado.....	63

RESUMEN

Se construyó un secador para madera utilizando leña como fuente de energía térmica (calefacción). Este equipo consideró la utilización de un ciclo de secado específico a partir de la combustión directa de la leña y su posterior dilución como aire caliente, para ser inyectado al proceso de secado en el interior de la cámara.

Esta tecnología es una opción real en el segmento del secado de la madera, que presenta consumos mensuales de madera inferiores a 50 m³ y utiliza especies de alto valor comercial como el cedro colorado (*Cedrela odorata* L.), de secado lento y con ciclos cercano a los 4 días.

La leña constituye una alternativa para evitar el mayor costo de operación por concepto del combustible por utilizar restos de madera del mismo taller, se compensa con la reducción del costo fijo que implica la incorporación operadores calificados para el funcionamiento de la caldera.

El estudio se realizó a partir de una evaluación comparativa de los costos de combustible y de los costos totales, entre el equipo de secado propuesto y un secador convencional, en función de programas de secado aplicados a madera cedro colorado (*Cedrela odorata* L.), para una misma producción de madera mensual.

Mediante financiamiento privado fue posible construir un secador de 1,54 m³ de capacidad de madera.

Palabras clave: Métodos de secado, madera cedro colorado, contenido de humedad, diseño de secador, construcción del secador y operación del secador.

ABSTRACT

We constructed a timber dryer using wood as a source of thermal energy (heat). This team considered the use of a specific drying cycle from the direct combustion of fuel and its subsequent dilution as hot air to be injected to the drying process inside the camera.

This technology is a real option in the segment of drying wood, wood monthly consumption below 50 m³ and uses commercially valuable species such as red cedar (*Cedrela odorata* L.), slow drying and close cycles at 4 days.

The wood is an alternative to avoid the higher cost of operation by way of fuel by using scrap wood from the same workshop, is offset by the reduction of fixed cost involving qualified operators for the operation of the boiler.

The study was conducted from a comparative assessment of the costs of fuel and total costs between the proposed drying equipment and a conventional dryer, depending on the drying schedule applied to red cedar wood (*Cedrela odorata* L.) for the same monthly wood production.

Using private finance was possible to build a dryer capacity of 1.54 m³ of wood.

Keywords: Methods of drying, red cedar wood, moisture content, dryer design, construction and operation of the dryer of the dryer.

1. INTRODUCCIÓN

A pesar de que el Perú cuenta con enormes recursos forestales, la industria maderera no ha tenido un desarrollo significativo y las empresas madereras que operan lo hacen con tecnologías atrasadas. En la actualidad la producción maderera nacional responde prioritariamente a la demanda del mercado interno y solo una pequeña fracción se orienta al mercado externo. En 1996, por ejemplo, la exportación fue de 23 000 m³ de productos de madera, es decir, solo el 3,14 % de la producción total (Aduanas, 2002). En la actualidad la producción maderera nacional responde prioritariamente a la demanda del mercado interno, aprovechando un promedio de 80 especies forestales para 14 productos principales: madera aserrada, madera seca y dimensionada, madera para carpintería (puertas y ventanas), elementos estructurales: vigas, viguetas y zócalos, láminas y pisos de madera (parquet), molduras, partes y piezas de muebles, embalajes, durmientes, tarugos y parihuelas, etc.

En términos generales, la situación económica - financiera de las empresas madereras de Amazonas es muy precaria. Varios factores han contribuido a que el parque industrial maderero en la región se encuentre en una situación de obsolescencia y de falta de competitividad nacional, entre otras podemos citar las siguientes razones (Minag, 2005):

- Inestabilidad política y económica en el período 1968 –2000.
- Carencia de infraestructura básica para el desarrollo en la región: carreteras, interconexión eléctrica, etc.)
- Falta de planeamiento estratégico a largo plazo en el área forestal: sin ordenamiento territorial, definición de zonas forestales de producción permanente, derechos de

concesiones forestales a largo plazo y mecanismos de supervisión y control adecuado.

- Poca capacidad institucional del sector forestal público para supervisar, monitorear, controlar los contratos forestales.
- Altos costos de producción y de transporte, como consecuencia de las carencias de infraestructura y de la baja tecnología empleada.

Las nuevas inversiones forestales e industriales deben estar orientadas a lograr:

- Manejo forestal sostenible.
- Tecnologías forestales e industriales eficientes.
- Recursos humanos calificados.
- Mejorar rendimientos y productividad industrial.
- Integración de recursos forestales, industria y mercados.
- Transferencia de tecnologías y capacitación empresarial.
- Sistemas de información eficientes.
- Desarrollo de mercados internacionales.
- Calidad, precio competitivo y servicios a los consumidores.
- Productos de mayor valor agregado.

Por ello el objetivo principal de este trabajo de investigación fue mejorar la calidad de la madera cedro colorado (*Cedrela odorata* L).

1.1. Cedro

- **Familia:** Meliaceae.
- **Nombre científico:** *Cedrela odorata* L.
- **Nombres comunes:** cedro colorado; cedro de altura; cedro del bajo; Atokc; cedro de castilla, puxni (tepehua); Santabiri; sedre (Surinam); manan conshan (shipibo-conibo).

1.1.1. Datos ambientales

- **Clima:** Tropical, con elevada intensidad solar, temperatura media anual de 22 a 27°, precipitación pluvial entre 1 200 a 3 300 mm/año.
- **Suelo:** Crece vigorosamente en suelos extremadamente ácidos (pH menor de 4,5), franco arcillosos y con buen drenaje, así como en inundables recientes (restingas). También se desarrolla en suelos de textura francoarcillo-limosa y con pH moderadamente ácido a ligeramente alcalino.

1.1.2. Cultivo

- **Época de siembra:** En la Amazonía Peruana, de noviembre a diciembre, en coincidencia con el período de mayor precipitación pluvial, en los suelos inundables.
- **Espaciamiento:** Distanciamiento de 10 m x 10 m. El espaciamiento puede reducirse a 5 m x 5 m para el caso de plantaciones de alta densidad y cosecha escalonada.

1.1.3. Cosecha

- **Partes aprovechadas:** Tronco, corteza, resina, flores. Se realiza con la ayuda de una motosierra.

1.2. Estructura y propiedades térmicas de la madera

La madera, como todos los materiales orgánicos, presenta una estructura extremadamente compleja y heterogénea, variable y con características en el ámbito microscópico muy diferentes de un punto a otro. Los tejidos celulares que la componen son de diferente naturaleza, consistencia y calidad, pero sobretodo variable dependiendo de la especie a la que pertenezca (Saavedra, 1998).

En cuanto al poder calorífico de las maderas no varía significativamente y puede fijarse como promedio aproximado en 4500 kcal/kg, teniéndose en las maderas resinosas o muy compactas valores que pueden llegar a 5000 kcal/kg. Para hacer una estimación de la potencia calorífica de la madera tal como se recibe, puede obtenerse a través de una ecuación que determina el calor de combustión como función de sus componentes. Y el poder calorífico del cedro es 4767.4 kcal/kg (Saavedra, 1998).

1.3. Secado

El término secado se refiere a la eliminación de humedad en una sustancia. De acuerdo a la forma de la alimentación, el secado puede ser continuo o discontinuo; y de acuerdo al agente de secado puede ser directo o indirecto (Perry y Chilton, 1982). En el proyecto, consideraremos que el causante de la humedad es el agua y que el agente de secado es aire caliente.

El secado de la madera se ha convertido en un proceso vital para el desarrollo de la industria maderera de cualquier país, de hecho, la calidad con la que se adelante es un tema obligado si se quiere competir a nivel regional o nacional con buenos productos (Salinas C, et al, 1997)

La industria, en este campo, enfrenta dos retos importantes a resolver: la gran cantidad de tiempo y energía que consume el proceso de secado, y la ineficiencia en el proceso, relacionado con la condición de humedad de la madera y sus anomalías sucedáneas, que lleva a consumos energéticos altos en procesos de remanufactura y pérdidas de materia prima.

Así el presente trabajo de investigación, de diseño de un secador de madera es para extraer la humedad de la madera logrando un producto estable dimensionalmente y competitivo en el mercado. Su control de calidad debe estar dirigido a definir las especificaciones a las que el producto deberá ajustarse teniendo en cuenta algunas variables (Atencia, 2000).

1.3.1. Variables de forma

Para llevar adelante un proceso de secado cuyos resultados se adapten a los requerimientos nacionales, es necesario tener en cuenta los siguientes ítems: Conocimiento de los procesos, definición de criterios de calidad y equipos e instrumentos adecuados.

1.3.1.1. Conocimiento del proceso de secado. Actualmente, es muy difícil concebir la conducción de un proceso de secado si no se cuenta con operadores de equipos adiestrados adecuadamente, de manera que no

sean simples operadores sino que tengan el criterio y la formación necesaria para tomar decisiones, en pos de la mejora del proceso.

Hasta hace algún tiempo, era frecuente que el personal menos capacitado o calificado se ocupara de supervisar el área de secado (secaderos y caldera). Hoy en día esta conducta se está desterrando ya que se ha comprendido que este proceso es la llave que permite ingresar a posteriores procesos productivos y debe estar en manos de personal idóneo y competente.

El resultado de la operación de secado depende en gran medida de la conducción del proceso y de la competencia del operador, quien participa desde el estibado de la madera hasta el final del proceso; por tal motivo es necesario que en todo momento actúe con un conocimiento total del tema y con criterio suficiente que le permita conjugar las acciones técnicas con la incidencia económica que implican sus decisiones.

1.3.1.2. Definición de los criterios de calidad. A nivel internacional y de acuerdo a las recomendaciones del Grupo Europeo de Secado (EDG), se tienen definidos criterios de calidad de secado obligatorios para las maderas calificadas como S, Q y E (ver Tabla 1), en lo referido a humedad y tensiones; y opcionales a pedido del consumidor, en los que se tienen en cuenta defectos tales como el colapso, cambios de

color, manchas, deformaciones provocadas por mal apilado, etc. que se muestra en Tabla 1.

Tabla 1: Recomendaciones del Grupo Europeo de Secado (EDG).

LAS RECOMENDACIONES DEL EDG, CONSIDERAN TRES CLASES DE CALIDAD	S (Secado standard). Aplicable a madera cuyo destino final no se ha definido. Sus requerimientos de calidad no son los más altos. Esta calidad podría aplicar a madera para la construcción.
	Q (Secado de calidad). Aplicable a destinos bien definidos. Los requerimientos de calidad son altos. Aplicable a muebles en general y pisos.
	E: Secado especial. Aplicable a partidas de usos muy específicos. Sus requerimientos de calidad son muy altos. Aplicable a muebles de estilo, colección, pisos especiales, etc.

Fuente: Atencia, 2000.

Se debe tener en cuenta que, cuanto más exigente y de mayor valor agregado es el producto final que se desea obtener, más exigencias de calidad se deberán cumplir.

A nivel colombiano, a pesar de los esfuerzos realizados por los especialistas en secado para unificar criterios de calidad para el secado de madera, aun no se logra arribar a las coincidencias, de manera que sea posible generar documentos que den lugar a la normalización de

sistemas de aseguramiento de la calidad. En la mayoría de los casos, lamentablemente, sólo se exige una humedad final determinada sin tener en cuenta otros factores que afectan la calidad final del producto y que están directa o indirectamente ligados al proceso de secado (Sánchez, 2003).

