

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Forestal



Evaluación de eficiencia, propiedades físicas y costos operativos de hornos para secar madera de pino (*Pinus spp.*), alimentados con leña y diesel.

Carlos Roberto Pérez Alvarado

Guatemala

2005

Evaluación de eficiencia, propiedades físicas y costos operativos de hornos para secar madera de pino (*Pinus* spp.), alimentados con leña y diesel.

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Forestal



Evaluación de eficiencia, propiedades físicas y costos operativos de hornos para secar madera de pino (*Pinus spp.*), alimentados con leña y diesel.

Trabajo de investigación presentado por

Carlos Roberto Pérez Alvarado

para optar al grado de Licenciado en Ingeniería Forestal

Guatemala

2005


ÍNDICE

| Contenido | Página |
|---------------------------|--------|
| LISTA DE CUADROS | IV |
| LISTA DE FIGURAS | V |
| RESUMEN | VII |
| I. INTRODUCCIÓN | 1 |
| II. ANTECEDENTES | 3 |
| III. OBJETIVOS | 15 |
| IV. JUSTIFICACIÓN | 19 |
| V. METODOLOGÍA | 22 |
| VI. RESULTADOS | 35 |
| VII. DISCUSIÓN | 71 |
| VIII. CONCLUSIONES | 80 |
| IX. RECOMENDACIONES..... | 83 |
| X. LITERATURA CITADA..... | 84 |
| XI. APÉNDICE | 86 |

Vo.Bo.:

(f) 
(Ing. Ramiro Pazos)

Tribunal Examinador

(f) 
(Ing. César Castañeda)

(f) 
(Ing. Ramiro Pazos)

(f) 
(Ing. José/Raúl Furlán)

Fecha de aprobación: Guatemala 30 de mayo del 2005

LISTA DE CUADROS

| Cuadro | Página |
|--|--------|
| 1. Programa de secado para evaluar la eficiencia de los hornos | 30 |
| 2. Costos fijos y variables para horno alimentado con leña | 32 |
| 3. Costos fijos y variables para horno alimentado con diesel | 34 |
| 4. Dimensiones de los cubos de 2*2 y 3*3 pulgadas verdes y secos | 44 |
| 5. Cambio dimensional de muestras durante el secado | 45 |
| 6. Porcentaje de humedad medido y real | 45 |
| 7. Contenido de humedad y peso seco de muestras en el horno-leña | 56 |
| 8. Contenido de humedad y peso seco de muestras en el horno- diesel | 57 |
| 9. Costos de insumos en horno-leña para secar un pie tablar | 62 |
| 10. Costos de insumos en horno-diesel para secar un pie tablar | 63 |
| 11. Cargas térmicas y de reconocimiento para secar 1m ³ de madera verde | 68 |
| 12. Eficiencia energética de hornos alimentados con leña y diesel | 68 |

LISTA DE FIGURAS

| Figura | Página |
|---|--------|
| 1. Diagrama de muestreo para diagnóstico de funcionamiento. | 25 |
| 2. Corte de muestras | 29 |
| 3. Medición de contenido de humedad | 30 |
| 4. Controladores de humedad relativa y temperatura | 36 |
| 5. Diagrama de fuente de calor de leña | 37 |
| 6. Diagrama de fuente de calor horno de diesel | 38 |
| 7. Diagrama de cámara de secado | 39 |
| 8. Interior de la cámara de secado | 40 |
| 9. Puerta con cierre hermético del horno | 40 |
| 10. Ventilador extractor de humedad | 41 |
| 11. Sensores de temperatura y humedad relativa dentro de cámara de secado | 41 |
| 12. Aspersor de humedad | 42 |
| 13. Bomba de diesel | 44 |
| 14. Correlación de humedad real y humedad marcada por el medidor | 46 |
| 15. Curvas de secado para hornos dependiendo de la ubicación de las piezas | 48 |
| 16. Humedad relativa vrs. humedad de la madera | 49 |
| 17. Pérdida de humedad en horno – leña | 50 |
| 18. Ascenso de temperatura promedio en horno – leña | 51 |
| 19. Temperatura de salida vrs. temperatura de la cámara de secado | 52 |
| 20. Temperatura del aire en el ambiente vrs. temperatura de aire calentado por la caldera | 53 |
| 21. Temperatura de salida de aire del horno - diesel | 54 |
| 22. Temperatura del horno- diesel | 55 |
| 23. Imagen de la rotulación y dimensiones de una muestra | 56 |
| 24. Impermeabilización de los costados de una muestra | 56 |

| | | |
|-----|--|----|
| 25. | Contenido de humedad de muestras puestas a secar en horno-leña | 58 |
| 26. | Contenido de humedad de muestras puestas a secar en horno- diesel | 59 |
| 27. | Distribución de humedad en lote de madera en horno-leña | 60 |
| 28. | Distribución de humedad en lote de madera en horno-diesel | 61 |
| 29. | Porcentaje de humedad relativa vrs. temperatura del horno | 64 |
| 30. | Porcentaje de humedad relativa vrs. temperatura del horno 2do experimento | 65 |
| 31. | Carga de leña | 67 |
| 32. | Demanda energética | 69 |

RESUMEN

El secado de madera se ha convertido en una necesidad para la elaboración de distintos productos por lo que se realizó una evaluación de eficiencia, propiedades físicas y costos operativos de hornos para secar madera de pino, existen dos métodos para el secado de madera: secado al aire y secado artificial. Para el secado al aire no se necesita ningún equipo adicional, simplemente se da una buena orientación a las perchas bajo un cobertizo al aire libre. Por otro lado, para el secado artificial es necesario un cuarto de secado aislado térmicamente, un sistema de ventilación dentro del cuarto y una fuente de calor que puede ser alimentado con diferentes combustibles como la leña y diesel.

En el estudio que se llevó a cabo se evaluó el funcionamiento de hornos alimentados con leña y diesel como fuente energética. Como fase inicial se estimaron las curvas de secado para cada horno, ya que se trabajará con dos hornos alimentados con leña y uno con diesel. Luego tomando en cuenta una serie de variables tales como dimensiones de piezas puestas a secar, contenido inicial de humedad de la madera, períodos requeridos para secado y condiciones como la oferta energética de cada horno, se implementó un programa de secado con el fin de llevar la madera a un 12 por ciento de contenido de humedad como máximo, y en base a las variables mencionadas anteriormente, reduzca el deterioro de la madera durante el proceso de secado y permita el uso eficiente de cada horno, con la consecuente reducción de costos de producción. Posteriormente se hizo un análisis comparativo de la eficiencia de los distintos hornos, basándose en el programa de secado implementado.

I. INTRODUCCIÓN

El sector forestal nacional se ha desarrollado en varios aspectos, conformando una industria creciente que requiere mejorar la calidad de sus productos y así poder competir en los diferentes mercados. Para ello es necesario que surjan nuevas alternativas viables económicamente y que proporcionen buenos resultados en términos de calidad.

El secado de madera se ha convertido en una necesidad para la elaboración de productos. Ya que al reducir el contenido de humedad dentro de la madera, se le brinda una serie de condiciones favorables para ser trabajada, tales como estabilidad dimensional, resistencia a pudrición, manchas y ataques de insectos; lo cual a su vez le proporciona un valor agregado.

Existen dos métodos para el secado de madera: secado al aire y secado artificial. Para el secado al aire no se necesita ningún equipo adicional, simplemente se da una buena orientación a las perchas bajo un cobertizo al aire libre. Por otro lado, para el secado artificial es necesario un cuarto de secado aislado térmicamente, un sistema de ventilación dentro del cuarto y una fuente de calor que puede ser alimentado con diferentes combustibles.

Un factor importante para el secado de madera, son las propiedades físicas de la madera puesta a secar. Principalmente la estructura celular que varía considerablemente entre especies, ya que esto influye en la velocidad de pérdida de humedad durante el proceso de secado.

En el estudio que se llevará a cabo se evaluará el funcionamiento de hornos alimentados con leña y diesel como fuente energética. Como fase inicial se estimarán las curvas de secado para cada horno, ya que se trabajará con dos hornos alimentados con leña y uno con diesel. Luego tomando en cuenta una

serie de variables tales como dimensiones de piezas puestas a secar, contenido inicial de humedad de la madera, períodos requeridos para secado y condiciones como la oferta energética de cada horno, se desea implementar un programa de secado con el fin de llevar la madera a un 12 por ciento de contenido de humedad como máximo, y en base a las variables mencionadas anteriormente, reduzca el deterioro de la madera durante el proceso de secado y permita el uso eficiente de cada horno, con la consecuente reducción de costos de producción. Posteriormente se hará un análisis comparativo de la eficiencia de los distintos hornos, basándose en el programa de secado implementado.

Como se mencionó anteriormente en este trabajo se realizará una evaluación de características técnicas y costos del funcionamiento de hornos secadores de madera de *Pinus spp.* que utilizan como combustible diesel y leña, en un aserradero ubicado en la Ciudad de Guatemala.

II. ANTECEDENTES

2.1 Proceso del secado de madera

La madera aserrada no secada aún se exporta en un porcentaje importante a los principales polos compradores, como Europa, Estados Unidos y Japón. Sin embargo, la situación está cambiando con el tiempo y la demanda se orienta crecientemente hacia madera seca, con un contenido de humedad de entre 8 y 12%. Las nuevas normas de la Comunidad Europea, por ejemplo, prevén la prohibición en un futuro próximo de la entrada de madera aserrada verde a los países asociados (Kretschmann, 1992).

Incluso, en el caso de la madera para *pallets* se anticipa que las exigencias de calidad llegarán a tal nivel que incluirán normas estrictas no sólo para sus dimensiones y resistencia mecánica sino también para su contenido de humedad. La idea es lograr un producto de larga duración y uso, reciclándolo a varios países antes de que sea convertido en un desecho (Kretschmann, 1996).

En cuanto a los productos más elaborados, como muebles, molduras, paneles en listones, puertas, etc., su procesamiento requiere ineludiblemente trabajar con madera secada artificialmente a un contenido de humedad final del 8%. En este caso, las normas son estrictas en los mercados internacionales y no existe ninguna posibilidad de desarrollar este tipo de productos sin contar con secadores apropiados (Vignote, 1981).

El secado artificial es todavía una actividad de escasa relevancia dentro del sector industrial maderero. La predominancia de pequeños y medianos aserraderos, el desarrollo restringido de los procesos de elaboración de productos madereros y la limitación del recurso forestal y de sus perspectivas hasta fines de la década pasada son los principales factores que explican esta situación. Indudablemente, las expectativas suscitadas por el actual proceso de

forestación cambian el panorama presente y futuro con respecto a la actividad del secado en el país. Si la exportación representa el destino probable de una parte significativa de la producción maderera futura, bajo una u otra forma, será indispensable incorporar un número importante de secadores y dominar la tecnología del secado (Rasmussen, 1960).

Una buena parte de la degradación y desperdicio de madera que se produce en el proceso de secado se debe a menudo al apilamiento inadecuado de las tablas aserradas. Por lo tanto, es esencial respetar ciertas reglas para apilar o 'encastillar' la madera. Es de la mayor importancia utilizar la técnica del encastillado plano, en la que las tablas se apilan en bloques formando ángulos rectos, con separadores entre las camadas o corridas de madera. Se recomienda un ancho de 1,2 m para los paquetes y un espesor de 15 mm para los separadores, con una distancia de 0,6 m entre cada uno. Conviene engrasar los extremos de las tablas para evitar las rajaduras y utilizar madera secada y cepillada para los soportes del paquete. Los paquetes deberían ser protegidos del sol, viento y lluvia antes de entrar a la cámara de vaporizado (Fiske, 1999).

A menudo, los secadores modernos son de doble vía permitiendo que dos pilas de madera estén colocadas al lado la una de la otra en la cámara. Esta técnica hace más importante aún la adopción de altos estándares de encastillado para poder asegurar la libre circulación del aire en la cámara (Fiske, 1999).

Los siguientes puntos son clave para el posterior éxito del secado. Aunque sencillos, muchas veces no están incorporados en la práctica del secado observada en empresas madereras del país:

- Apilar únicamente aquellas tablas cuya calidad permitirá obtener un producto secado vendible.
- Para la mayor parte de las especies, encastillar solamente tablas que han sido aserradas en sus cuatro cantos; las tensiones de crecimiento son generalmente

demasiado severas para que tablas sin cantear se sequen sin rajar o distorsionar.