Los criterios de calidad forman una unidad de variables que incluyen: el tipo de madera a secar y sus características particulares, los equipos empleados, el perfil y la capacitación del personal responsable del secado y el conocimiento necesario de los procesos.

1.3.1.3. Equipos e instrumentos adecuados, Indudablemente si se posee el conocimiento y una definición clara de los requerimientos de calidad, pero no se cuenta con equipos adecuados, el camino está recorrido a medias, de esta inquietud presentada en este trabajo de investigación, donde hay que jugar con todos los aspectos involucrados en el proceso, y a nivel técnico y estructural, dar especial atención a detalles como:

- a) **Estabilidad constructiva:** estanqueidad y resistencia a la corrosión.
- b) **Dimensiones de la cámara:** el tamaño óptimo depende de la calidad del secado requerida, la velocidad del proceso, los costos de la operación de secado y la flexibilidad de empleo de la cámara.

- c) **Ingeniería del secador:** tipos de puertas, características y diseño de los sistemas de circulación de aire, características y diseño del sistema de calentamiento, regulación y control del proceso de secado.
- d) **Consumo energético:** La oferta de equipo es amplia tanto a nivel regional como nacional, pero sólo unos pocos trabajan en I&D (Investigación y Desarrollo) que es lo que les permite estar a la vanguardia de las nuevas estrategias de control del secado en condiciones industriales. Paralelamente, el máximo rendimiento y la calidad en los procesos de secado, está relacionado también con adelantar un programa que incluya aspectos como: almacenamiento correcto y precisión de las dimensiones de la madera, apilado correcto, equipos adecuados, (por esta razón el proyecto), protección de la madera, y el cuidado de los registros sobre el secado y la producción.

Las técnicas de secado citadas y aplicadas a la madera, demuestran su efectividad en la calidad final del producto. La calidad óptima de la madera seca se ve reflejada en la coincidencia entre el contenido de humedad final programado y el contenido de humedad obtenido, siempre relacionado con el uso que se le dará a esa madera (Atencia, 2000).

1.3.2. El secado de madera

Constituye una de las etapas más importante del proceso de preparación de madera para la remanufactura, tendiente a obtener productos finales con alto valor agregado. Los requerimientos de estabilidad dimensional y cualidades de trabajo exigidas para las maderas a procesar, son fundamentales para la calidad final de los productos, lo que sólo es posible obtener con maderas cuyo contenido de humedad esté próximo al estado de equilibrio con el ambiente que le rodea, algunos datos del porcentaje de humedad final según uso de la madera se muestra en la Tabla 2 (Saavedra, 1998).

Tabla 2. Humedad final de la madera según usos

Uso de la madera	Humedad final (%)
Para la construcción	18 a 20
Objetos colocados al exterior	18 a 20
Ventanas y puertas exteriores	12 a 15
Elementos de construcción en habitaciones	8 a 12
Muebles	8 a 10
Muebles en habitaciones calefactadas	6 a 8
Suelos de parquet	8
Tarimas	12 a 14
Instrumentos musicales	6 a 8
Plafones y recubrimientos de las paredes	5 a 7

Fuente: Saavedra, 1998.

En aplicaciones bajo este rango de humedad el secado artificial adquiere un mayor valor pues como esta indicado en la Tabla 2 la humedad final que tendrá la madera puede llegar de 5 a 6 %.

Para alcanzar la condición antes mencionada, la madera debe necesariamente someterse a proceso de secado de tipo artificial. La tecnología a utilizar y el programa o tratamiento que debe aplicarse a la madera, antes, durante y posterior al secado son factores decisivos, para la obtención de un producto óptimo, en términos de: contenido de humedad, tensiones, grietas, alabeos y otros aspectos, que permitan maximizar el aprovechamiento en los procesos de elaboración (Saavedra, 1998).

Por otro lado, los costos de secado constituyen otro factor determinante en la decisión de considerar o no la posibilidad de aplicar un secado artificial a la madera. Los factores que determinan lo anterior son: los tiempos de secado, la productividad de las cámaras (ciclos por mes), la capacidad de éstas y la producción mensual de secado. La incidencia de los costos fijos y del personal de operación, sobre los costos de secado o de venta de servicio, son factores determinantes en esta decisión. A modo de ejemplo es posible citar; para el secado de madera de pino radiata con un volumen de 2 000 m³/mes, que representa el punto de equilibrio de una planta de elaboración, el costo fijo por concepto de mano de obra directa, es de 2 US\$/m³, sobre un costo total de secado de 10 a 12 US\$/m³ y un precio de venta de servicio de 18 a 20 US\$/m³ (Infor, 1999).

El presente trabajo de investigación, pretende sólo informar respecto de la factibilidad técnica-económica de operar este tipo de secadores, evaluar su eficiencia térmica y sus costos de energía para finalmente determinar los puntos de equilibrio que determinen la rentabilidad del ciclo propuesto, respecto de un ciclo convencional, considerando aspectos de: producción mensual de madera seca y permeabilidad de la madera.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Material

Para determinar la velocidad y temperatura del aire de secado necesaria, se realizó tres pruebas en el secador de bandejas del Laboratorio de Ingeniería, para lo cual se empleó tablas de cedro colorado (*Cedrela odorata* L.) de las siguientes dimensiones 1" x 4" x 1 pie de largo.

Para el trabajo en el secador experimental construido, se empleó tablas de cedro colorado (*Cedrela odorata* L.) de las siguientes dimensiones 1" x 3" x 1 pie de largo tomadas en forma aleatoria de la línea de producción de unos aserraderos ubicados en la región, el acondicionamiento inicial se realizó en el taller de Carpintería J & M Hermanos y posteriormente se trasladó al secador construido.

2.2. Métodos

2.2.1. Determinación de la humedad de la madera

En el Laboratorio de Ingeniería de la UNAT-A, se colocó en estufa a 115°C cubos de cedro colorado de 1"x1"x1", obtenidos de 3 tablas de esta madera tomadas al azar del taller de Carpintería J & M Hermanos de Chachapoyas. El secado se realizó hasta peso constante. Se empleó un cubo como muestra 1, un cubo como muestra 2 y un cubo como muestra 3. Para el cálculo se empleó la siguiente fórmula:

$$\% \text{ HUMEDAD} = \frac{W1 - W2}{W1} \times 100$$

Donde:

W1: peso inicial de la muestra (g)

W2: peso final de la muestra (g)

2.2.2. Determinación de condiciones de secado en el secador de bandejas de laboratorio

En el secador de bandejas del Laboratorio de Ingeniería de la UNAT-A, se determinó la velocidad y temperatura del aire de secado y el tiempo necesario para secar seis tablas de cedro colorado (*Cedrela odorata* L.) de las siguientes dimensiones 1" x 4" x 1 pie de largo, que fueron obtenidas de tres tablas de cedro colorado tomadas al azar del taller de Carpintería J & M Hermanos; esto constituyó la muestra 1 y de manera similar se obtuvo las muestras 2 y 3. Las seis tablas de cada muestra se apilaron alternadamente dentro de la cámara de secado, de manera que quedó espacio entre ellas para la libre circulación del aire caliente. Se ensayaron los siguientes pares de velocidad y temperatura del aire de secado: 3,0 m/s a 60°C; 4,0 m/s a 65°C y 4,2 m/s a 70°C. La selección del par velocidad-temperatura del aire de trabajo se realizó evaluando las características de calidad de la madera secada a esas condiciones, como son: ausencia de grietas, alabeos, cambio de color y ausencia de brillo.

2.2.3. Construcción del secador experimental

Se diseñó y construyó un secador constituido por un soplador con motor eléctrico; una cámara de combustión directa de leña que calentó un ducto de

sección rectangular con mamparas alternadas en la base y en su techo, por donde fluyó el aire impulsado por el soplador, para una mejor calefacción del aire; una cámara de secado donde se apiló las tablas de cedro colorado a secar.

Los ensayos experimentales realizados en el secador construido sirvieron para:

1. Validar las condiciones de operación del equipo.
2. Determinar los costos reales de secado para maderas blandas y duras.
3. Verificar la estabilidad de la temperatura, la velocidad del aire, el tiempo de secado y la humedad final.

2.2.3.1. Colector de energía o ducto de sección rectangular

El problema básico al diseñar una cámara de combustión con un colector de energía, consiste en disponer la superficie total de absorción de calor de una manera tal que se extraiga el calor máximo del combustible y de los productos de la combustión.

El diseño del colector de energía, se realizó mediante dos ensayos, por no tener referencias bibliográficas (fórmulas) para este modelo que se propone en el presente trabajo de investigación.

- a) **Primer ensayo:** Se empleó un tubo de sección rectangular de 1 m de longitud x 0,4 m de ancho x 0,3 m de alto, instalado sobre la cámara de combustión, cubierto con ladrillos y barro para mantener la temperatura.

b) Segundo ensayo: Se empleó un tubo de sección rectangular de 1,2 m de longitud x 0,4 m de ancho x 0,3 m de alto, instalado sobre la cámara de combustión cubierto con ladrillos y barro para mantener la temperatura.

2.2.3.2. Cámara de combustión

Para el diseño de la cámara de combustión se tuvo en cuenta el conocimiento de las partes constitutivas de la cámara de combustión con un colector de energía, sobre las que se realizó diferentes pruebas como:

- Sistema de alimentación de combustible.
- Hogar o cámara de combustión con suministro de aire.
- Ductos de salida de productos de la combustión y sistema de recolección de cenizas.

Cada una de estas partes se dimensionó siguiendo un ordenamiento lógico:

- Se estableció la capacidad de la cámara de combustión.
- Se calculó la cantidad de calor requerido para calentar el aire del ducto de sección rectangular.
- Se asumió una eficiencia de la cámara de combustión con un colector de energía.
- Se determinó la cantidad de combustible a usar.
- Se verificó la salida de la masa de humos.

- Se calculó el área de sección del ducto.
- Se determinó el volumen del hogar o cámara de combustión y se dimensionó la cámara de combustión, con las siguientes características:
 - a) Alimentación libre de obstrucción.
 - b) Flujo de combustible constante.
 - c) Evitar zonas muertas que incurran en pérdidas de tiempo del proceso continuo de alimentación.
 - d) El combustible (leña de diferentes tipos de madera) se mezcló, para homogenizarla.

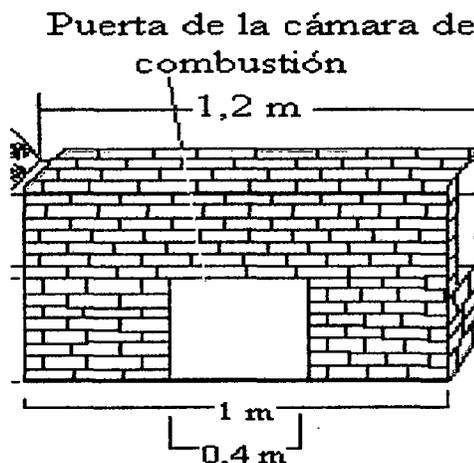


Figura 1: Colector de energía y cámara de combustión.