- Utilizar un marco o estructura para el encastillado que tenga las dimensiones exactas del paquete.
- Preparar los paquetes sobre una base firme con soportes que aseguren que la primera camada de tablas se mantenga perfectamente horizontal.
- Cuidar que la primera y última camada esté compuesta de tablas del largo total del paquete.
- Después de colocar cada camada de tablas, asegurar que los separadores estén alineados verticalmente con respecto a los soportes en la base del paquete.
- Alinear verticalmente las tablas que se colocan en los bordes del paquete (adelante y atrás); si posible, utilizar tablas de igual largo que el paquete para este fin.
- Alinear verticalmente el paquete en sus dos extremos laterales; para ello, colocar las tablas de largo inferior en cada extremo alternándolas.
- Apilar únicamente tablas de una especie y un espesor por paquete y, de preferencia, de un solo ancho.
- Utilizar madera de espesor uniforme para los separadores y soportes, de preferencia secada y cepillada.
- Aplicar cintas de fibra de vidrio (reciclable) en ambos extremos del paquete para asegurar que el mismo no se desordene durante su manipulación (Fiske, 1999).

Este proceso debe llevarse a cabo lo más rápidamente posible después del apilado para evitar la formación de grietas superficiales. El vaporizado tiene como fin: (i) asegurar la continuidad del movimiento del agua del centro hacia la superficie de las tablas por capilaridad, (ii) aumentar la permeabilidad de la madera, (iii) incrementar la temperatura en el centro de las tablas y (iv) reducir el tiempo total del secado hasta un 20% (Vignote, 1981).

Este tratamiento no debería durar más de dos horas a 62° C, excluyendo el tiempo requerido para que la cámara alcance la temperatura operativa. No debe usarse vapor de alta presión y, por lo tanto, en instalaciones que cuentan con líneas de vapor de alta presión debe preverse un reductor de presión. El vapor debe ser totalmente saturado (100% de humedad) para evitar las grietas superficiales. La aparición de más de un mínimo de grietas superficiales después del vaporizado, sin que fuera una condición preexistente, significa que la especie es probablemente inadecuada para este proceso y que el mismo no debería ser aplicado (Vignote, 1981).

Cuando se termina esta etapa, la carga debe ser transferida directamente a la cámara de secado que habrá sido precalentada y llevada a la humedad relativa requerida (Simpson, 1991).

Un secado exitoso en la cámara puede definirse como un proceso en el cual se reduce el contenido de humedad de la madera hasta el punto deseado con un nivel aceptable de defectos inducidos. El nivel aceptable de defectos inducidos depende del uso al que se destina la madera aserrada: cuando el aspecto visual es determinante (*appearance grade*) el nivel aceptable de defectos es muy bajo, mientras que en usos estructurales es mayor. Una buena conducción del secado de la madera para usos "a la vista" debería tener como objetivo no inducir ningún defecto (Simpson, 1991).

El ritmo al cual la madera puede secarse con un nivel aceptable de defectos inducidos depende no sólo de las condiciones de temperatura,

humedad relativa y velocidad del aire que se apliquen sino también de las propiedades de cada especie, es decir la anatomía de la madera, su densidad, porosidad y tasa de contracción. Para las maderas duras (latifoliadas), los programas de secado más exitosos son los que involucran bajas velocidades del aire, bajas temperaturas del bulbo seco y pequeñas diferencias psicrométricas en las etapas iniciales del proceso (en fuerte contraste con el caso de la madera de pino de plantaciones). Cuando la madera pierde humedad, se vuelve posible incrementar las temperaturas del bulbo seco y reducir la humedad relativa en la cámara. Los puntos de cambio, es decir los niveles de contenido de humedad de la madera a los que se modifican estas condiciones, variarán según el espesor y la especie de la madera (Fiske, 1999).

Para controlar la temperatura y la humedad relativa del secador se utiliza un psicrómetro, aparato compuesto por un termómetro de "bulbo seco" expuesto directamente al aire y otro de "bulbo húmedo", manteniéndose este último cubierto con un paño cuya extremidad está sumergida en un depósito de agua. La diferencia de temperatura entre los dos bulbos se denomina "diferencia psicrométrica", la cual, junto con la temperatura del bulbo seco, determinan la humedad relativa y el contenido de humedad de equilibrio (Simpson, 1991).

En función de las observaciones anteriores, es fácil entender que los controles en la cámara de secado deben ser extremadamente precisos, en particular para los sensores de bulbo húmedo y seco y las unidades de PLC y requieren de chequeos de rutina para asegurar su correcto funcionamiento. Los ventiladores deben estar en buen estado de operación y deben ser invertidos cada hora. La velocidad del aire barriendo las tablas no debería exceder 0.5 m por segundo. Para impedir otros flujos de aire que los que "barren" la superficie de las tablas, se colocan baffles encima y en ambos costados del paquete y se fijan tablas longitudinales en los extremos de los soportes (Simpson, 1991).

Para la primera etapa del secado, se recomienda seguir un programa. Las condiciones indicadas en la última línea de la primera etapa de secado se

mantienen hasta que la muestra más seca en la cámara alcance un contenido de humedad de 15%. Durante toda la duración del programa debe supervisarse muy de cerca la posible formación de grietas superficiales en la carga, en cuyo caso debe incrementarse inmediatamente la humedad relativa (Kretschmann, 1991).

Con frecuencia, no se logra un mismo contenido de humedad en todas las tablas de una carga. Estas variaciones pueden causar serias dificultades durante el almacenamiento, elaboración o uso de la madera secada. Además, no pueden aliviarse satisfactoriamente las tensiones internas de una carga si el contenido de humedad varía demasiado de una tabla a otra. Para evitar variaciones excesivas en el contenido de humedad se utiliza la técnica del igualado, consiste en establecer las siguientes condiciones en la cámara y mantenerlas hasta que la tabla más húmeda alcance un contenido de humedad de 18% (Mallory, 1987).

Una vez lograda esta condición, se retira la carga de la cámara dejando que se enfríe bajo techo. Es posible realizar la etapa de igualado fuera de la cámara de secado, bajo techo, en cuyo caso el proceso requerirá varias semanas (Mallory, 1987).

El reacondicionamiento tiene como propósito aliviar las tensiones que se desarrollan durante la primera etapa de secado y revertir cualquier colapso causado por esta etapa de secado. La técnica consiste en efectuar un nuevo vaporizado, que tiene lugar en la misma cámara utilizada para el primero y con el mismo tipo de vapor. Esta etapa tarda entre cinco y ocho horas, dependiendo de la especie. No debe reacondicionarse, bajo ninguna circunstancia, madera con un contenido de humedad que exceda 20% en su punto más húmedo. Durante el proceso de reacondicionamiento, el contenido de humedad de las tablas aumenta hasta alrededor de 23% (McDonald, 1986).

2.2 Equipamiento de una planta para secado de madera

Aunque para los transformadores de madera y fabricantes de muebles, es claro que existen distintos sistemas de secado, lo que no está claro –en muchas ocasiones- es la necesidad de equiparlos, sin importar su tipo, con los instrumentos básicos para su operación. Efectivamente existen cuartos de secado que se diseñan omitiendo o reformando partes básicas que vienen a incidir en el resultado final. Por eso, a continuación listamos el equipamiento básico para una planta de secado (Kretschmann, 1991).

2.2.1 *Celda o cámara de secado*: Las cámaras de secado son en principio unos cuartos herméticos, equipados con la maquinaria necesaria para asegurar el proceso (Kretschmann, 1996).

Dichos cuartos o edificios se construyen preferiblemente con ladrillos, concreto o con elementos prefabricados de aluminio, este último, material ideal en la medida que es resistente a la intemperie y no se afecta por los valores de acidez que rieguen al interior (Simpson, 1991).

La cámara de mampostería es entre todas, una solución económica, resistente a los golpes de la carga y es fácil de reparar en su estructura. Sin embargo, no es posible mudarla, su ampliación es complicada, requiere aislamiento térmico - generalmente espuma de poliuretano de alta densidad - y necesita sellamiento contra la filtración de la humedad (Simpson, 1991).

Otro tipo son las cámaras metálicas, de paneles sellados y térmicamente aislados en su interior que -cuando son elaboradas en aluminio- resisten la corrosión y en el exterior sólo requieren galvanizado o pintado. Se montan rápido y se pueden trasladar fácilmente aunque su costo es elevado (Simpson, 1991).

El casco y las puertas -tanto de las cámaras en mampostería como las metálicas- se fabrican con materiales resistentes a la acción del clima agresivo que rige durante el proceso de secado (Simpson, 1991).

2.2.2 Sistema de calefacción: Éste debe ser capaz de calentar la madera, las paredes de la celda y suministrar el calor necesario para evaporar la humedad de la madera al nivel deseado. Así pues, es muy importante contar con un sistema que posea la capacidad de nivelar el ambiente a tiempo y no ocasione un daño irreparable en la madera. Aquí interviene el concepto de la inercia térmica: una vez aplicada una gran cantidad de calor o vapor (humedad) dentro de la cámara, éste puede ser difícil de retirar antes que provoque en el material a secar un efecto nocivo y adverso (Fiske, 1999).

Éste es el caso de las cámaras que operan con calentamiento directo, en las cuales se aplica el calor de una llama a una gran masa de hierro o similar, para que caliente el aire que abraza la madera. En caso contrario, la ausencia de tal masa -en un esquema similar- produce el corte inmediato de calor, descendiendo drásticamente la temperatura para elevarse nuevamente al encender la llama, lo que ocasiona el riesgo de colapso en la madera por los valores extremos de temperatura que se manejan (Fiske, 1999).

Para evitar dicho colapso se requiere entonces de una gran capacidad de intercambio de calor con aire, lo que implica también una superficie amplia que irradie dicho calor pero con poca masa sólida (mínima inercia térmica); en este caso el uso de un radiador es lo ideal. Para su funcionamiento un fluido corre por su interior a una temperatura lo más constante posible, calentándolo, mientras es controlado o interrumpido fácilmente por el operador o por el control programador. Este fluido debe provenir de una fuente térmica de larga duración (temperatura y presión constantes) para asegurar un abastecimiento rápido y/o prolongado, y de un calentamiento de la cámara en el menor tiempo posible (Fiske, 1999).

El clima creado dentro de la cámara permite el secado progresivo de la madera hasta el contenido de humedad final deseado. Para dar calor a estas cámaras se utilizan diferentes fuentes térmicas, siendo las más comunes el vapor de agua, el agua caliente y el aceite térmico. Estos diferentes fluidos se consiguen a través de calderas de calefacción industrial que utilizan como combustible derivados del petróleo, gas natural o el más recomendado para estos procesos debido a su escaso valor económico: el residuo de la madera, serrín, viruta, astilla y corteza (Viscarra, 1998).

Otro sistema de calentamiento es el eléctrico que funciona por medio de unas resistencias aleteadas encargadas de producir el calor que será transmitido a la madera. Las calderas son elementos externos al cuarto de secado y el vapor se transfiere a éste siempre, por medio de un intercambiador (McDonald, 1986).

2.2.3 Sistema de ventilación y descarga de la humedad: Tiene como finalidad producir una circulación de aire apropiada a través de las pilas de madera y los intercambiadores de calor, además de remover los vapores húmedos acumulados en la celda (Mallory, 1987).

La ventilación, generalmente la producen ventiladores axiales ubicados dentro de la secadora por ventiladores centrífugos. De acuerdo al diseño, estos pueden tener motores por medio de transmisores o acoples directos (Mallory, 1987).

En funcionamiento, el aire dentro de la cámara -que se satura con la humedad de la madera- debe ser reemplazado por aire fresco capaz de retener dicha humedad. Para ello, se usan ventilas que expulsan aire y lo renuevan aprovechando el torrente de baja y alta presión producido por ventiladores encargados de hacer circular el aire dentro de la cámara. Sin embargo, las pérdidas de calor por expulsión del aire recalentado y saturado con aire que

recién ha dejado el calefactor han dado pie para el desarrollo de mejoras tecnológicas como los turbo extractores (Mallory, 1987).

Estos aparatos dotados de ventiladores axiales y compuertas, sincronizan su acción según el sentido de la circulación del aire dentro de la cámara, permitiendo que sea el aire saturado y no el recalentado el que se expulse, mientras que el aire fresco ávido de humedad confluye con el aire caliente directamente sobre la madera logrando así el secado (McLean, 1953).

2.2.4 Sistema de humectación y deshumificador: Este es el encargado de elevar la humedad en el ambiente para que pueda abrir los poros superficiales de la madera y así permitir la evacuación del agua que se encuentra al interior de la misma. De igual forma es el encargado de distensionar la madera cuando las temperaturas de secado son muy altas. El deshumificador es el encargado de desalojar la humedad producida por la cámara en la evaporación del agua de la madera (Little, 1979).

2.2.5 Sistema de control: El sistema de medición y regulación representa el «sistema nervioso» del secadero y puede tener diferentes grados de sofisticación según las exigencias del usuario. Normalmente se subdivide en tres categorías: Manuales, semiautomáticos y automáticos (Kretschmann, 1991).

- Controles manuales: En este sistema es el operario quien se encarga de regular las temperaturas y los tiempos de secado. Toda la responsabilidad del proceso recae sobre éste y por lo tanto, el proceso es susceptible de presentar errores con secados de baja calidad. Es un proceso sin tecnificación (Rasmussen, 1960).

- Controles semiautomáticos: Por medio de sensores adecuados (electrodos insertos en algunas tablas para medir la humedad y la temperatura tanto de la madera como de la celda), el control revela y visualiza la situación al interior de la celda, comparando los niveles de humedad y temperatura alcanzados con los

programados por el operador. Si fuese necesario, en forma automática, se encarga de activar los sistemas de ventilación, calefacción y humidificación para mantener cuidadosamente los niveles impuestos por el operador (Rasmussen, 1960).

En este sistema el operador cambia la programación del clima en forma periódica y de acuerdo con las tablas de secado seleccionadas, ya que los controles semiautomáticos necesitan, en general, algunos cambios de los parámetros durante el proceso de secado. Aquí es necesaria la presencia constante del operador (Rasmussen, 1960).

- Controles automáticos: Están provistos de los mismos sensores de humedad y temperatura que los controles semiautomáticos, pero tienen además un computador que analiza la situación en la celda de forma casi continua, y compara los valores relevados con los requeridos en la tabla de secado (Mark, 1970).

El control completamente automático permite la memorización anticipada de todos los datos de la tabla de secado, pudiendo así verificar la evolución del proceso en forma automática hasta la finalización del mismo, incluso sin la presencia del operador (Mark, 1970).

Seleccionar bien según el uso de los secaderos se ha convertido en una necesidad cada vez mayor para la industria de la madera y el mueble en nuestro país, sin embargo vale la pena tener en cuenta algunos puntos básicos antes de tomar la decisión de adquirir o no una cámara de secado (Simpson, 1991).

Es importante analizar las condiciones y niveles de producción de la empresa para saber si se justifica o no el gasto del secadero. Igualmente es determinante el tipo de madera a secar (Denim *et al*, 2000).

2.2.6 *El consumo de energía debe medirse desde dos puntos de vista:*

- Energía eléctrica: Es producido por el consumo de los motores instalados en el secadero, principalmente por los ventiladores de circulación de aire que funcionan permanentemente y son responsables de por lo menos el 95 por ciento del consumo eléctrico total de la cámara. Es importante calcular en qué porcentaje afecta dicho gasto a la empresa (FAO, 1985).

- Energía térmica: Este costo se determina por el valor del combustible (ACPM, gas, leña, diesel) necesario para calentar la madera. El incremento de este depende en gran medida de la humedad contenida en la madera y del tipo a secar (FAO, 1985).

Si bien es cierto que un secado de madera efectuado correctamente da valor agregado a los productos y puede incrementar sus precios en el mercado - dada su calidad diferencial-, la inversión que realiza la empresa al adquirir equipos tecnificados se recupera a largo plazo pues los costos son altos. El industrial debe entonces estudiar las necesidades específicas de su negocio -en relación a la variable costo/beneficio- para hacerse al secadero ideal (González *et al*, 1989).

III. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

- ✓ *Determinar características técnicas y costos del secado de madera de Pinus spp. en hornos alimentados con leña y diesel como fuentes energéticas.*

3.2 Objetivos específicos

- ✓ Determinar las características físicas básicas del horno de leña y de diesel, tales como las dimensiones del cuarto de secado, equipamiento y capacidad instalada que poseen.
- ✓ Realizar un diagnóstico del funcionamiento de los hornos.
- ✓ Realizar una evaluación de la eficiencia del proceso de secado en hornos de leña y diesel que incluya las variables de humedad relativa, temperatura del cuarto de secado y humedad de la madera.
- ✓ Determinar costos de operación del proceso de secado en hornos de leña y diesel.
- ✓ Determinar la demanda y la oferta calórica de los hornos de diesel y leña.

3.3 Uso de la leña como combustible

Existen tres factores que ejercen una marcada influencia en la eficiencia energética de la madera, que son: humedad adecuada, densidad y dimensiones de la leña (González *et al*, 1989).

Para el análisis de los resultados obtenidos se tomó como base lo expresado por algunos autores [Tillman, Maggi y Partenaires, 1991], que plantean que una madera anhidra con 10 % de humedad produce en su combustión alrededor de 16,7 miles de kJ/kg y con 60 % de humedad sólo alrededor de 6,3 miles de kJ/kg de energía disponible. Según los mismos autores, para extraerle el agua a una madera con 60 % de humedad se necesita emplear alrededor de 20 % del poder calorífico disponible de la propia madera (Guyat, 1989).

Otros investigadores [Briane y Dota, 1985] expresan que el rendimiento de 1 m³ cúbico de leña para la producción de carbón vegetal en función de la humedad de la madera aumenta a medida que disminuye el % de humedad, por ejemplo: un metro cúbico de leña con 20 % de humedad proporciona hasta 100 kg de carbón, pero con 80 % de humedad los rendimientos descienden a 45 kg/m³ cúbico (Guyat, 1989).

La leña en un tiempo relativamente corto alcanza el punto de saturación de la fibra (PSF), o sea, alrededor de 30 % de humedad, que logran humedades entre 20 y 28 % a los 90 días de exposición, lo que proporciona un programa de secado natural para estas especies (LeVan, 1990).

Lo cual redunda en un ahorro de recursos, por ejemplo, el análisis económico simple de la influencia de la humedad en la eficiencia de la leña para centrales azucareros plantea ahorros en todos los indicadores analizados de 62,7 % hasta 72,8 %, cuando la madera se seca de forma natural de 60 % hasta

20 %, con especial interés para la ecología, pues disminuyen los volúmenes de leña y, por ende, de talas de bosques alrededor de 60 % (FAO, 1985).

Los parámetros de explotación de un horno experimental de ladrillos, mejoran a medida que la humedad de la madera se acerca al rango de 20 a 30 %, en especial los porcentajes de rendimientos del carbón vegetal y la velocidad de carbonización, al igual que la calidad del carbón obtenido (análisis químico inmediato), lo que respalda que a menos humedad de la madera la calidad del carbón producido es mejor (Guyat, 1989).

La alimentación del horno de leña debe ser constante lo cual es difícil de conseguir ya que la leña no es un material homogéneo y aquí interviene el concepto de la inercia térmica: una vez entregada una gran cantidad de calor o de humedad (vapor) dentro de la cámara puede ser ésta difícil de retirar a tiempo antes de que ocasione en la madera un efecto negativo. Este es el caso de las cámaras que operan con calentamiento directo como la que se estudio, en las cuáles se aplica calor de una llama para calentar una gran masa que entrega finalmente su calor al aire que llega a la madera (Guyat, 1989).

3.4 Programas de secado

Para el diseño de un programa de secado para un horno, los factores a tomar en cuenta principalmente son la humedad relativa y la temperatura dentro de la cámara de secado, ya que van a determinar las condiciones de secado de la madera. Tanto en términos de tiempo de secado como en calidad del mismo (Denim *et al*, 2000).

El secado es un fenómeno superficial, lo cual provoca un gradiente de humedades entre el interior húmedo y el exterior seco lo cual determina la aparición de tensiones que pueden ser la causa de defectos posteriormente. Por

ello la velocidad del secado debe ser inversamente proporcional al grosor de la pieza (Denim *et al*, 2000).

Posterior a aplicar un programa de secado existen condiciones generales del secado las cuales es necesario tomar en cuenta para obtener los resultados deseados. La primera situación es que en un lote de madera, ésta no se seca a la misma velocidad ni con la misma constancia en todas las piezas, por lo que es necesario realizar un proceso de homogenización durante las etapas finales del secado, el cual consiste básicamente en llevar la pieza más húmeda del lote a un contenido de humedad cercano al deseado (ligemente un 3% por debajo), para todo el lote. De esta manera se va a disminuir el rango de humedades de la madera del lote puesto a secar, logrando mayor homogeneidad. En este rango de humedad (alrededor de un 18% promedio para todo el lote) se empiezan a hacer evidentes los defectos provocados por las tensiones en la madera y es necesario realizar una etapa de acondicionamiento (Denim *et al*, 2000).

Durante el acondicionamiento al llegar a un 15% de contenido de humedad se le debe aplicar aspersion a la madera (cada cámara de secado cuenta con cuatro aspersores), lo cual humedecerá de manera superficial y esto ayuda a liberar tensiones en la madera con el fin de evitar el colapso. De esta manera se tendrá un porcentaje de humedad similar tanto en el interior como en el exterior de las piezas (Denim *et al*, 2000).

IV. JUSTIFICACIÓN

Para satisfacer las necesidades de una industria creciente como es la forestal en nuestro país, es necesario plantear soluciones que se adapten a nuestro medio y a las posibilidades que éste brinda.

El mercado actual de madera exige estándares de mayor calidad en sus productos. Lo cual obliga al oferente, que en este caso es la industria maderera, a tecnificarse e implementar mejoras en los procesos de producción con el fin de poder competir en los distintos mercados.

Por dicha razón, el secado de madera se hace fundamental para darle un valor agregado a los productos de esta industria, ya que con ello se logra estabilidad dimensional, resistencia a pudrición, resistencia ataques de insectos, facilidad para ser impregnada, etc., brindándole así condiciones idóneas para ser trabajada.

Actualmente en Guatemala la industria maderera invierte poco o casi nada en el secado de madera como parte de su proceso de producción, ya que la mayoría seca la madera a la intemperie. El precio y los requerimientos de calidad de los productos a elaborar, y la relación entre el costo financiero del stock respecto del precio del producto son las dos variables que inciden directamente en la decisión de secar natural o artificialmente la madera.

Tres son los aspectos principales a considerar al momento de tomar decisiones del proceso a utilizar: calidad requerida, costos de los procesos y precio del producto final. Se trata, por lo tanto, de un equilibrio entre factores técnicos y económicos.

Los valores de humedad final a los que se puede llegar con el secado artificial, de ninguna manera pueden lograrse con secado a la intemperie. A

modo de ejemplo digamos que la industria de muebles, tableros o vigas requieren de valores de humedad final de la materia prima cercano al 8%, un proceso de secado a la intemperie de una duración de seis a veinticuatro meses según las condiciones climatológicas del lugar, permite llegar a valores cercanos al 14%.

La probabilidad de defectos en la materia prima es directamente proporcional al tiempo que transcurre entre el corte de la troza y la madera seca en condiciones de uso. Las torceduras, combado, rajaduras, colapso, mancha azul, ataque de insectos, etc. son solo algunos de los defectos que se presentan. Existe bibliografía que estima el porcentaje de defectos como consecuencia del secado a la intemperie en un 12 al 15%, este porcentaje se reduce del 4 al 7% en el proceso de secado en hornos.

El costo del secado a la intemperie, varía de acuerdo al valor de la materia prima, el tiempo requerido y el costo financiero o de oportunidad del dinero invertido. Con variaciones de acuerdo al tipo de madera, es posible estimar el costo promedio del secado artificial entre un 20 al 25% del costo de la materia prima. De esta manera se obtiene un producto en condiciones de uso en un plazo que oscila entre 5 y 25 días. Sucede, además, que ese capital pudo haber sido rotado (para el caso en que exista demanda) más de veinte veces en el tiempo considerado, con lo que la rentabilidad crece proporcionalmente.

El costo de oportunidad del material apilado en un patio de secado, los riesgos de manipuleo, la presencia de defectos, la posibilidad de vender en los períodos estipulados, la homogeneidad del producto, etc. son algunos de los costos adicionales que debieran ser tomados en cuenta al momento de comparar ambos procesos de secado.

Dentro del secado artificial se analizarán dos alternativas como fuente energética: diesel y leña. Cada una brinda condiciones diferentes de secado y

costos. Para el horno alimentado con leña es necesaria una solución sostenible para su funcionamiento, debido a que dentro de un aserradero siempre existen piezas que no se utilizan y se pueden usar como leña. Aún así la leña puede venderse y tiene un costo, por lo que también se estima la posibilidad de utilizar corteza de árbol, la cual no es requerida comercialmente como leña.

V. METODOLOGÍA

5.1 Diagnóstico

Cada horno secador de madera consta de dos componentes principales, la cámara de secado y la fuente de calor, cada uno con su respectivo equipamiento para realizar mediciones de temperatura, humedad relativa, etc., los cuales fueron útiles para hacer un diagnóstico del funcionamiento de cada horno. Con el fin de simplificar los nombres de cada tipo de horno, a los hornos alimentados con leña y diesel se les denominará en el estudio, horno - leña y horno - diesel respectivamente.