2.2.3.3. Cámara de secado

La cámara de secado es el espacio útil del secador de madera en el que se introdujo la carga de madera a secar. La puerta de acceso a la cámara de secado es de tipo batiente y se colocó en el mismo lado en

que se ubicó la puerta de la cámara de combustión. Se diseñó y construyó considerando los siguientes parámetros y materiales:

- a) **Capacidad de carga:** en función de las dimensiones de las tablas a secar.
- b) **Material estructural y de aislante:** listones de madera de 2"x1"x2 m y planchas de teknoport de 1".
- c) **Material del interior de la cámara de secado:** planchas galvanizadas de 1/40" de espesor.

2.2.3.4. Sistema de impulsión del aire de secado

Un ventilador centrífugo con motor eléctrico se empleó para captar el aire del medio ambiente e impulsarlo al interior del ducto de sección rectangular donde se calentó, para enseguida hacerlo llegar hasta la cámara de secado.

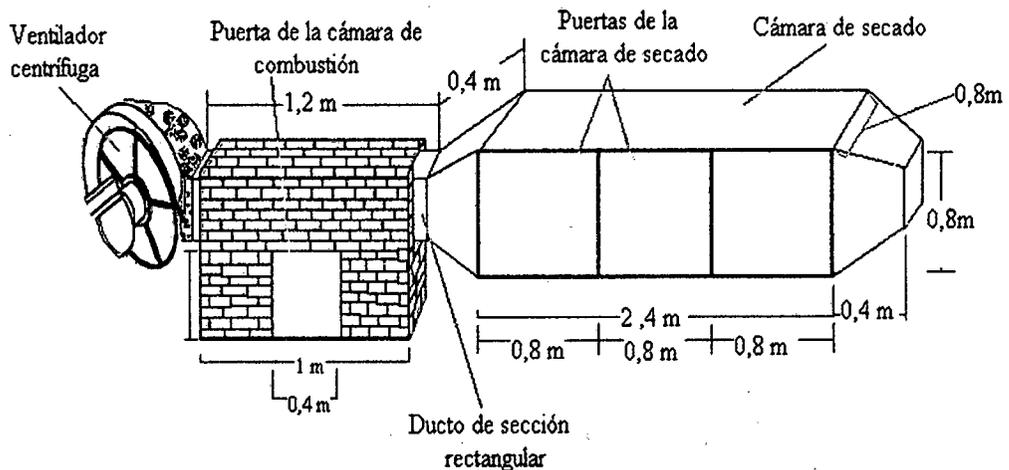


Figura 2. Esquema del secador de madera.

2.2.4. Habilitación del secador de madera

Con el propósito de establecer la secuencia de operación del secador de madera, fue necesario realizar pruebas preliminares durante dos semanas, con carga de madera, tiempo suficiente para realizar los ajustes necesarios al secador de madera y la colocación del ventilador.

2.2.4.1. Carga de las muestra de madera a secar

Las tablas a secar se apilaron dentro de la cámara de secado de manera alternada, dejando una separación entre ellas igual al grosor de las tablas hasta completar la pila de secado.

2.2.4.2. Operación del secador de madera

El secador de madera se puso en funcionamiento de acuerdo con los lineamientos establecidos a partir de las pruebas preliminares, con el fin de mantener las condiciones adecuadas de secado. El ventilador del secador de madera tuvo la siguiente frecuencia de trabajo: dos horas encendido y 10 minutos apagado, y funcionó desde las 8:30 horas hasta las 17:30 horas.

3. RESULTADOS

3.1. Humedad de la madera de cedro colorado (*Cedrela odorata* L.)

Tabla 3. Humedad de la madera de cedro colorado (*Cedrela odorata* L.)

Muestra control	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Humedad (%)
Tipo 1	9,87	6,03	39,37
Tipo 2	15,95	11,12	35,46
Tipo 3	9,40	6,39	30,81

Fuente: elaboración propia.

3.2. Resultados experimentales obtenidos en el secador de bandejas del Laboratorio de Ingeniería de la UNAT-A

3.2.1. Muestra 1: ($T = 60^{\circ}\text{C}$; velocidad del aire = 3,0 m/s y dimensión = 1'' x 4'' x 1 pie de largo)

a) Humedad = 39,37%

b) Características de la madera seca: No presenta defectos (ausencia de grietas y alabeos), el color cambia de rojo intenso a rojo blanqueado.

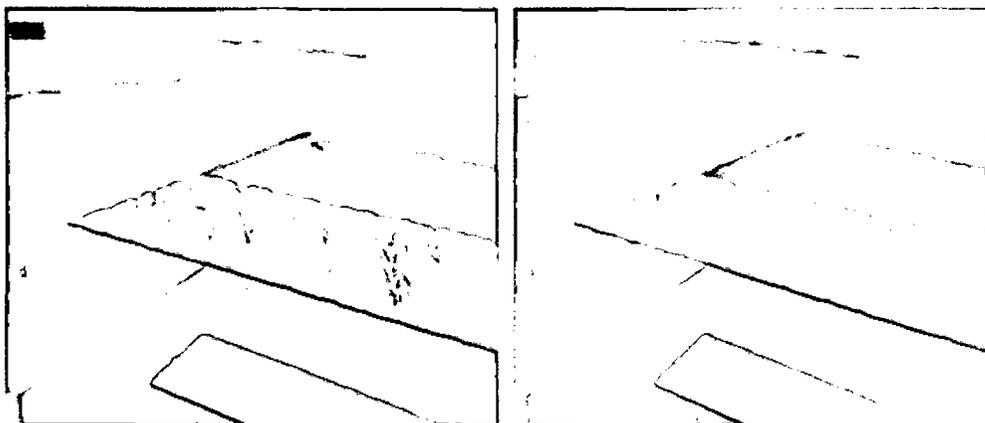


Figura 3. Cambio de color en la muestra 1 después del secado.

c) Tiempo de secado: 28 horas.

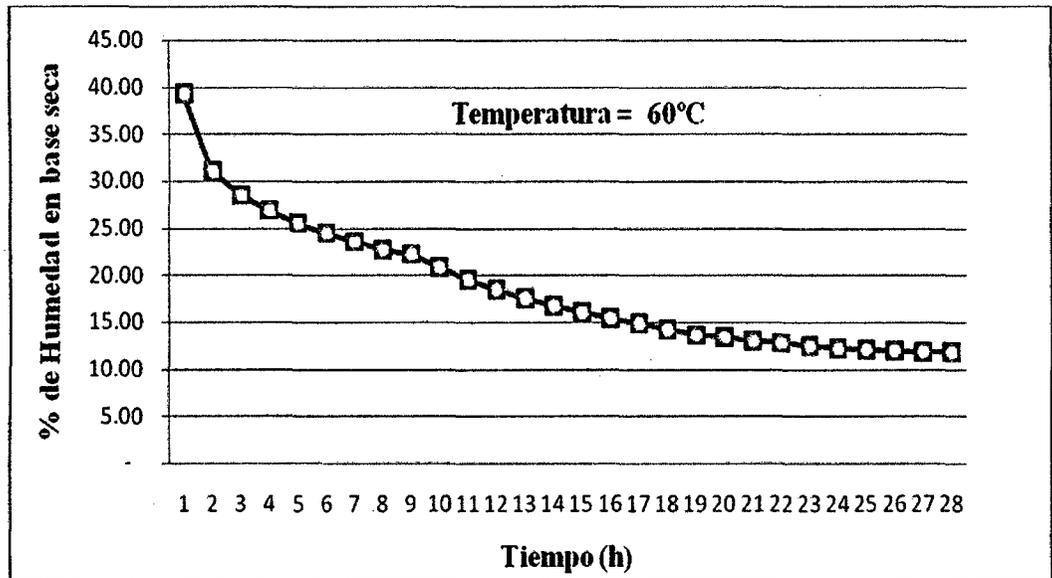


Figura 4. Tiempo de secado vs % de humedad a una temperatura del aire de secado de 60°C y una velocidad de 3,0 m/s.

En la Figura 2 se observa que a las 25 horas de secado ya tenemos una humedad de 12%.

Decisión: No se selecciona estos datos experimentales por las características defectuosas de la madera seca, mencionadas anteriormente.

3.2.2. Muestra 2: ($T = 70^{\circ}\text{C}$; velocidad del aire = 4,2 m/s y dimensión = 1" x 4" x 1 pie de largo)

- a) Humedad = 35,46%
- b) Características de la madera seca. Presenta defectos (grietas y alabeos), el color cambia de rojo intenso a rojo blanqueado.

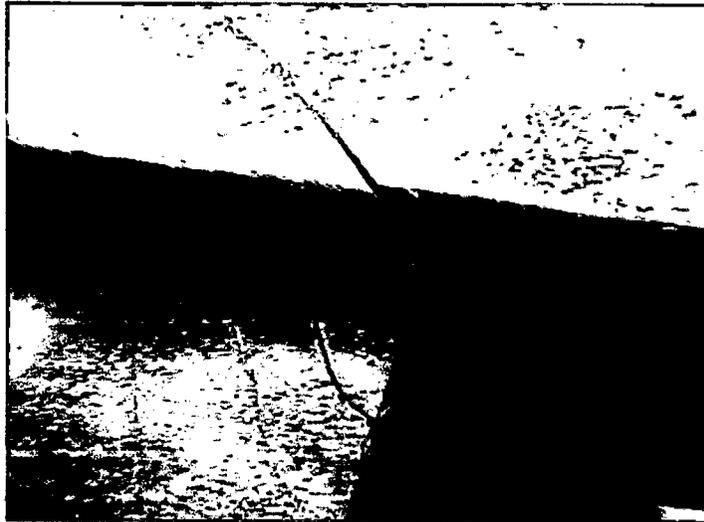


Figura 5: Grietas en la muestra 2.

c) Tiempo de secado 28 horas.

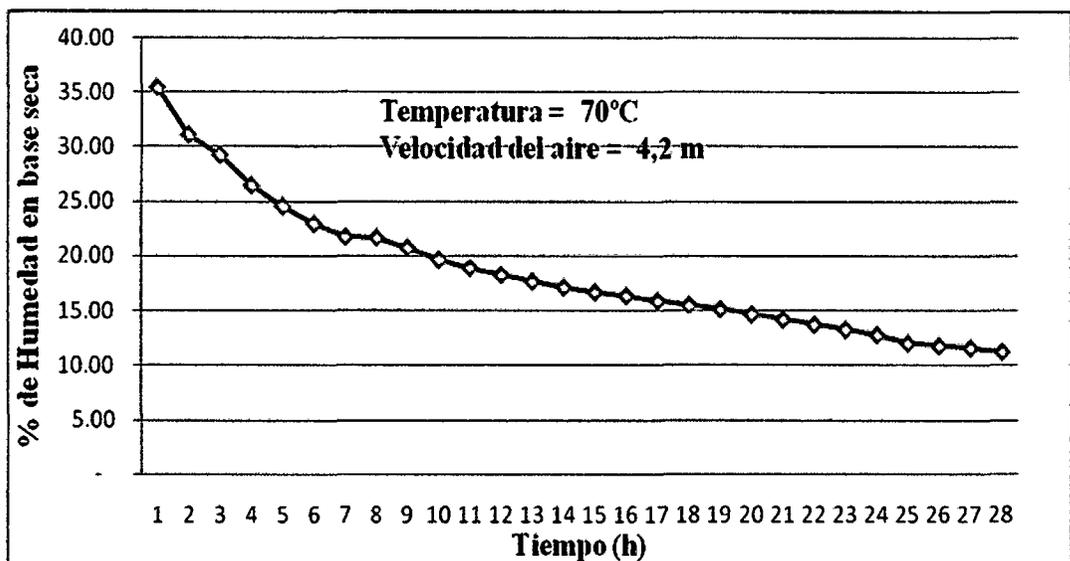


Figura 6. Tiempo de secado vs % de humedad a una temperatura del aire de secado de 70°C y una velocidad de 4,2 m/s.

En la Figura 3 se observa que a las 25 horas de secado ya tenemos una humedad de 12%.

Decisión: No se considera estos datos experimentales por las características de la madera seca mencionadas anteriormente.

3.2.3. Muestra 3: ($T = 65^{\circ}\text{C}$; velocidad del aire = 4,0 m/s y dimensión = 1" x 4" x 1 pie de largo)

a) Humedad = 30,81%

b) Características de la madera seca: Se mantiene las características iniciales de la madera como el color y la madera seca no presenta defectos (ausencia de grietas y alabeos).



Figura 7. Muestra 3 después del secado.

c) Tiempo de secado 28 horas.

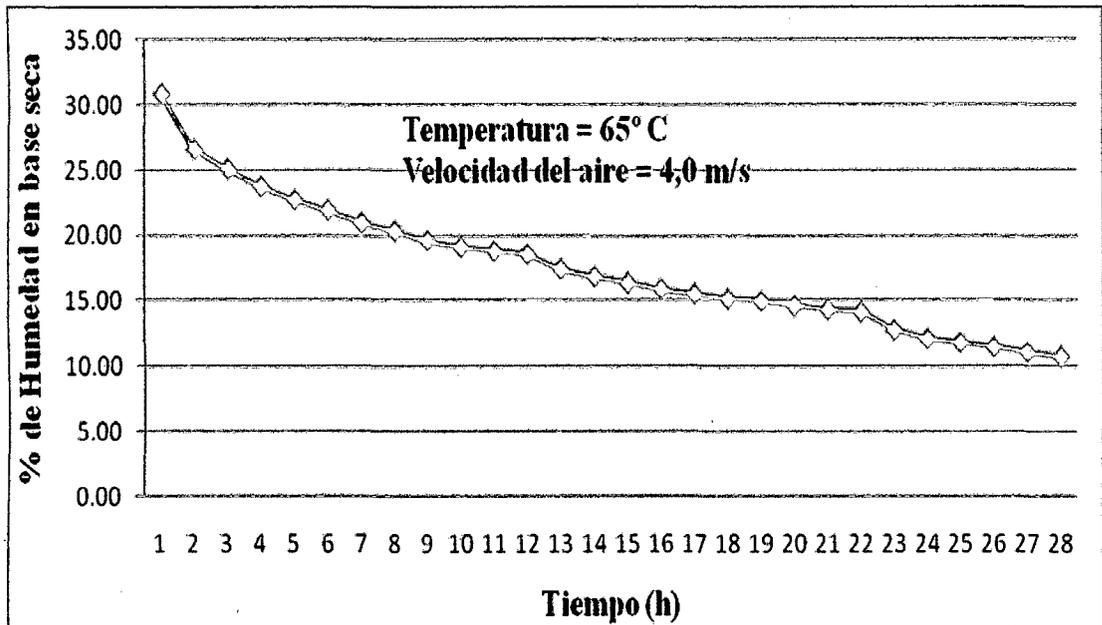


Figura 8: Tiempo de secado vs % de humedad a una temperatura del aire de secado de 65°C y una velocidad de 4,0 m/s.

En la Figura 8 se observa que a las 25 horas de secado ya tenemos una humedad de 12%.

Decisión: Para el diseño del secador de madera se tienen en cuenta estos datos experimentales por que las características que presenta la muestra 3 son las más adecuadas para el procesamiento de la madera en los distintos usos que se lo de, especialmente para muebles; además, el tiempo de secado es menor a los anteriores y las características de la madera seca coinciden con lo reportado en la bibliografía existente.

3.3. Resultados experimentales empleados en el diseño del secador de madera

3.3.1. Colector de energía o ducto de sección rectangular: El diseño del colector de energía, se realizó mediante dos ensayos, los resultados obtenidos son los siguientes:

3.3.1.1. Primer ensayo: (ducto de sección rectangular de 1 m de longitud x 0,4 m de ancho x 0,3 m de alto. Se obtuvo los siguientes resultados: velocidad del aire de 4 m/s y temperatura del aire a la salida del ducto de 55 a 61°C.

3.3.1.2. Segundo ensayo: (ducto de sección rectangular de 1,2 m de longitud x 0,4 m de ancho x 0,3 m de alto). Se obtuvo los siguientes resultados: velocidad del aire de 4 m/s y temperatura del aire a la salida del ducto de 60 a 70°C.

Decisión: Se ha dotado de un volumen mayor a la cámara de combustión, con el aumento de tamaño del ducto de sección rectangular, que permite aprovechar mejor el combustible para calentar el aire, dado que se necesita una mayor temperatura a la entrada de la cámara de secado. El tamaño del ducto del segundo ensayo se empleó construir el secador porque permitió tener mayor temperatura.

3.3.2. Cámara de combustión

Las dimensiones de la cámara de combustión se diseñaron en función directa de la forma y tamaño del ducto de sección rectangular (1,2 m x 0,4 m x 0,3 m), dejando dos espacios de 0,10 m a cada lado de la cámara que se usaron para conectar el ventilador y la cámara de secado. El ladrillo usado tenía 0,15 m de ancho y se consideró una altura de la cámara de combustión de 0,40 m que equivale a tres veces la longitud de la llama. Los humos tenían una velocidad tal, que permitía la combustión completa de la leña y salían de la cámara de combustión por una chimenea de 0,15 m x 0,15 m x 1,83 m de alto. Con todas estas consideraciones, la cámara de combustión tiene las siguientes dimensiones: 0,7 m de largo x 0,6 m de ancho x 0,4 m de alto; dando un volumen de 0,168 m³.

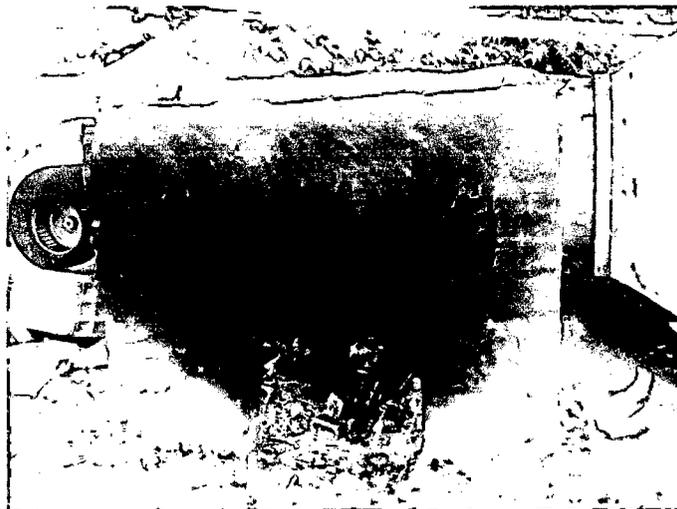


Figura 9. Colector de energía, tubo de sección rectangular instalado sobre a la cámara de combustión, cubierto con ladrillo y barro como aislante.

Para alcanzar el máximo de transferencia de calor se creó una turbulencia en el aire, por medio de deflectores o mamparas sujetas en el interior del ducto de sección rectangular a 0,20 m uno del otro, dos en la pared superior y tres en la pared inferior; con esto se hizo circular el aire en forma serpenteante en el interior del ducto. Esto causa una considerable turbulencia aún cuando por el interior circule una cantidad pequeña de aire.

3.3.3. Cámara de secado

Para el diseño y construcción de la cámara de secado se tuvo en cuenta los siguientes resultados:

3.3.3.1. Capacidad de carga: 652,96 pies-tabla (1,54 m³) en función del tamaño de las tablas a secar.

3.3.3.2. Material estructural y aislante: listones de madera de 2"x 2" x 6' y plancha de teknoport de 1 pulgada de espesor.

3.3.3.3. Material de conducción de calor y soporte: planchas de fierro galvanizado de 1/40" de espesor.

En este trabajo de investigación, las paredes de la cámara de secado se construyeron con planchas de fierro galvanizado de 1/40" de espesor, y como aislante teknoport de 1 pulgada de espesor, con recubrimiento exterior convencional a base de triplay de 0,005 m de espesor. De acuerdo con reportes de investigaciones realizadas en el período de 1980 a 1991 a nivel mundial, gran parte de las pérdidas de energía en los secadores de madera se

debe a la falta de aislamiento térmico adecuado en la cámara de secado; con base en el análisis de dichos estudios se tomó la decisión de colocar en las paredes un revestimiento de triplay sobre la plancha galvanizada y el teknoport. La cámara de secado está provista de dos bocas de 0,40 x 0,40 m para la entrada del aire caliente y la salida del aire eliminando la humedad.

3.3.4. Sistema de impulsión del aire

Se utilizó un ventilador centrífugo que tiene un rotor (0,22 m de diámetro) encerrado en una envolvente de forma espiral, con un motor monofásico de 0,5 HP de potencia y una velocidad angular máxima de 1350 rpm. Este ventilador hace que el aire entre a temperatura ambiente por el extremo abierto del ducto de sección rectangular (1,2 m de longitud x 0,4 m de ancho x 0,3 m de alto) y pase por su interior para calentarse y enseguida entre a la cámara de secado. El ventilador centrífugo proporcionó una velocidad de trabajo de 3,8 m/s.

3.3.5. Operación del secador construido

El procedimiento que se utiliza para operar un secador de madera con calefacción a leña se denomina secuencia de secado, la cual está conformada por una serie de lineamientos que deben seguirse sistemáticamente, con el propósito que en el interior del secador se tengan condiciones de temperatura, velocidad del aire y humedad relativa para que el secado de la madera se lleve a cabo en el tiempo más corto posible y sin que en ella aparezcan defectos. Una secuencia bien definida garantiza una velocidad de secado adecuada. Una

velocidad alta de secado se asocia fundamentalmente con la combinación de la mayor temperatura y la menor humedad relativa que puedan obtenerse durante la operación del secador; sin embargo, dependiendo del tipo de madera que se esté secando, una velocidad alta de secado pudiera no ser conveniente, ya que podría ocasionar la aparición de defectos en la madera.

Con base en las características técnicas del secador, de las condiciones climatológicas de la localidad (humedad relativa y temperatura) y de las condiciones de humedad inicial de la madera, se propuso una secuencia de secado, la misma que se fue ajustando hasta lograr el procedimiento que respondió favorablemente durante el proceso de secado y que, de acuerdo con uno de los objetivos del proyecto, se tomó como base para la formulación de la secuencia que se propone al final del estudio.