5.1.1 *Diagnóstico de propiedades físicas y equipamiento de hornos*

5.1.1.1 *Horno - leña*

5.1.1.1.1 Fuente de calor: La fuente de calor de este horno consiste básicamente en una caldera alimentada con leña, de manera manual. Todos sus componentes fueron observados para la comprensión del sistema, el cual brinda calor a la cámara de secado. También fueron observados todos los dispositivos con los que cuenta, ya que estos fueron útiles para el monitoreo del funcionamiento del horno.

En el cuarto donde se encuentra el quemador de leña se observaron instalados controladores marca Johnson Controls, los cuales brindaron datos de humedad relativa y temperatura constantemente, y fueron tomados cada media hora para monitorear el funcionamiento del horno.

5.1.1.1.2 Cámara de secado: La cámara de secado fue medida con una cinta métrica para determinar sus dimensiones y calcular su la capacidad instalada. También se hizo una observación sobre los materiales utilizados para su construcción, su diseño y el equipamiento que posee para medir la temperatura y la humedad relativa.

Otro aspecto que fue medido es la velocidad del viento dentro de la cámara de secado en distintos puntos, ya que cuenta con ventiladores que producen un flujo de aire a través de las perchas de madera, el cual fue medido con un anemómetro.

5.1.1.2 Horno - diesel

5.1.1.2.1 Fuente de calor: La fuente de calor de este horno se abastece por un quemador de diesel, el cual es se alimenta constantemente desde un tanque con diesel. Este quemador cuenta únicamente con un termómetro que mide la temperatura de salida del aire hacia la cámara de secado. Los controladores de humedad relativa y temperatura se encuentran ubicados en la misma habitación donde está el quemador de diesel.

5.1.1.2.2 Cámara de secado: La cámara de secado de este horno fue medida con una cinta métrica para determinar sus dimensiones, con lo cual fue posible calcular la capacidad instalada de dicha cámara. También se realizó una evaluación de los materiales utilizados para su construcción, el diseño y el equipamiento que posee, para medir la temperatura y la humedad relativa.

A su vez se midió la velocidad del viento dentro de la cámara de secado en distintos puntos, ya que cuenta con ventiladores que producen un flujo de aire a través de las perchas de madera, el cual fue medido con un anemómetro.

5.1.2 Metodología para el diagnóstico del funcionamiento de los hornos:

Para el diagnóstico del funcionamiento de ambos hornos se realizó diariamente un muestreo de medición del contenido de humedad de la madera, utilizando únicamente madera de *Pinus spp.* La medición se realizó desde el momento del encendido de los hornos hasta el momento en el que el contenido de humedad de la madera llegó al punto deseado, el cual es alrededor del 12%. Esta medición se llevó a cabo con un medidor de contenido de humedad marca Delmhorst, que funciona midiendo la conductividad eléctrica que presenta la madera, el cual tiene un rango de medición entre el 7 y el 40 por ciento de contenido de humedad. Este medidor fue calibrado con muestras de madera *Pinus spp.* cortadas en forma de cubos, siguiendo la metodología ASTM. Esta metodología consiste en determinar el peso húmedo o verde en una balanza analítica, luego se miden las dimensiones de los cubos con un Vernier y posteriormente se hace una medición del contenido de humedad con el medidor de humedad anteriormente indicado (Denim *et al*, 2000).

Posteriormente se ponen estas muestras a secar en una mufla u horno durante 72 horas a 65 °C, hasta que su peso no varíe, determinando el cero por ciento del contenido de humedad. Luego se hace una medición del contenido de humedad con el medidor Delmhorst para determinar el cero que permite observar dicho medidor, se pesa y se miden sus dimensiones, con lo cual se pretende encontrar un factor de corrección para calibrar este medidor de contenido de humedad, lo que es útil para estimar la eficiencia del secado con contenidos de humedad reales para cada muestra de madera ingresada a ambos hornos (Denim *et al*, 2000).

Se utilizó la metodología anteriormente indicada para obtener las piezas que se muestrearon en cubos de 2*2 y 3*3 pulgadas las cuales sirvieron para hacer una corrección del contenido de humedad marcado por el medidor de conductividad eléctrica, con respecto al peso de agua contenido en cada pieza. De esta manera se pudo establecer una correlación entre el porcentaje del peso

de cada pieza que corresponde al agua y la conductividad eléctrica marcada por el medidor, ya que entre las especies que tiene programadas no se encuentra el *Pinus oocarpa*, ni otras especies que se manejan en el mercado nacional. Por lo que se hizo necesario realizar un ajuste a las mediciones realizadas con dicho aparato.

La forma de muestreo del contenido de humedad de la madera dentro de cada cuarto de secado siguió la misma metodología que se expone posteriormente, a excepción de la posición y distribución de las perchas dentro de la cámara de secado la cual es ligeramente variable, ya que dependiendo de la cantidad de madera ingresada y la longitud de las piezas, existió diferencia entre una carga y otra. Los puntos de medición de cada percha fueron ubicados como muestra la figura a continuación, cada percha muestreada en su cara anterior y posterior:

Figura 1.

Diagrama de muestreo para diagnóstico de funcionamiento.

| | | | | | |
|----------------|---|---|---------------|----|----|
| 1 | | | 7 | | |
| | 2 | | | 8 | |
| | | 3 | | | 9 |
| 4 | | | 10 | | |
| | 5 | | | 11 | |
| | | 6 | | | 12 |
| Cara posterior | | | Cara anterior | | |

Esta metodología anteriormente descrita tiene como fin abarcar la mayor área posible de muestreo de cada percha ya que entre ambas caras se dibuja una X, logrando de esta manera que los puntos por percha y por castillo, abarquen la mayor cantidad de área entre las piezas puestas a secar.

Con base al muestreo de la madera que entra a cada horno se determinó la eficiencia de secado en cada horno muestreado.

Esta metodología de muestreo fue implementada en la fábrica previamente al desarrollo de este estudio, con la cual se han observado buenos resultados, ya que brinda una idea con bastante precisión del contenido de humedad que presenta cada lote de madera.

5.2 Eficiencia del proceso de secado de la madera

Se realizó un muestreo del secado de la madera en los hornos luego de implementar un programa de secado, el cual sirvió como parámetro de comparación. Luego se hizo el cálculo del peso húmedo y seco de las muestras, además de un análisis de variabilidad.

5.2.1 Muestreo para el control del secado

5.2.1.1. Selección: Por lo general, las muestras se eligen durante la fase del apilado de la madera. La mayoría de los tablones, de los cuales se toman las muestras, deberán representar la madera más húmeda y lenta de secar; algunas muestras deben corresponder a los tablones de madera más seca o de mayor velocidad de pérdida de humedad (Viscarra, 1998).

5.2.1.2 Número de muestras: El número de muestras de secado a tomar es como mínimo cuatro por cada 20 m³ (8,500 pies tablares), y de 10 a 12 muestras por cada carga de 100 m³ (42,000 pies tablares) o más, del horno secador (Viscarra, 1998).

5.2.1.3 Preparación y pesaje de muestras: El método para determinar el contenido de humedad por peso de toda la carga, es difícil usar cada vez que se

necesita. Por ello, se incluyen muestras de secado en cada pila del horno de modo que el contenido de humedad pueda ser rápidamente encontrado, como se verá más adelante (Viscarra, 1998).

El primer paso en la preparación de las muestras de secado es cortar y marcar las tablas de las cuales éstas proceden y numerar claramente cada probeta como se muestra en la Figura 2. Las muestras de secado se cortarán de tablas representativas de la pila y deben ser al menos de 76cm de largo (Viscarra, 1998).

En la mayoría de los casos, de cada tabla elegida se obtiene una muestra, pero se pueden tomar más; para ello se recomienda seguir el esquema de la Figura 2. El contenido de humedad de la muestra es, entonces, el promedio de las probetas A-1 y A-B para la muestra A y el promedio de las probetas A-B y B-1 para la muestra B (Viscarra, 1998).

Para evitar el efecto de algún secado de los extremos que hubiese ocurrido en la tabla antes del corte, las muestras de secado deben ser tomadas, al menos, a 60cm de los extremos (Viscarra, 1998).

Inmediatamente después del corte de las muestras se cubren los extremos con un impermeabilizante y se pesan; el peso se debe anotar en la muestra que corresponda (Viscarra, 1998).

Para este fin se emplean balanzas de hasta 40 libras de capacidad, con la mayor precisión posible. La cobertura de los extremos de las muestras tiene por finalidad retardar el secado de los extremos y hacer que la tasa de pérdida de humedad de la muestra sea comparable a la de tablas largas. Se pueden utilizar para este propósito lacas, parafinas o pinturas al aceite. También pueden servir mezclas de pintura al agua (Viscarra, 1998).

Las probetas para determinación del contenido de humedad deben ser pesadas rápidamente, previa eliminación de las astillas producto del corte, antes del pesaje. No hay necesidad de sellar los extremos. Cuando se cortan dos probetas para determinación de la humedad correspondiente a los lados de la muestra de secado, se pueden pesar juntas o por separado y se debe marcar el peso en las probetas. Se emplea una balanza de hasta 1 Kg de capacidad y de 0,1g ó más precisa (Viscarra, 1998).

5.2.2 Determinación del contenido de humedad: El contenido de humedad se expresa siempre como el porcentaje del peso seco de la muestra y por ello, es necesario calcular dicho peso en la muestra de secado. Las probetas obtenidas para calcular el contenido de humedad de las muestras de secado, según lo descrito en el inciso anterior sobre preparación y pesaje, son secadas en una estufa de laboratorio a una temperatura de 103° C a 105° C, hasta alcanzar un peso constante. Esto normalmente toma de 12 a 24 horas. El contenido de humedad se determina como el porcentaje del peso anhidro, según la siguiente ecuación:

$$CH = \frac{Ph - Po}{Po} \times 100 \quad \text{o bien,}$$

$$CH = \left(\frac{Ph}{Po} - 1 \right) \times 100$$

Contenido de humedad calculado de la muestra A,

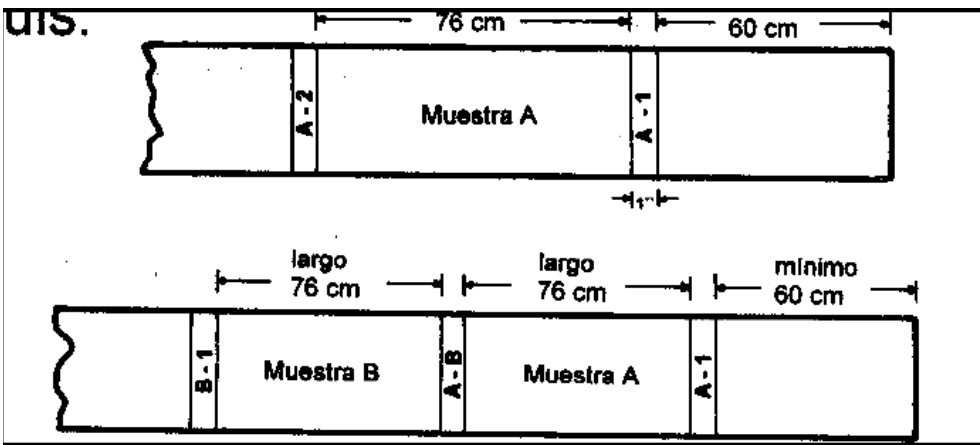
$$= \frac{CH\% \text{ sección A-1} + CH\% \text{ sección A-B}}{2}$$

Contenido de humedad calculado de la muestra B,

$$= \frac{CH\% \text{ sección A-B} + CH\% \text{ sección B-1}}{2}$$

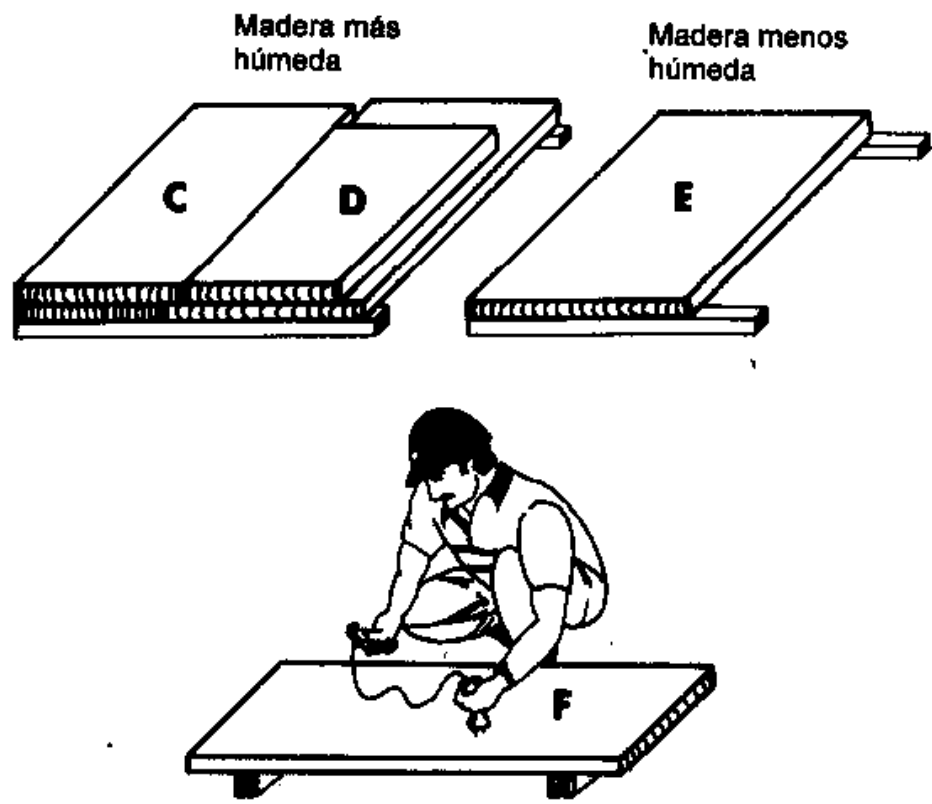
(Viscarra, 1998)

Figura 2. Corte de muestras



(Viscarra, 1998)

Figura 3. Medición de contenido de humedad



(Rasmussen, 1960)

5.2.3 Evaluación de la eficiencia de los hornos: Se implementó un programa de secado tomado del *Dry Kiln Operator's Manual*, con el fin de tener un parámetro de comparación de la eficiencia del secado de la madera entre los hornos alimentados con diesel y leña. Dicho programa de secado es específico para madera de *Pinus oocarpa*; siendo esta la especie de mayor comercialización por el aserradero. Este programa fue implementado en ambos hornos.

El programa de secado para evaluar la eficiencia de los hornos se presenta a continuación:

Cuadro 1. Programa de secado para evaluar la eficiencia de los hornos.

| Paso | Contenido de humedad | Temperatura en grados F | | | Equilibrio del contenido de humedad | Humedad relativa | Temperatura en grados C | | |
|------|----------------------|-------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------------------|------------------|-------------------------|-------------------------|--------------|
| | | Bulbo seco | Depresión psicrométrica | Bulbo húmedo | | | Bulbo seco | Depresión psicrométrica | Bulbo húmedo |
| 1 | Verde | 130 | 5 | 125 | 16.4 | 86 | 54.4 | 2.8 | 51.7 |
| 2 | 50 a 40 | 130 | 7 | 123 | 14.4 | 81 | 54.4 | 3.9 | 50.6 |
| 3 | 40 a 35 | 130 | 11 | 119 | 11.7 | 72 | 54.4 | 6.1 | 48.3 |
| 4 | 35 a 30 | 130 | 19 | 111 | 8.6 | 55 | 54.4 | 10.6 | 43.9 |
| 5 | 30 a 25 | 140 | 35 | 105 | 5.3 | 32 | 60.0 | 19.4 | 40.6 |
| 6 | 25 a 20 | 150 | 50 | 100 | 3.2 | 19 | 65.6 | 27.8 | 37.8 |
| 7 | 20 a 15 | 160 | 50 | 110 | 3.4 | 22 | 71.1 | 27.8 | 43.3 |
| 8 | 15 a final | 180 | 50 | 130 | 3.6 | 26 | 82.2 | 27.8 | 54.4 |

Fuente: Simpson, 1991.

Luego de haber implementado este programa, para lotes de madera con las dimensiones deseadas, se procedió a tomar la información que brindan los relojes de los controladores de temperatura y humedad relativa dentro de las cámaras de secado, estos datos se tomaron cada media hora y se llevó una hoja de control para este efecto.

Con los datos de temperatura y humedad relativa, se hizo una relación de ambas variables en función del tiempo, esta relación aunado a los porcentajes de pérdida de humedad en la madera, que también se evaluaron en función del tiempo, proporcionó la información para hacer el análisis de eficiencia en el proceso de secado de cada horno. Las temperaturas fueron tomadas en grados Celsius. La humedad relativa fue observada en porcentajes.

Diariamente se midieron los contenidos de humedad presentados por las muestras dentro de los hornos, lo que permitió hacer una relación entre la pérdida de humedad y el tiempo transcurrido. Para completar el concepto de eficiencia durante el proceso, se tomó el porcentaje de daños sufridos por la madera después del período de secado. Por política de la empresa se tiene establecido que el porcentaje de deterioro de lotes de madera puesta a secar no debe exceder el 10%. De la misma manera se hizo un recuento de daños presentados por lote para corroborar dicho dato, sin embargo no se verificó el estado de los lotes de madera previo a ingresar a la cámara de secado.

Otro aspecto considerado para la evaluación de la eficiencia de los hornos, es la velocidad del viento dentro de las cámaras de secado. Se midió en diferentes puntos de la cámara de secado con la ayuda de un anemómetro y posteriormente se promedió para obtener una velocidad media del flujo de viento.

5.2.4 Análisis estadístico de la eficiencia de los hornos: Los datos proporcionados por los dispositivos con que cuenta cada horno, así como la pérdida de humedad diaria de las muestras, fueron sometidos a un análisis estadístico en el programa de PH Stat para Excel 2000.

Para analizar la variabilidad en el secado de la madera entre los diferentes hornos, se calculó la desviación estándar y la media obtenida de los puntos muestreados por lote de madera puesta a secar. Con ello se pueden identificar

la eficiencia del secado en cuanto a la uniformidad brindada por cada horno (Rosen, 1992).

5.3 Costos del proceso de secado de la madera

Para estimar los costos del proceso de secado se tomaron en cuenta dos tipos de costos: fijos y variables. Con esta diferenciación se procedió al análisis de costos en base a los datos manejados por la empresa en la que se realizó el estudio. El fin de este análisis fue llegar a un costo unitario, que consiste en el costo del proceso de secado de un pie tablar de madera de pino.

5.3.1 Horno- leña

Cuadro 2. Costos fijos y variables para horno alimentado con leña

| Costos fijos | | Costos variables |
|----------------------|----------------------|-------------------------------|
| <i>Mantenimiento</i> | <i>Mano de obra</i> | <i>Energía y combustibles</i> |
| Montacargas | Piloto montacargas | Combustible montacargas |
| Cámara de secado | Estibadores | Leña |
| Fuente de calor | Alimentador de horno | Energía eléctrica |

Fuente: Elaboración propia, 2004

Para estimar el costo del consumo de leña para el funcionamiento de este horno, se calculó un consumo diario de leña en base al peso requerido por hora de funcionamiento. Para evitar medir el contenido de humedad de la leña, una variable complicada de medir, la cual a su vez tendría una incidencia sobre el peso estimado, se manejó de la siguiente manera: se tomó una muestra grande del peso de leña utilizado por el horno diariamente indicando mediciones por un período de cinco meses, con lo cual se obtuvo un peso promedio del requerimiento de leña diario. Esto también fue propuesto con el fin de evitar el sesgo que podrían causar las diferentes demandas de leña del horno, dependiendo de la etapa de funcionamiento a lo largo del día (al arrancar por las

mañanas el horno, podría presentar un requerimiento mayor de leña que la demandada al mediodía y cuando el cuarto de secado haya alcanzado cierta temperatura operación, es posible que requiera menor cantidad de leña), de tal manera que una muestra grande del requerimiento de leña por peso, ayudó a establecer un peso promedio de leña requerido por hora para el funcionamiento del horno. Con la estandarización del peso de leña demandado por unidad de tiempo de funcionamiento, luego se procedió a verificar el precio de leña en el mercado de una unidad comparable al peso que se determinó como promedio para una hora de funcionamiento del horno, y de esta manera se determinó el costo del peso promedio encontrado. Esto sirvió para determinar el costo unitario de secado por pie tablar de pino, sumando este costo variable específico al resto de costos variables y costos fijos (Cuadro 2).

Los costos anteriormente mencionados necesariamente deben estar en función del volumen de madera puesta a secar.

5.3.2 *Horno - diesel*

Cuadro 3. Costos fijos y variables para horno alimentado con diesel

| Costos fijos | | Costos variables |
|----------------------|---------------------|-------------------------------|
| <i>Mantenimiento</i> | <i>Mano de obra</i> | <i>Energía y combustibles</i> |
| Montacargas | Piloto montacargas | Combustible montacargas |
| Cámara de secado | Estibadores | Leña |
| Fuente de calor | | Energía eléctrica |

Fuente: Elaboración propia, 2004

Para determinar el costo unitario de secado de madera en este horno, se calculó la razón del consumo de diesel por unidad de tiempo, determinando el costo de una hora de funcionamiento de este horno en términos de consumo de diesel. Luego se calcularon las horas de secado que requirió un volumen de

madera determinado, para luego encontrar el costo unitario del proceso de secado de un pie tablar de pino, sumando los costos fijos y el resto de los costos variables a este insumo específico (Cuadro 3).

5.4 Oferta y demanda calórica durante el proceso de secado

Se realizó una estimación con condiciones ideales de la oferta de calor que proporcionan ambos hornos, en términos de la capacidad que tiene cada horno para generar calor y con base al combustible que utiliza. Se tomó en cuenta los materiales con los que están contruidos, así como su capacidad para conducir y aislar el calor producido, el cual es transportado por medio del aire hacia la cámara de secado.

La demanda calórica debe ser la misma para determinada cantidad de madera puesta a secar, ya que se requiere evaporar la misma cantidad de agua, bajo condiciones similares, asumiendo que los cuartos de secado poseen las mismas características. Con ello se busca estimar cuánto calor es necesario para remover la humedad de la madera y llevarla a un contenido de humedad aproximado del 10%, tomando en cuenta el combustible utilizado. Con este análisis se puede tener otro parámetro de eficiencia de los hornos a nivel energético.

VI. RESULTADOS

6.1. Diagnóstico

6.1.1 Diagnóstico de propiedades físicas y equipamiento de hornos

6.1.1.1. Horno - leña

6.1.1.1.1 Fuente de calor. La fuente de calor de este horno (Figura 5), consta de una caldera la cual se alimenta manualmente con leña. Instalados en el quemador de leña se encuentran dos termómetros uno que mide la temperatura del aire antes de entrar a la caldera y otro que mide la temperatura del aire inmediatamente después de ser calentado, con lo cual se estimó la capacidad de calentamiento del aire en dicho quemador. Se observó que cuenta con un intercambiador de calor que consta de seis tubos de 10 cm de diámetro cada uno, abarcando un área de aproximadamente un metro cuadrado.

En el cuarto donde se encuentra el quemador de leña están instalados los controladores marca Johnson Controls (Figura 4), los cuales brindan los datos de temperatura y humedad relativa constantemente. Dichos datos fueron tomados cada media hora para monitorear el funcionamiento del horno.

6.1.1.1.2 Cámara de secado. Las dimensiones de la cámara de secado (Figura 7), son 11 pies de alto por 16 de ancho por 21 pies de fondo; consta de tres paredes de concreto, de las cuales las paredes laterales tienen como aislante térmico entre el concreto y un recubrimiento de madera, aserrín, que impide que se escape el calor lateralmente entre una cámara y otra (Figura 8). La capacidad instalada calculada para la cámara de secado fue de 10,000 pies tablares. La puerta está construida de aluminio con un relleno de espuma de poliuretano como aislante térmico, la cual corre lateralmente sobre un riel,

aislado en la base con caucho y en el extremo posee una banda de hule para cerrar herméticamente (Figura 9).

El techo está construido con láminas de duralita y asbesto. Posee ventiladores de extracción de humedad ubicados cerca del piso (Figura 10). En la parte superior se encuentran ubicados tres ventiladores reversibles marca Siemens, los que producen un flujo de aire caliente de 0.8 m/s dentro de la cámara a través de las perchas de madera. Dentro de la cámara se encuentran los ductos que transportan el aire caliente desde la fuente de calor, también se encuentran ubicados los sensores de temperatura y humedad relativa (Figura 11). Estas cámaras de secado poseen aspersores de agua los cuales son útiles para inyectar humedad al sistema, sin embargo se observó que se requiere mejorar la calidad de difusores para reducir la partícula de agua y así obtener mejores resultados durante la etapa de acondicionamiento de la madera (Figura 12).