Una vez que se realizaron las pruebas y se recopiló toda la información, se procedió al análisis e interpretación de los datos. Sin embargo, es oportuno aclarar que como parte importante para la definición de la metodología mencionada anteriormente, se utilizaron los resultados de la fase experimental en su etapa de pruebas preliminares, lo que permitió una mejor ubicación y una calibración más adecuada del equipo de medición, así como la verificación del funcionamiento del secador sin carga de madera.

3.3.6. Secador sin carga

Los resultados obtenidos a partir de las pruebas preliminares mostraron que la temperatura máxima alcanzada en la cámara de secado fue de

68°C, durante el período de mayor fuego en la cámara de combustión, desde luego, esta temperatura interior se suponía que iba a ser menor al momento de operar el secador con carga de madera, debido al efecto directo de la humedad de la misma llegando a alcanzar 62°C.

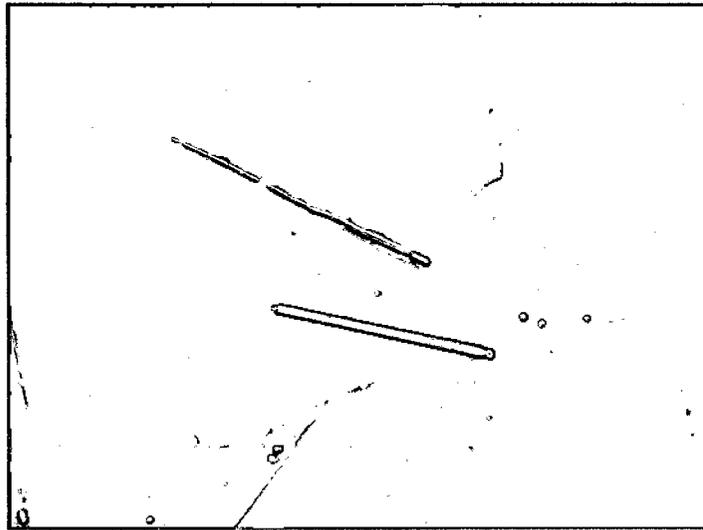


Figura 10. Medición de la temperatura en el secador sin carga.

3.3.7. Pruebas definitivas

Se cargó el secador de madera en sentido longitudinal con 80 piezas de 1" x 4" x 7 pies dispuestas en 10 capas de 4 piezas cada una, dando un total de 250 pies-tabla (0,6 m³), utilizando el secador de madera al 40% de su capacidad. Las tablas se apilaron de manera que permitieron el paso del aire caliente que provenía del ducto de calefacción del aire. Cada prueba de secado se realizó en tres días, y se comprobó que las piezas de madera no presentaron defectos, verificando así la efectividad del secador que se utilizó.

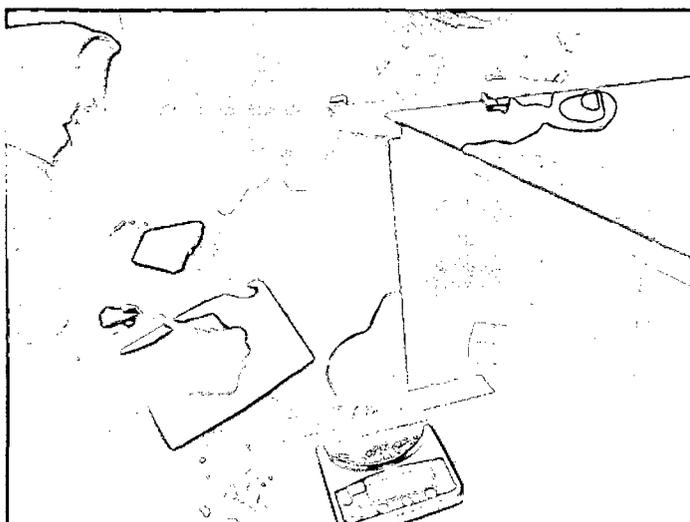


Figura 11. Pruebas definitivas en el secador construido.

3.3.8. Curvas de secado

Se registró cada hora el tiempo de secado y el peso perdido de las muestras de madera, con los cuales se hicieron gráficas de tiempo de secado versus peso perdido, en las que se pudo observar el comportamiento de eliminación de humedad, respecto del tiempo. Los resultados de la prueba 01 y la prueba 02 se muestran en las Figuras 12 y 13 respectivamente y los cálculos se muestran en el Anexo 8 y 9 en sus Tablas 13 y 14.

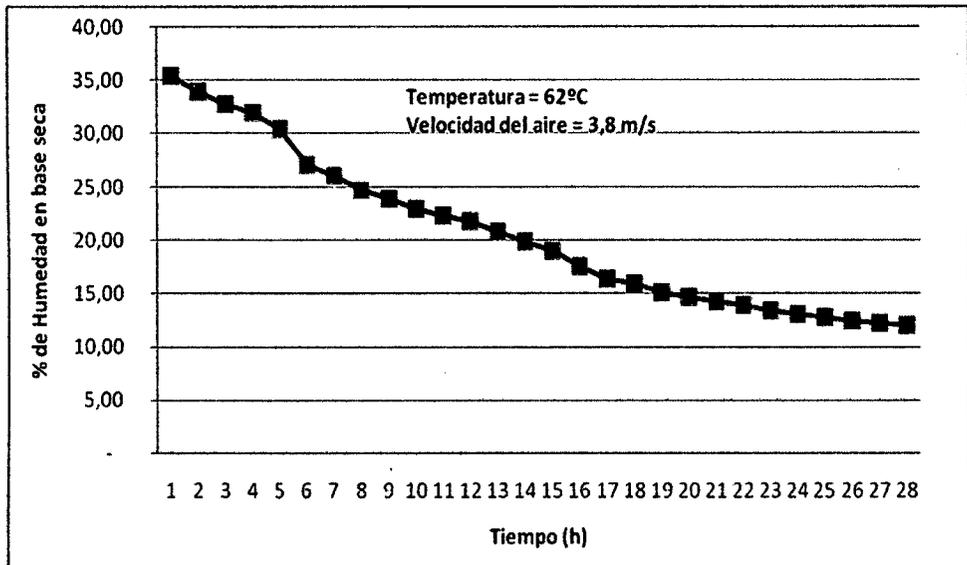


Figura 12. Prueba 1. Tiempo de secado vs % de humedad a una temperatura del aire de secado de 62°C y una velocidad de 3,8 m/s.

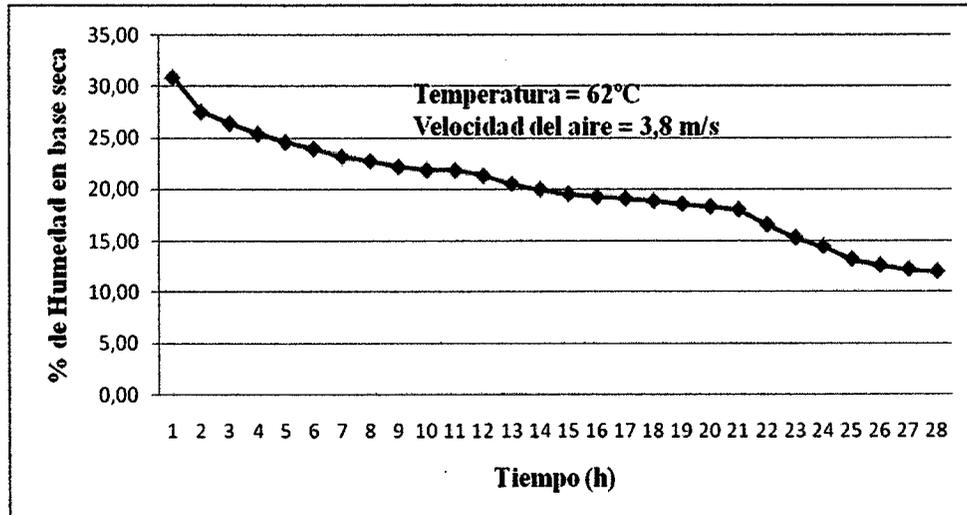


Figura 13. Prueba 2. Tiempo de secado vs % de humedad a una temperatura del aire de secado de 62°C y una velocidad de 3,8 m/s.

3.3.9. Costo de combustible para la cámara de combustión

Un lote de tablas de cedro colorado se seca en tres días, para lo que se requiere aproximadamente 6 cargas de leña (madera dura) con un costo de S/. 60,00. Se realizaron siete procesos de secado por mes y se gastaron 42 cargas de leña para secar un aproximado de 3500 pies de madera, invirtiendo aproximadamente S/. 420,00.

3.3.10. Costos de construcción y operación del secador

Se estimaron los costos de construcción y operación del secador, analizando el costo inicial de inversión y de mantenimiento.

Respecto de la inversión requerida para su construcción y operación se determinó que, para un secador de 1,54 m³ de capacidad con esta tecnología, no debe superar los S/. 1422,00, Si esto se compara con la inversión de un secador convencional que incluye cámara de secado y caldera, la inversión mínima debe situarse en torno de los US\$ 27000.

Tabla 4. Costos de construcción del secador.

Materiales	Unidad	Cant.	Costo unitario (S/.)	Costo total (S/.)
Plancha de fierro negro	Planchas	1	100,00	100,00
Planchas de fierro galvanizado	Planchas	4	85,00	340,00
Triplay	Planchas	4	25,00	100,00
Teknoport	Planchas	4	15,00	60,00
Ventilador tipo centrifuga	Unidad	1	250,00	250,00
Esmalte de color negro	Galón	1/4	10,00	10,00
Clavos	Kg	1	7,00	7,00
Ladrillos	Cientos	1/2	50,00	50,00
Brocha	Unidad	1	5,00	5,00
Madera para la construcción (ishpingo)	Pies	50	2,00	100,00
Muestra a secar (cedro)	Pies	100	3,00	300,00
Mano de obra	Peones	4	20,00	100,00
Costo de construcción				1 422,00

Fuente: Elaboración propia.

3.3.11. Costo por pie tablar de producto secado

Se estimaron los cálculos basados en un lote de producción de 520 pies tablares secos; lo que se consigue en siete lotes de secado por mes.

Tabla 5. Costo por pie tablar de cedro colorado seco.

Materiales	Precio por lote				Costo por mes (S/.)	Costo por año (S/.)
	Unidad	Cant.	Costo unit. (S/.)	Costo total (S/.)		
Combustible (leña)	Carga	6	10,00	60,00	420,00	5 040,00
Operador	Jornal	1	15,00	45,00	315,00	3 780,00
Total			25,00	105,00	735,00	8 820,00

Fuente: Elaboración propia.

De esta tabla de puede decir que para secar 520 pies tablares de cedro colorado se invertirá S/. 105,00. Haciendo un costo de S/. 0,20 por pie tablar.

4. DISCUSIÓN

El diseño del secador de madera debe permitir la extracción de humedad de la madera mediante circulación de aire caliente por el interior de la cámara de secado. Para lograr este propósito fue necesario seleccionar los materiales de construcción basándose en la conductividad térmica baja para reducir la pérdida de la energía suministrada, en la disponibilidad de esos materiales y en sus costos.

Donoso y Helguero (2001) señala que el ahorro que se consigue con el uso de combustible residual (aserrín), puede aceptarse como una ventaja competitiva para el secado de la madera. Esto se logró comprobar con el presente trabajo de investigación, ya que se usó como combustible los trozos pequeños de maderas residuales y el aserrín del taller de carpintería J & M Hermanos.