Figura 4. Controladores de humedad relativa y temperatura



Figura 5

DIAGRAMA DE FUENTE DE CALOR DEL HORNO DE LEÑA

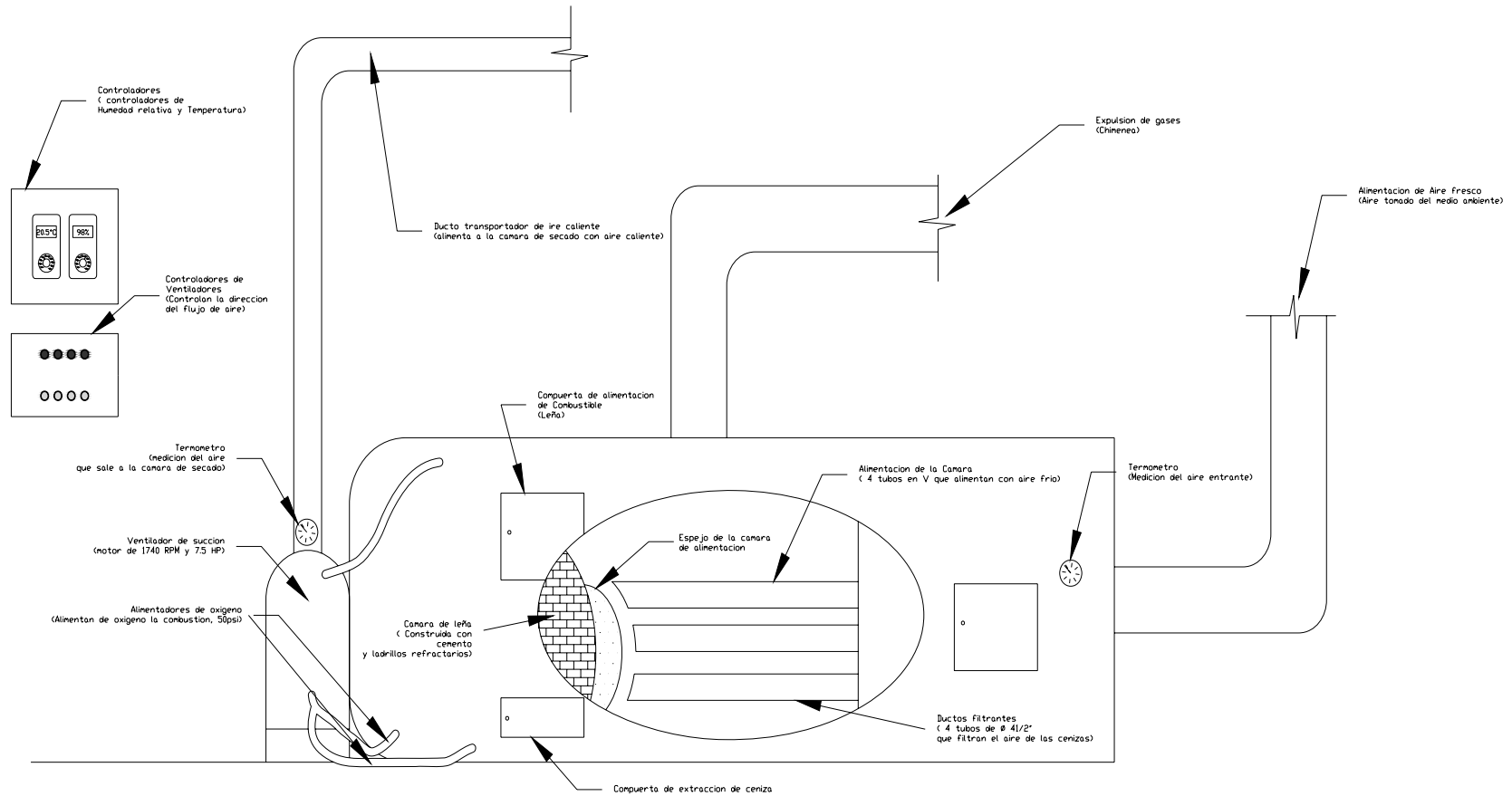


Figura 6

DIAGRAMA DE FUENTE DE CALOR DEL HORNO DE DIESEL

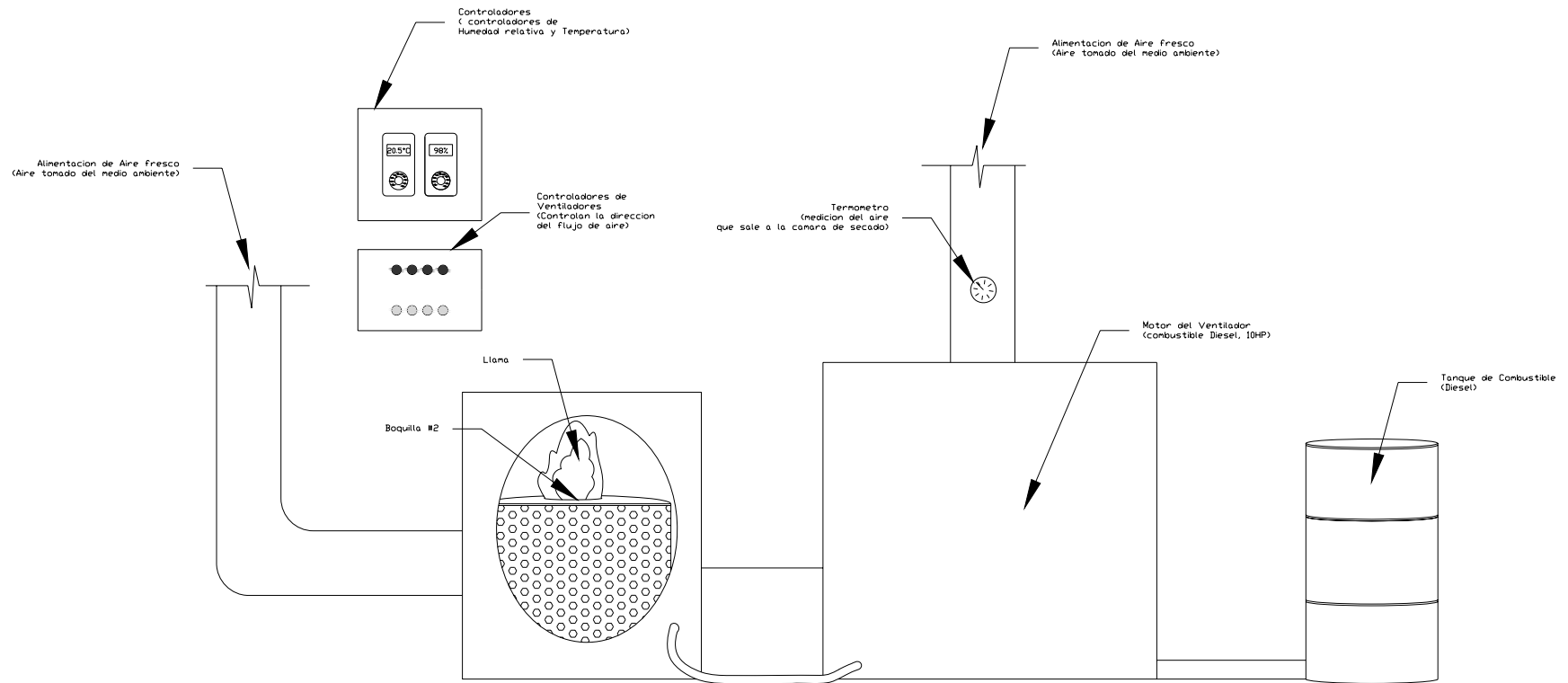


Figura 7
DIAGRAMA DE CAMARA DE SECADO

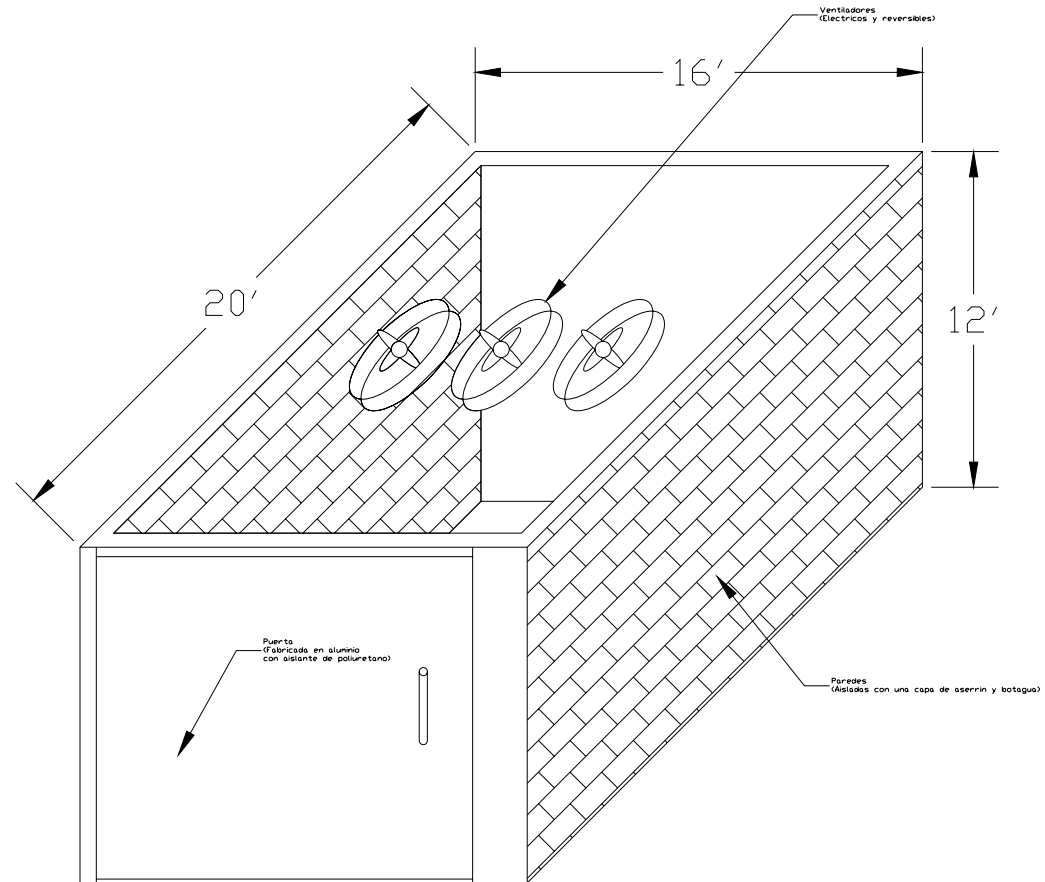


Figura 8.
Interior de la cámara de secado



Figura 9.
Puerta con cierre hermético del horno

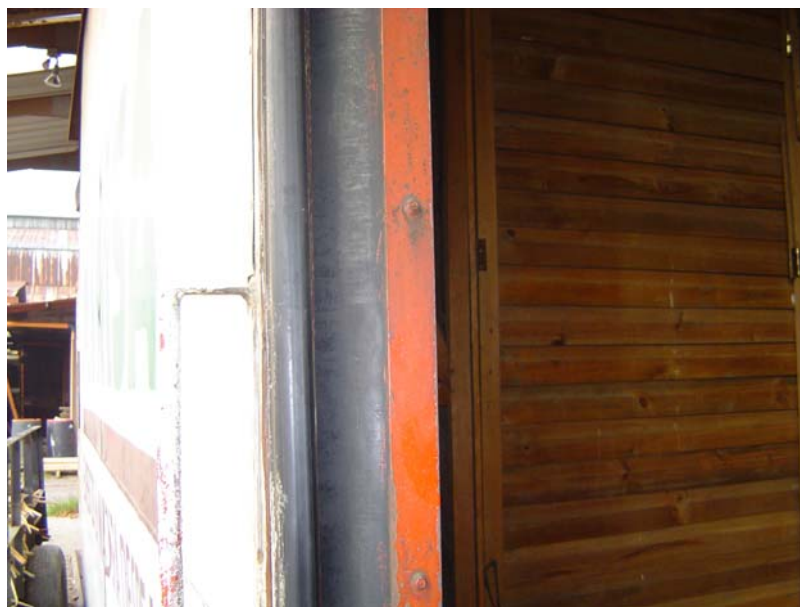


Figura 10.
Ventilador extractor de humedad



Figura 11.
Sensores de temperatura y humedad relativa dentro de cámara de secado



Figura 12.
Aspersor de humedad



6.1.1.2 Horno - diesel

6.1.1.2.1 Fuente de calor. El sistema de calentamiento de aire es por medio de un quemador, el cual produce una llama mediante una alimentación constante de diesel desde un tanque (Figura 6). El diesel es succionado e impulsado hacia el quemador con la ayuda de una bomba, la cual es regulada según los requerimientos de calor dentro de la cámara (Figura 13). Se hace pasar el aire por esta llama y una vez calentado es conducido directamente a la cámara de secado. El conducto en el cual se transporta el aire cuenta con un termómetro que mide la temperatura de salida del aire desde la fuente de calor. Se observó que el diseño de este dispositivo carece de un intercambiador de calor.

En el cuarto donde se encuentra el quemador de diesel están instalados los controladores marca Johnson Controls, los cuales brindan los datos de temperatura y humedad relativa constantemente (Figura 4). Estos datos fueron tomados cada media hora para monitorear el funcionamiento del horno.

6.1.1.2.2 Cámara de secado. Las dimensiones del cuarto de secado (Figura 7) son 11 pies de alto por 16 de ancho por 21 pies de fondo; consta de tres paredes de concreto, de las cuales las paredes laterales tienen como aislante térmico entre el concreto y un recubrimiento de madera, aserrín, que impide que se escape el calor lateralmente entre una cámara y otra. La capacidad instalada estimada para la cámara de secado fue de 10,000 pies tablares. La puerta está construida de aluminio con un relleno de espuma de poliuretano como aislante, la cual corre lateralmente sobre un riel aislado con caucho en la base y en el extremo posee una banda de hule para cerrar herméticamente (Figura 9).

El techo está construido con láminas de duralita y asbesto. Posee ventiladores de extracción para dar salida al aire cargado de humedad (Figura 10). En la parte superior se encuentran ubicados tres ventiladores reversibles marca Siemens, los que producen un flujo de aire caliente de 0.8m/s dentro de la cámara a través de las perchas de madera. Dentro de la cámara se encuentran los ductos que transportan el aire caliente desde la fuente de calor, también se encuentran ubicados los sensores de temperatura y humedad relativa (Figura 11). Cuenta con aspersores, los cuales sirven para inyectar humedad al sistema, sin embargo se observó que se requiere mejorar la calidad de difusores para reducir la partícula de agua y así obtener mejores resultados durante la etapa de acondicionamiento de la madera (Figura 12).

Figura 13.
Bomba de diesel



6.1.2 Diagnóstico del funcionamiento de los hornos

6.1.2.1 Calibración del medidor de humedad. Previo a cualquier muestreo realizado se hizo necesario calibrar el medidor de contenido de humedad, ya que es esencial contar con datos que proporcionen la humedad real de la madera, para poder hacer un análisis adecuado.

Cuadro 4. Dimensiones de los cubos de 2*2 y 3*3 pulgadas verdes y secos

| | Verde | | | | Seco | | | |
|---|---|------|------|--------|---|------|------|--------|
| | Cubos 2*2 (pulgadas³) | | | | Cubos 2*2 (pulgadas³) | | | |
| 1 | 5.28 | 5.28 | 5.32 | 148.31 | 4.95 | 5.05 | 5.34 | 133.49 |
| 2 | 5.23 | 5.21 | 5.31 | 144.69 | 5.02 | 4.89 | 5.34 | 131.09 |
| 3 | 5.22 | 5.17 | 5.3 | 143.03 | 4.97 | 4.90 | 5.29 | 128.83 |
| 4 | 5.20 | 5.25 | 5.31 | 144.96 | 4.91 | 4.99 | 5.28 | 129.36 |
| 5 | 5.15 | 5.26 | 5.18 | 140.32 | 4.89 | 5.02 | 5.33 | 130.84 |
| 6 | 5.14 | 5.3 | 5.34 | 145.47 | 4.86 | 5.07 | 5.32 | 131.09 |

Continuación Cuadro 4.

| | Verde | | | | Seco | | | |
|---|------------------------------------|------|------|--------|------------------------------------|------|------|--------|
| | Cubos 3*3 (pulgadas ³) | | | | Cubos 3*3 (pulgadas ³) | | | |
| 1 | 7.62 | 7.64 | 7.21 | 419.74 | 7.20 | 7.23 | 7.15 | 372.20 |
| 2 | 7.68 | 7.49 | 7.69 | 442.35 | 7.28 | 7.30 | 7.2 | 382.64 |
| 3 | 7.55 | 7.67 | 7.66 | 443.58 | 7.29 | 7.28 | 7.16 | 379.99 |
| 4 | 7.67 | 7.76 | 7.69 | 457.70 | 7.32 | 7.35 | 7.17 | 385.76 |
| 5 | 7.58 | 7.82 | 7.55 | 447.53 | 7.33 | 7.42 | 7.09 | 385.62 |
| 6 | 7.61 | 7.88 | 7.19 | 431.16 | 7.39 | 7.55 | 7.72 | 430.73 |
| 7 | 7.56 | 7.87 | 7.93 | 471.81 | 7.30 | 7.47 | 7.93 | 432.43 |

Fuente: Elaboración propia, 2004

Estos son los datos obtenidos para cada set de piezas utilizadas tanto para cubos 2 * 2 como para cubos 3 * 3 pulgadas. Se puede observar el cambio dimensional provocado por la pérdida de agua, que también afecta el peso de las muestras. El cambio dimensional es responsable de los defectos durante el secado de la madera como rajaduras, alabeos, combamientos, etc., por lo que es importante de considerar. El cambio dimensional observado durante el secado de piezas de *Pinus spp.* es el siguiente:

Cuadro 5. Cambio dimensional de muestras durante el secado

| <i>Pinus spp.</i> | Radial | Tangencial | Volumétrico |
|-------------------|--------|------------|-------------|
| | 4.6 % | 7.5 % | 12.3% |

Fuente: Elaboración propia, 2004

El 12.3% del cambio dimensional volumétrico es considerable y es esencial tomarlo en cuenta para reducir la manifestación de defectos, de los cuales no todos se producen necesariamente durante el proceso de secado, pero muchos se evidencian durante este período.

Cuadro 6. Porcentaje de humedad medido y densidad real

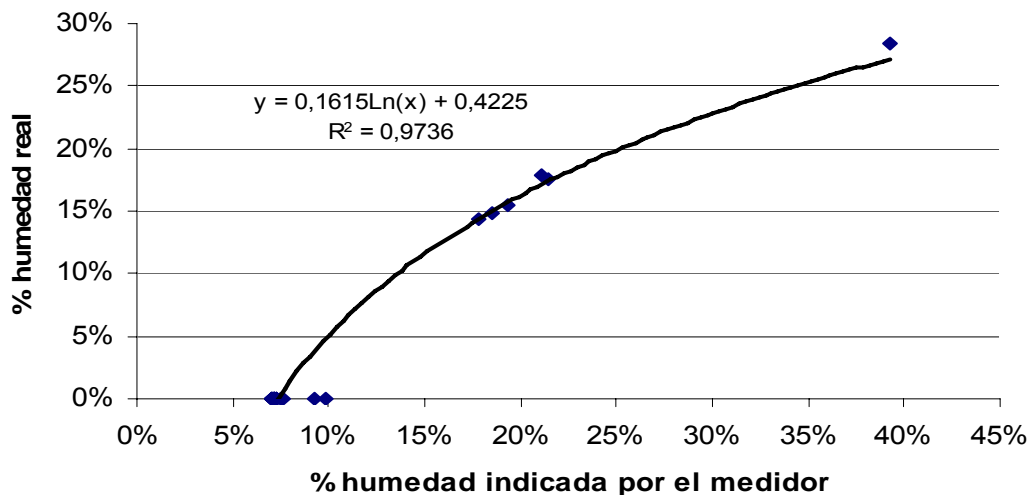
| Peso | | % Contenido de humedad | | | Densidad | |
|-------------|--------|-------------------------------|------|------------------------|-----------------|-----------------|
| 2*2 | | % H marcado por medidor | | Contenido Humedad real | Densidad real | Densidad húmedo |
| Verde | Seco | Verde | Seco | | | |
| 134.99 | 62.91 | 39.8 | 7.5 | 53% | 0.47 | 0.91 |
| 137.50 | 63.32 | 40.0 | 7.1 | 54% | 0.48 | 0.95 |
| 132.11 | 62.55 | 39.5 | 7.1 | 53% | 0.49 | 0.92 |
| 135.98 | 62.19 | 40.0 | 7.1 | 54% | 0.48 | 0.94 |
| 131.26 | 62.27 | 40.0 | 7.0 | 53% | 0.48 | 0.94 |
| 131.26 | 62.67 | 39.2 | 7.1 | 52% | 0.48 | 0.90 |
| 3*3 | | | | | | |
| Verde | Seco | Verde | Seco | Contenido Humedad real | Densidad real | Densidad húmedo |
| 271.18 | 194.25 | 38.2 | 7.0 | 28% | 0.52 | 0.65 |
| 437.41 | 192.10 | 40.0 | 7.2 | 56% | 0.50 | 0.99 |
| 426.29 | 191.67 | 40.0 | 7.1 | 55% | 0.50 | 0.96 |
| 416.38 | 191.84 | 40.0 | 7.1 | 54% | 0.49 | 0.91 |
| 444.98 | 190.77 | 40.0 | 7.0 | 57% | 0.49 | 0.99 |
| 458.17 | 196.69 | 40.0 | 7.3 | 57% | 0.45 | 1.06 |
| 440.65 | 213.77 | 38.9 | 7.3 | 51% | 0.49 | 0.93 |

Fuente: Elaboración propia, 2004

El Cuadro 6 muestra las variaciones del contenido de humedad con relación a su peso. Así mismo muestra la variación en la densidad, causada por los espacios intercelulares que se encuentran ocupados por agua. También muestra una diferencia de humedad marcada por el medidor, cuando la madera está verde como cuando llega a peso anhidro. A partir de este punto no se comporta linealmente sino obedece a una ecuación logarítmica. Se encontró dicha ecuación, la cual sirvió como factor de corrección de los datos brindados por el medidor a las muestras medidas, como se muestra en la Figura 14.

Figura 14

Correlación de humedad real y humedad marcada por el medidor



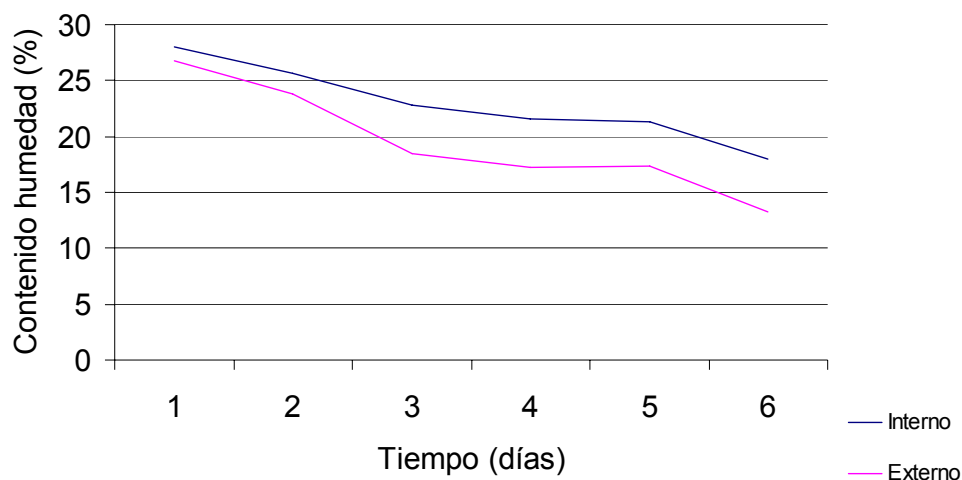
La Figura 14 muestra la correlación entre el contenido de humedad real y el contenido de humedad marcado por el medidor. El factor de correlación (R^2) es de 0.97, lo que indica una alta correlación entre las mediciones realizadas por el medidor y los datos de humedad real obtenidos en el laboratorio. También muestra la ecuación que correlaciona con mayor exactitud los datos obtenidos. El medidor se programa para la especie 2, la cual se asemeja más a las especies de pino comercializadas por el aserradero en cuanto a propiedades físicas. Un factor que es limitante para estimar la medición real y poder correlacionarlo con el contenido de humedad marcado por el medidor, es la distancia a la cual se introducen las puntas aisladas del aparato, ya que a medida que las puntas se acercan al centro de la pieza el contenido de humedad aumenta y mantener la misma profundidad a la que penetran las puntas en la madera es muy complicado. De manera general los datos que proporciona el medidor son una tendencia bastante precisa de la humedad contenida en la madera.

En la Figura 14 la ecuación $y = 0.1615 \ln(x) - 0.4225$ sirve como factor de corrección de las medidas proporcionadas por el medidor utilizado, donde (y) corresponde al contenido de humedad real y (x) es el contenido de humedad marcado por el medidor de humedad.