Martínez (1997) manifiesta que para secar la madera de pino con una humedad inicial de 80%, se empleó un tiempo promedio de 15 días para llevarla a una humedad final cercana al 10%; señala que la temperatura en el interior de la cámara de secado depende en gran medida de las condiciones ambientales, pero para fines prácticos se puede decir que se mantuvo entre 15 y 20°C por encima de la temperatura ambiente. Mediante las pruebas (prueba 01 y 02) de funcionamiento del secador diseñado y construido en el presente trabajo de investigación, se registró el tiempo de secado cada hora y el peso de las muestras de madera, con los cuales se hicieron gráficas de tiempo de secado versus peso perdido, en las que se pudo observar el comportamiento de eliminación de humedad, respecto del tiempo. Los resultados de las pruebas 01 y 02 se muestran en las Figuras 12 y 13, respectivamente. En dichas figuras se puede apreciar que a las 26 horas de secado ya

tenemos una humedad final de 12%, trabajando con una temperatura del aire de 62°C y una velocidad del aire de 3,8 m/s.

Salinas y cols (1997) manifiesta que en términos generales, las curvas de secado del pino radiata, simuladas a través del modelo fenomenológico, se ajustan satisfactoriamente para maderas de 27 y 46 (mm) de espesor, bajo programas de secado por alta temperatura de hasta 70 a 120°C y una velocidad del aire de hasta 7 m/s. En dichos coeficientes se evidencia una compleja relación entre los parámetros de secado, particularmente sensible a las interrelaciones con la velocidad del aire pero no tanto con la temperatura de secado. Se realizaron pruebas en el secador de bandejas de laboratorio para determinar la temperatura y la velocidad del aire de secado a los cuales la madera seca no presente defectos, siendo los siguientes valores: temperatura del aire de 62°C y velocidad del aire de 3,8 m/s, para secar tablas de cedro colorado de 1"x4"x1' de largo; por lo que se empleó estos resultados experimentales obtenidos para secar tablas de cedro colorado de 1"x4"x7' de largo en el secador experimental diseñado y construido. Se comprobó en este trabajo de investigación que a mayor temperatura se debe usar mayor velocidad del aire de secado para no afectar la calidad de la madera seca.

Según Donoso y Helguero (2001), la longitud de la llama es importante y esta depende de la velocidad de combustión, mientras mayor es la velocidad menor será la longitud de la llama. La velocidad de la combustión depende a su vez del tamaño del combustible, y de la rapidez de la reacción. A menor tamaño del combustible mayor será la velocidad de combustión. A menor dureza del combustible, mayor será la velocidad de combustión. Esto se pudo comprobar en el presente trabajo de investigación, ya que a medida que la leña es

de una madera más dura la velocidad de combustión es más lenta que la de la leña de maderas más blandas. Las dimensiones de la cámara de combustión se fijaron de manera que los humos tengan una velocidad tal, que permita la combustión completa de la leña al salir de la misma.

Solís y cols. (2003), construyeron un secador solar para secar tablas de guanacaste (*Enterolobium cyclocarpum*), los resultados obtenidos a partir de las pruebas preliminares les mostraron que la temperatura máxima alcanzada en la placa de absorción de calor (colector) fue de 110°C durante el periodo de mayor insolación; de igual modo, la temperatura máxima en el interior de la cámara de secado fue de 82°C pero, desde luego, esta temperatura interior se suponía que iba a ser menor al momento de operar el secador con carga de madera, debido al efecto directo de la humedad de la misma. En el presente trabajo de investigación ocurrió algo similar ya que en las pruebas preliminares mostraron que la temperatura máxima alcanzada en la cámara de secado fue de 68°C sin carga, durante el periodo de mayor fuego en la cámara de combustión, llegando a alcanzar 62°C al operar el secador con carga de madera de cedro colorado.

5. CONCLUSIONES

- 5.1. El secado de madera usando leña como fuente de energía térmica, es una alternativa atractiva y viable para secar cedro colorado (*Cedrela odorata* L.) lo que permitirá disponer en corto tiempo de madera lista para ser trabajada en la industria del mueble que presenta consumos mensuales de madera inferiores a 50 m³.
- 5.2. El desarrollo del secador de madera que usa exclusivamente leña, como fuente de calefacción del ducto de sección rectangular donde se calentará el aire necesario para el secado, permitirá que talleres de carpintería pequeños o medianos dispongan de madera seca que se ajuste a sus necesidades.
- 5.3. Las condiciones de trabajo de temperatura y velocidad del aire de secado que se emplearon en el secador diseñado y construido en el presente trabajo de investigación, se determinaron en el secador de bandejas del Laboratorio de Ingeniería de la UNAT-A, siendo el objetivo obtener madera seca sin deformaciones. Las condiciones más adecuadas fueron: aire a 65°C y velocidad de 4 m/s.
- 5.4. Se ha diseñado y construido un secador de 3,60 m de largo por 0,85 m de ancho, para secar 80 tablas de cedro colorado de 1"x4"x7' de largo, por carga, sin que presenten deformaciones; en un tiempo de 26 horas, trabajando con aire a una temperatura de 62°C y una velocidad de 3,8 m/s. El costo de construcción de este secador fue de S/. 1422,00.

6. RECOMENDACIONES

- 6.1.** Mejorar el diseño del secador de madera automatizando tanto el suministro del combustible como el control de la temperatura y la cantidad de madera a secar, que puede direccionarse como otro trabajo de investigación que mejore el actual diseño.
- 6.2.** Realizar pruebas de secado en este secador, con maderas comerciales de diferentes tipos para determinar su rendimiento.
- 6.3.** Evaluar la funcionalidad del secador si se le instala bandejas de malla metálica en un soporte adecuado, para secar hojuelas de productos alimenticios con la finalidad de producir harina.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 7.1. Aduanas. 2002. Base estadística de exportaciones e importaciones. Superintendencia Nacional de Administración Tributaria, Lima, Perú.
- 7.2. Atencia, M. 2000. Características dendrológicas de la madera y su influencia en sus características físicas y mecánicas. Universidad Nacional del Noreste Argentina.
- 7.3. Carvajal B, M Manjarrez. 1999. Registro del Cedro. Esc. Prim. Lic. Miguel Alemán.
- 7.4. Donoso C y M Helguero. 2001. Diseño de un caldero Pirotubular para el secado de madera usando aserrín como combustible. (Tesis, Facultad de Ingeniería Mecánica, Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- 7.5. Infor 1999. Secado artificial de madera aserrada en la Región del Bío Bío. Informe técnico N° 145. Concepción. Chile.
- 7.6. Martínez E. P Cueto. 1997. Diseño y ensayo de un secador solar para madera. Departamento de Productos Forestales y Conservación de Bosques. Instituto de Ecología. México.
- 7.7. MINAG. 2005. La baja productividad y el uso de los recursos forestales.
- 7.8. Perry J. y Chilton C. 1982. Manual del Ingeniero Químico. Editorial McGraw-Hill. 2^{da}. Edición. Bogotá.
- 7.9. Saavedra F. 1998. Manual de secado de madera. Asociación de Investigación. Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho (AITIM).

- 7.10.** Salinas C. R Ananías. P Ruminot. 1997. Maderas. Ciencia y tecnología, modelación fenomenológica de las curvas de secado por alta temperatura de pino radiata. Universidad del Bío – Bío. Chile.
- 7.11.** Sánchez R. 2003. Desarrollo de un secador a gas para maderas de baja permeabilidad y pequeñas producciones mensuales. Departamento Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería Universidad del Bío-Bío. Concepción. Chile
- 7.12.** Solís R, A Miguel, C Cardeña, I González. 2003. Diseño y operación de una estufa solar para secar madera. Escuela de Ingenieros en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.

8. ANEXOS

ANEXO 01:

CÁLCULO DE LA POTENCIA Y ROTOR DEL VENTILADOR PARA EL SECADOR DE MADERA

I. Potencia del ventilador del secador de madera (P)

Para la determinación de la potencia del motor del ventilador que será empleado en el suministro de aire caliente para la cámara de secado, se aplicará la siguiente fórmula:

$$P_{teorica} = H_B \times \rho \times g \times Q_T$$

Donde:

H_B = Altura dinámica (carga de trabajo del ventilador)

ρ = Densidad del aire

g = coeficiente de gravedad

Q_T = Caudal total de circulación del aire

Considerando que en las operaciones existen rangos de eficiencia, se determinará por tanto, la potencia real, considerando lo siguiente:

$$P_{real} = \frac{P_{teorica}}{(\%)}$$

Donde: % = Eficiencia. Para nuestro caso la eficiencia será del 75% (asumido por referencias bibliográficas)

1. Caudal total de circulación (Q_T)

Para la determinación del caudal total de circulación, se considerará el caudal obtenido por la siguiente fórmula.

$$Q = A \times V_2$$

Donde:

A: Sección interna de la tubería = (0,4 m x 0,3 m = 0,12 m²)

V₂: Velocidad de flujo del aire = 4,5 m/s (por diseño 12,5% más)

$$Q_T = (4,5 \text{ m/s}) \times (0,12 \text{ m}^2)$$

$$Q_T = 0,54 \text{ m}^3/\text{s}$$

2. Altura dinámica o carga de trabajo del ventilador (H_B)

Para la determinación de la altura dinámica se empleará la fórmula siguiente:

$$H_B = h_{f_{total}} + \left[\frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \right] - \left[\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 \right]$$

Donde:

$h_{f_{total}}$: Pérdida de carga

P₂: Presión a la salida del ventilador: se considera cero (0 psi)) para nuestro caso.

V₂: Velocidad de flujo de aire a la salida del ventilador = 4,5 m/s.

Z₂: Altura de la tubería respecto al ventilador: se considera cero (0 m) para nuestro caso.

P₁: Presión en el nivel de toma de aire: se considera cero (0 psi) para nuestro caso.

V_1 : Velocidad inicial de flujo de aire = 0,00 m/s.

Z_1 : Altura toma de aire en la tubería respecto al ventilador = (0 m)

ρ : Densidad del aire = 0,968 kg/m³ (a $T= 80^\circ\text{C}$)

g : Coeficiente de gravedad = 9,8 m/s²

Para el cálculo correspondiente, se requiere determinar previamente, la pérdida de carga en el recorrido del aire por la tubería (h_{total}).

2.1.1. Cálculo de la pérdida de carga en el recorrido del aire por la tubería (h_{total})

Para la determinación de la pérdida de carga en el recorrido del aire por la tubería se empleará la siguiente fórmula:

$$h_{f_{TOTAL}} = \frac{(f \cdot L_{eq} \cdot V_2^2)}{2Dg}$$

Donde:

f : Coeficiente de fricción

L_{eq} : Longitud = 1,2 m

D : Diámetro equivalente del interior de la tubería = 0,38 m

V_2 : Velocidad de flujo de agua del rociador = 4,5 m/s.

G : Coeficiente de gravedad = 9,8 m/s²

Para conocer la pérdida de carga total, se requerirá determinar previamente, tanto el coeficiente de fricción de la tubería, que son datos aún sin determinar.

Nota: Se utiliza diámetro equivalente por ser una tubería de sección rectangular la utilizada en el proyecto.

2.1.2. Cálculo del coeficiente de fricción

El coeficiente de fricción (f) se determinará a partir de nomograma “Factor de fricción en función del número de Reynolds con Rugosidad Relativa como parámetro”, para lo cual se necesita conocer previamente, tanto el número de Reynolds (N_{RE}), como el coeficientes de fricción (f) de la tubería.

2.1.2.1. Cálculo del número de Reynolds [N_{RE}]

Para el cálculo del número de Reynolds se empleará la siguiente fórmula:

$$N_{RE} = \frac{D \cdot V_2 \cdot \rho}{\mu}$$

De donde:

D : Diámetro equivalente del interior de la tubería =
0,38m

V_2 : Velocidad del aire = 4,5 m/s

ρ : Densidad del aire = 0,968 kg/m³ (a T°= 80°C)

μ : Viscosidad = 2,1x10⁻⁵ kg/m.s

$$N_{RE} = \frac{0,38 \text{ m} \times 4,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0,968 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{2,1 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}}$$

$$N_{RE} = 78822,86 = \text{TURBULENTO}$$

2.1.2.2. Cálculo de la coeficientes de fricción (f) por ser de carácter turbulento

Con los datos obtenidos para el NRE , se emplea la siguiente fórmula para los coeficientes de fricción, observando que:

$$f = 0,015 + 1,26(NRE)^{-0,3} + 0,95(NRE)^{-0,12}$$

$$f = 0,015 + 1,26(78822,86)^{-0,3} + 0,95(78822,86)^{-0,12}$$

$$f = 0,3033$$

Con todos estos datos se determinará la pérdida de carga total ($h_{f\text{total}}$)

$$h_{f\text{total}} = \frac{(f \cdot L_{eq} \cdot V_2^2)}{2Dg}$$

$$h_{f\text{total}} = \frac{0,3033 \times 1,2 \text{ m} \times (4,5 \text{ m/s})^2}{2 \times 0,38 \text{ m} \times 9,8 \text{ m/s}^2}$$

$$h_{f\text{total}} = 0,9895529 \text{ m}$$

Con estos datos ya calculados, se determinará la altura dinámica o carga de trabajo del ventilador (H_B), a partir de la siguiente fórmula, en la que se han excluido las variables con valor cero y se ha acondicionado las expresiones para un mejor entendimiento.

$$H_B = h_{f\text{total}} + \frac{V_2^2}{2 \times g}$$

Reemplazando los siguientes datos:

$$h_{f\text{total}} = 0,9895529 \text{ m}$$

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$V_2 = 4,5 \text{ m/s}$$

$$H_B = 0,9895529 \text{ m} + \frac{(4,5 \text{ m})^2}{2 \times 9,8 \text{ m}}$$

$$H_B = 2,022716165 \text{ m}$$

3. Cálculo de la potencia del ventilador (P)

$$P = H_B \cdot \rho \cdot g \cdot Q$$

$$P = 2,022716165 \text{ m} \times \frac{0,968 \text{ kg}}{\text{m}^3} \times 9,8 \frac{\text{m}}{\text{seg}^2} \times 0,54 \frac{\text{m}^3}{\text{seg}}$$

$$P = 10,3616791 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{seg}^3$$

Potencia teórica del ventilador

Considerando la equivalencia de 1 HP = 745 W

$$HP = \frac{10,3616791}{745}$$

$$HP = 0,013908294$$

Eficiencia del ventilador = 75,00 %

Potencia real del ventilador:

$$HP_{real} = \frac{0,013908294}{0,75}$$

$$HP_{real} = 0,02455$$

Por lo tanto la potencia teórica del motor del ventilador sería el inmediato superior (0,25 HP) pero como siempre se da un margen de error entonces se tendrá que escoger un motor mas grande, es decir un ventilador con un motor de 0,5 HP de potencia.

II. Dimensionamiento del rotor del ventilador

De acuerdo al principio altura dinámica o carga de trabajo se tiene la siguiente

fórmula:

$$\varphi = \frac{H}{2V}$$

Donde:

$$V = \frac{\pi \times D \times N}{60}$$

H: altura dinámica o carga de trabajo del ventilador (m)

D: diámetro del rotor (m)

V: velocidad (m/s)

N: revoluciones por minuto del rotor (rpm)

Para nuestro caso:

$$\varphi = 1$$

$$N = 1750 \text{ rpm}$$

$$H = 2,022716165 \text{ m}$$

Entonces despejando D, de las formulas anteriores tenemos:

$$D = \frac{60 \times g \times H}{\pi \times N \times \Psi}$$

$$D = \frac{60 \times 9,8 \times 2,022716165}{3,1416 \times 1750}$$

$$D = 0,216333785 \text{ m}$$

$$D = 0,22 \text{ m}$$

ANEXO 02

Determinación de las curvas de secado de datos en las pruebas definitivas del secador construido

Tabla 6. Porcentaje de humedad perdida en base seca como en base húmeda de la Muestras 1.

Días	Hora	Peso Muestra (g)	Temp. (°C)	Velocidad del aire (m/s)	Diferencia de peso (g)	%Humedad en Base Húmeda	%Humedad en Base Seca
1	1	2690,00	60	3,00	0,00	0,00	39,37
	2	2485,00			205,00	8,25	31,12
	3	2427,00			263,00	10,84	28,53
	4	2392,00			298,00	12,46	26,91
	5	2364,00			326,00	13,79	25,58
	6	2342,00			348,00	14,86	24,51
	7	2324,00			366,00	15,75	23,62
	8	2307,00			383,00	16,60	22,77
2	9	2297,00	60	3,00	393,00	17,11	22,26
	10	2270,00			420,00	18,50	20,87
	11	2245,00			445,00	19,82	19,55
	12	2225,00			465,00	20,90	18,47
	13	2208,00			482,00	21,83	17,54
	14	2194,00			496,00	22,61	16,76
	15	2182,00			508,00	23,28	16,09
	16	2171,00			519,00	23,91	15,46
	17	2161,00			529,00	24,48	14,89
	18	2150,00			540,00	25,12	14,25

	19	2140,00			550,00	25,70	13,67
	20	2136,00			554,00	25,94	13,43
3	21	2130,00	60	3,00	560,00	26,29	13,08
	22	2126,00			564,00	26,53	12,84
	23	2120,00			570,00	26,89	12,48
	24	2116,00			574,00	27,13	12,24
	25	2114,00			576,00	27,25	12,12
	26	2112,00			578,00	27,37	12,00
	27	2110,00			580,00	27,49	11,88
	28	2109,00			581,00	27,55	11,82

Fuente. Elaboración propia.

Muestras 1:

%H : 39,37%

%MS : 60,63%

Peso

Muestra: 60,66

Fórmulas:

%Humedad en base Húmeda =

$\frac{\text{Diferencia de peso}}{\text{Peso de la muestra}}$

%Humedad en base seca =

$\frac{\% \text{Humedad de la muestra 1}}{\% \text{Humedad en base Húmeda}}$

ANEXO 03

Tabla 7. Porcentaje de humedad perdida en base seca como en base húmeda de la Muestra 2.

Días	Hora	Peso Muestra (g)	Temp. (°C)	Velocidad del aire (m/s)	Diferencia de peso (g)	%Humedad en Base Húmeda	%Humedad en Base Seca
1	1	2536,00	70	4,20	0,00	0,00	35,46
	2	2430,00			106,00	4,36	31,10
	3	2388,00			148,00	6,20	29,26
	4	2327,00			209,00	8,98	26,48
	5	2287,00			249,00	10,89	24,57
	6	2254,00			282,00	12,51	22,95
	7	2230,00			306,00	13,72	21,74
	8	2229,00			307,00	13,77	21,69
2	9	2211,00	70	4,20	325,00	14,70	20,76
	10	2190,00			346,00	15,80	19,66
	11	2176,00			360,00	16,54	18,92
	12	2164,00			372,00	17,19	18,27
	13	2153,00			383,00	17,79	17,67
	14	2143,00			393,00	18,34	17,12
	15	2135,00			401,00	18,78	16,68
	16	2129,00			407,00	19,12	16,34
	17	2121,00			415,00	19,57	15,89
	18	2114,00			422,00	19,96	15,50
	19	2107,00			429,00	20,36	15,10
	20	2099,00			437,00	20,82	14,64

3	21	2091,00	70	4,20	445,00	21,28	14,18
	22	2083,00			453,00	21,75	13,71
	23	2075,00			461,00	22,22	13,24
	24	2067,00			469,00	22,69	12,77
	25	2054,00			482,00	23,47	11,99
	26	2050,00			486,00	23,71	11,75
	27	2047,00			489,00	23,89	11,57
	28	2041,00			495,00	24,25	11,21

Fuente. Elaboración propia.

Muestras 2

%H : 35,46%
 %MS : 64,54%
 Peso
 Muestra: 8,220

Fórmulas:

%Humedad en base Húmeda = $\frac{\text{Diferencia de peso}}{\text{Peso de la muestra}}$

%Humedad en base seca = $\frac{\% \text{Humedad de la muestra 2}}{\% \text{Humedad en base Húmeda}}$

ANEXO 4

Tabla 8. Porcentaje de humedad perdida en base seca como en base húmeda de la muestra 3.

Días	Hora	Peso Muestra (g)	Temp. (°C)	Velocidad del aire (m/s)	Diferencia de peso (g)	%Humedad en Base Húmeda	%Humedad en Base Seca
1	9:30	3081,00	61	3,80	0,00	0,00	30,90
	10:30	2981,00			100,00	3,35	27,55
	11:30	2949,00			132,00	4,48	26,42
	12:30	2920,00			161,00	5,51	25,39
	1:30	2898,00			183,00	6,31	24,59
	2:30	2881,00			200,00	6,94	23,96
	3:30	2861,00			220,00	7,69	23,21
	4:30	2849,00			232,00	8,14	22,76
	5:30	2834,00			247,00	8,72	22,18
	6:30	2826,00			255,00	9,02	21,88
2	8:30	2825,00	61	3,80	256,00	9,06	21,84
	9:30	2811,00			270,00	9,61	21,29
	10:30	2791,00			290,00	10,39	20,51
	11:30	2778,00			303,00	10,91	19,99
	12:30	2767,00			314,00	11,35	19,55
	1:30	2760,00			321,00	11,63	19,27
	2:30	2756,00			325,00	11,79	19,11
	3:30	2750,00			331,00	12,04	18,86
	4:30	2743,00			338,00	12,32	18,58
	5:30	2737,00			344,00	12,57	18,33

	8:30	2730,00			351,00	12,86	18,04
3	9:30	2695,00	61	3,80	386,00	14,32	16,58
	10:30	2666,00			415,00	15,57	15,33
	11:30	2646,00			435,00	16,44	14,46
	12:30	2618,00			463,00	17,69	13,21
	1:30	2604,00			477,00	18,32	12,58
	2:30	2596,00			485,00	18,68	12,22
	3:30	2591,00			490,00	18,91	11,99

Fuente. Elaboración propia.

Muestra 3

%H : 30,90%

%MS : 69,10%

Peso Muestra: 3081,00g

Fórmulas:

%Humedad en base Húmeda = $\frac{\text{Diferencia de peso}}{\text{Peso de la muestra}}$

%Humedad en base seca = $\frac{\%Humedad \text{ de la muestra } 3}{\%Humedad \text{ en base Húmeda}}$

ANEXO 05

Tabla 9. Porcentaje de humedad perdida en base seca como en base húmeda de la PRUEBA 01.

Días	Hora	Peso Muestra (g)	Temp. (°C)	Velocidad del aire (m/s)	Diferencia de peso (g)	%Humedad en Base Húmeda	%Humedad en Base Seca
1	1	2801,00	62	3,80	0,00	0,00	35,46
	2	2760,00			41,00	1,49	33,97
	3	2728,00			73,00	2,68	32,78
	4	2707,00			94,00	3,47	31,99
	5	2667,00			134,00	5,02	30,44
	6	2584,00			217,00	8,40	27,06
	7	2560,00			241,00	9,41	26,05
	8	2529,00			272,00	10,76	24,70
	9	2511,00			290,00	11,55	23,91
2	10	2490,00	62	3,80	311,00	12,49	22,97
	11	2476,00			325,00	13,13	22,33
	12	2464,00			337,00	13,68	21,78
	13	2443,00			358,00	14,65	20,81
	14	2423,00			378,00	15,60	19,86
	15	2405,00			396,00	16,47	18,99
	16	2376,00			425,00	17,89	17,57
	17	2352,00			449,00	19,09	16,37
	18	2344,00			457,00	19,50	15,96
	19	2327,00			474,00	20,37	15,09
	20	2319,00			482,00	20,78	14,68
	21	2311,00	62,00	3,80	490,00	21,20	14,26

3	22	2305,00		496,00	21,52	13,94
	23	2295,00		506,00	22,05	13,41
	24	2289,00		512,00	22,37	13,09
	25	2283,00		518,00	22,69	12,77
	26	2277,00		524,00	23,01	12,45
	27	2273,00		528,00	23,23	12,23
	28	2269,00		532,00	23,45	12,01

Fuente. Elaboración propia.

PRUEBA 01:

%H : 35,46%

%MS : 64,54%

Peso Muestra: 2801,00 g

Fórmulas:

%Humedad en base Húmeda =

$\frac{\text{Diferencia de peso}}{\text{Peso de la muestra}}$

%Humedad en base seca =

$\frac{\text{\%Humedad de la prueba 01}}{\text{\%Humedad en base Húmeda}}$

ANEXO 06

Tabla 10. Porcentaje de humedad perdida en base seca como en base húmeda de la PRUEBA 02.

Días	Hora	Peso Muestra (g)	Temp. (°C)	Velocidad del aire (m/s)	Diferencia de peso (g)	%Humedad en Base Húmeda	%Humedad en Base Seca
1	1	3081,00	61	3,80	0,00	0,00	30,90
	2	2981,00			100,00	3,35	27,55
	3	2949,00			132,00	4,48	26,42
	4	2920,00			161,00	5,51	25,39
	5	2898,00			183,00	6,31	24,59
	6	2881,00			200,00	6,94	23,96
	7	2861,00			220,00	7,69	23,21
	8	2849,00			232,00	8,14	22,76
	9	2834,00			247,00	8,72	22,18
	10	2826,00			255,00	9,02	21,88
2	11	2825,00	61	3,80	256,00	9,06	21,84
	12	2811,00			270,00	9,61	21,29
	13	2791,00			290,00	10,39	20,51
	14	2778,00			303,00	10,91	19,99
	15	2767,00			314,00	11,35	19,55
	16	2760,00			321,00	11,63	19,27
	17	2756,00			325,00	11,79	19,11
	18	2750,00			331,00	12,04	18,86
	19	2743,00			338,00	12,32	18,58
	20	2737,00			344,00	12,57	18,33

	21	2730,00			351,00	12,86	18,04
3	22	2695,00	61	3,80	386,00	14,32	16,58
	23	2666,00			415,00	15,57	15,33
	24	2646,00			435,00	16,44	14,46
	25	2618,00			463,00	17,69	13,21
	26	2604,00			477,00	18,32	12,58
	27	2596,00			485,00	18,68	12,22
	28	2591,00			490,00	18,91	11,99

Fuente. Elaboración propia.

PRUEBA 02

%H : 30,90%

%MS : 69,10%

Peso Muestra:
3081,00g

Fórmulas:

%Humedad en base Húmeda =

$\frac{\text{Diferencia de peso}}{\text{Peso de la muestra}}$

%Humedad en base seca =

$\frac{\% \text{Humedad de la prueba 02}}{\% \text{Humedad en base Húmeda}}$

ANEXO 7

SECUENCIA FOTOGRÁFICA DEL TRABAJO EXPERIMENTAL EN EL
LABORATORIO DE INGENIERÍA DE LA UNAT-A

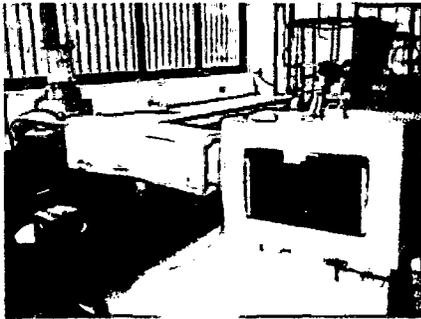


Figura 14. Usando el secador de bandejas para el secado de cedro colorado.

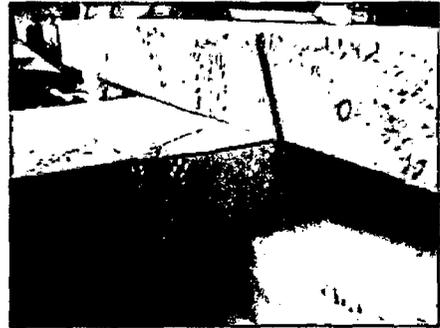


Figura 15. Cedro colorado seco de la Muestra 1.



Figura 16. Cedro colorado seco de la Muestra 2.



Figura 17. Cedro colorado seco de la Muestra 3.

ANEXO 8

SECUENCIA FOTOGRÁFICA DE LA CONSTRUCCIÓN DEL SECADOR

- **Elaboración del tubo de sección rectangular y colocación en la cámara de combustión**

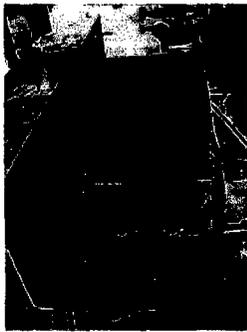


Figura 18. Elaboración del tubo rectangular.



Figura 19. Colocación del tubo rectangular en la cámara de combustión 1ª prueba.



Figura 20. Colocación del tubo rectangular en la cámara de combustión 2ª prueba.

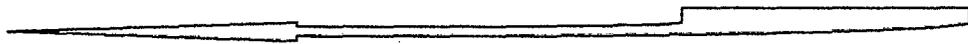


Figura 21. Ventilador con su adaptación para colocar en el tubo rectangular.

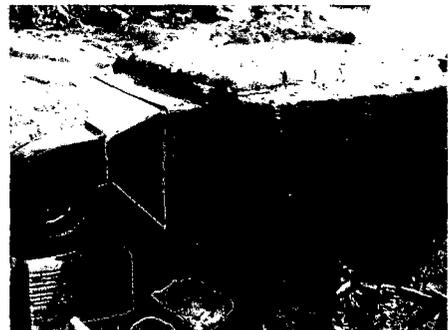


Figura 22. Cámara de combustión con el tubo rectangular y el ventilador.

- **Elaboración de la cámara de secado**

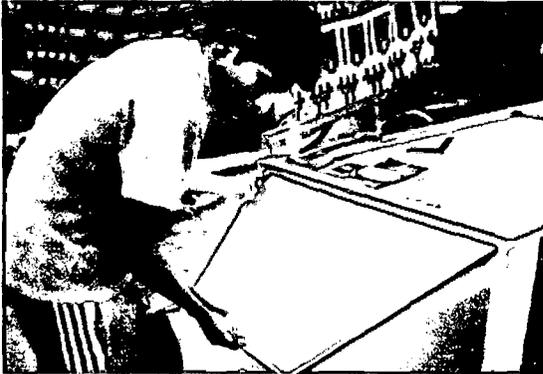


Figura 23. Colocando la plancha galvanizada.



Figura 24. Colocando el aislante (teknoport).

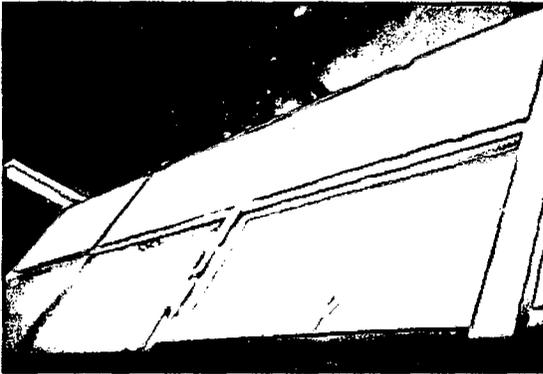


Figura 25. Colocando la madera y el aislante (teknoport).

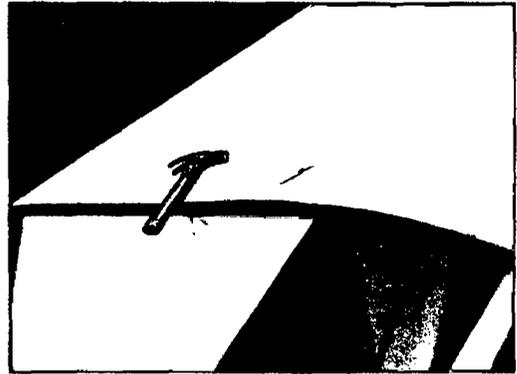


Figura 26. Colocando el triplay para la protección y mejor acabado.

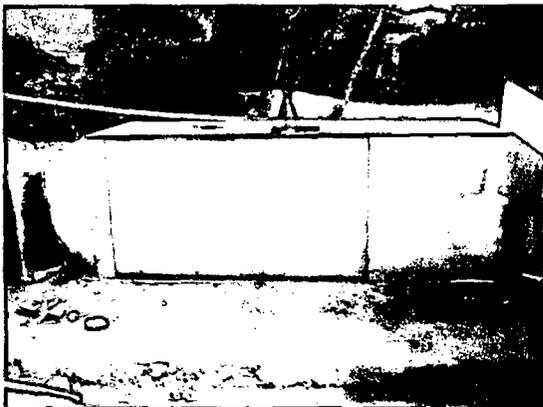


Figura 27. Cámara de secado.

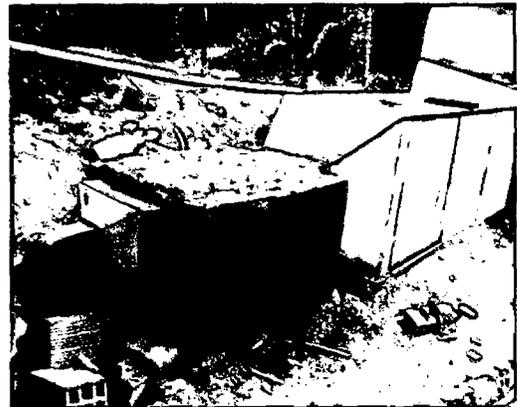


Figura 28. Secador de madera culminado.