6.1.2.2 Funcionamiento de los hornos. Esta fase del estudio fue importante ya que brindó información que facilitó la implementación de la metodología de evaluación de la eficiencia.

Figura 15

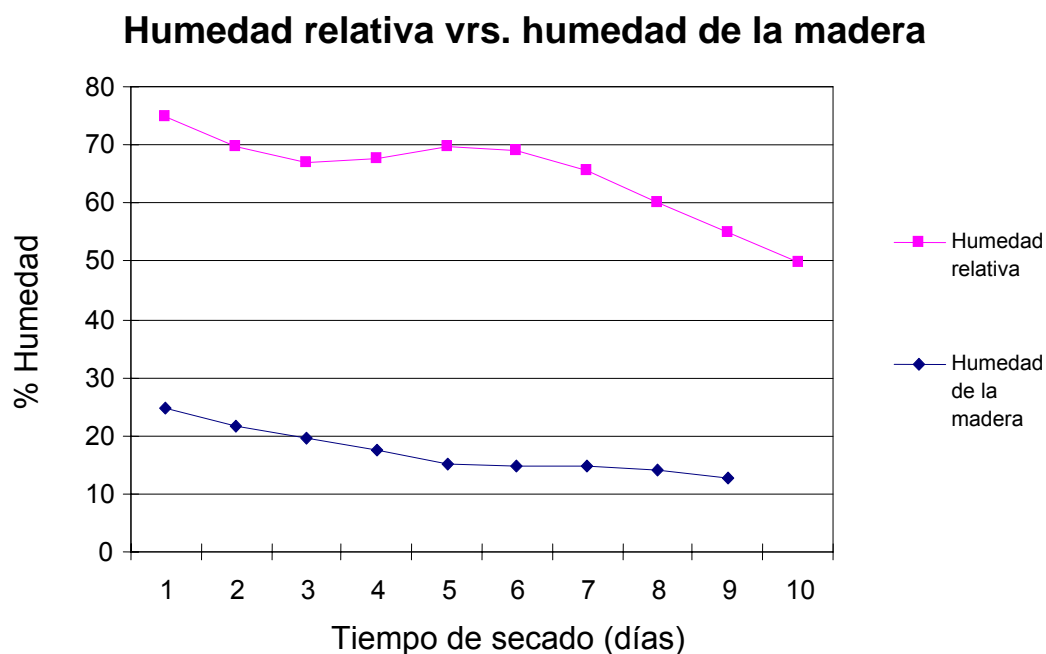
Curvas de secado para horno dependiendo de la ubicación de las piezas



La Figura 15 muestra como el proceso de secado es ligeramente afectado por su ubicación dentro del horno, ya que en un mismo lote, con piezas de igual dimensión y con contenidos iniciales de humedades similares, la tasa de pérdida de humedad es diferente y se hace evidente a medida que la madera pierde humedad. La velocidad de secado de la percha ubicada en los extremos alcanza contenidos de humedad más bajos en el mismo período de tiempo. Éste es un resultado importante ya que indica una falta de uniformidad en el secado de la

madera en la cámara de secado. Esto debido principalmente al flujo de aire, el cual es constante y con mayor velocidad en los extremos que en las perchas que se encuentran en el interior, a pesar de tener un espaciado adecuado.

Figura 16

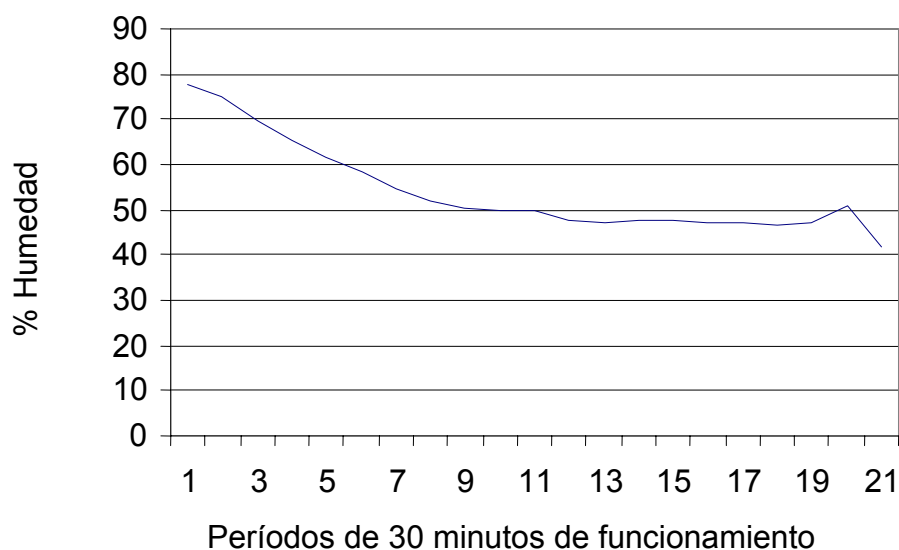


En la Figura 16 se observa el movimiento que sufre la humedad, ya que a medida que la madera se va secando y pierde humedad, dicha humedad se va inyectando al sistema y queda atrapada en el cuarto de secado, lo cual hace necesaria la extracción de humedad durante las diferentes etapas. Indicando que la humedad en el sistema fue removida periódicamente.

6.1.2.3 Horno - leña

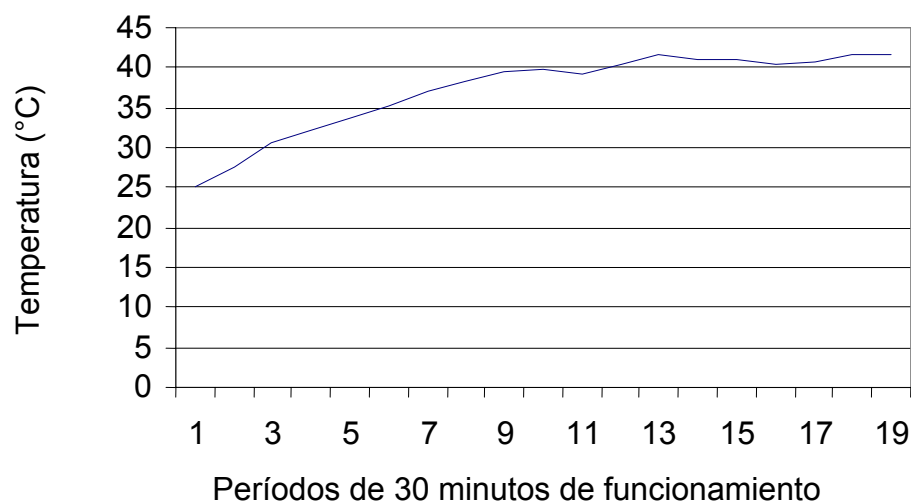
Figura 17

Pérdida de humedad en horno - leña



La Figura 17 muestra el descenso de humedad relativa dentro de la cámara de secado del horno de leña, durante once horas de funcionamiento, mostrando una pendiente marcada durante las primeras horas del día. Se aplicó la mayor temperatura posible que pudiera brindar el horno, previo a que la madera alcanzara el punto de saturación de la fibra (contenido de humedad $\geq 30\%$), para retirar la mayor cantidad de agua posible, esta es la etapa que mayor energía demanda el sistema, antes de alcanzar el punto de saturación de la fibra en la madera, para posteriormente remover el agua higroscópica.

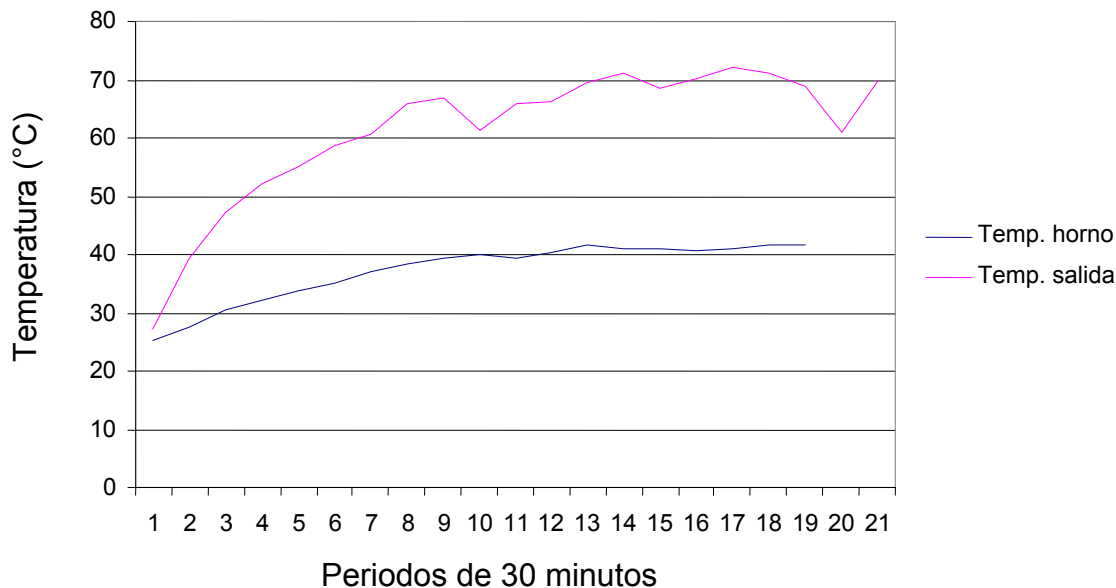
Figura 18

**Ascenso de temperatura promedio de
horno - leña**

La Figura 18 muestra el ascenso de temperatura dentro de la cámara de secado del horno de leña. Este aumento de temperatura es bastante lento, debido a que es difícil mantener una cantidad igual de leña y que ésta a su vez oferte la misma cantidad de calor al sistema, el cual es alimentado manualmente. El intercambiador de calor que posee la fuente de calor tampoco ayuda a hacer efectivo el calentamiento del aire que ingresa a la cámara. Además se pudo observar un punto de saturación, en el cual a pesar de que se le agregó una mayor cantidad de leña, la temperatura no aumentó más, lo cual puso de manifiesto la limitante del diseño impidiendo alcanzar temperaturas más elevadas.

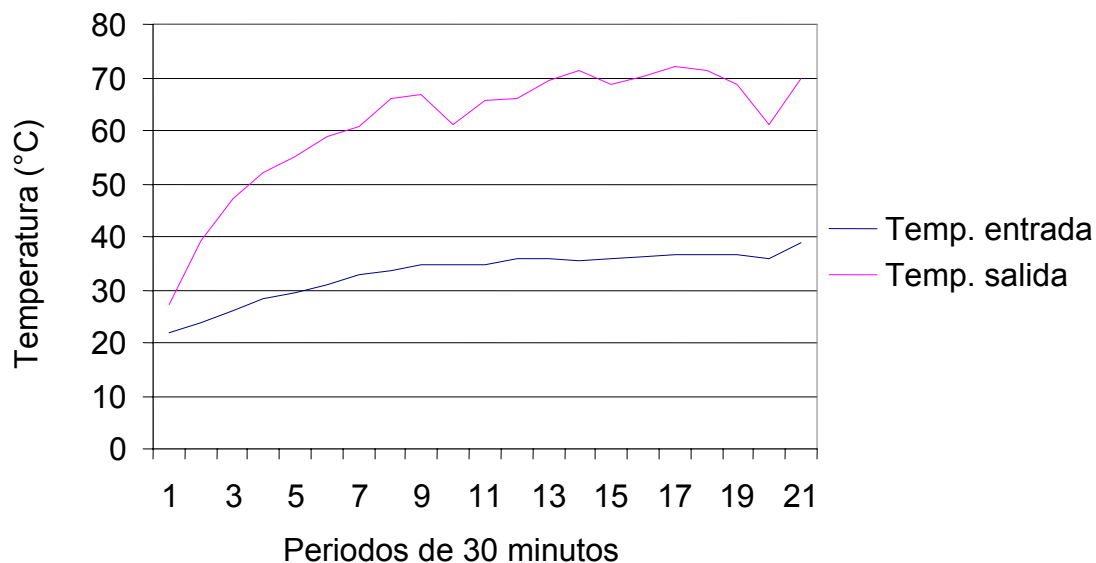
Figura 19

Temp. salida vrs. temp. horno



La Figura 19 muestra la relación entre la temperatura del cuarto de secado y la temperatura a la cual sale el aire calentado por la caldera, lo que indica con claridad que toda el área entre la curva de temperatura de salida del aire y la temperatura del horno es pérdida de energía que no se hace efectiva en la cámara de secado, ya que en el caso del horno alimentado con leña, la distancia entra la fuente de calor y la cámara de secado es relativamente grande, lo que constituye una mayor probabilidad de pérdida de calor, aunque los ductos se encuentran aislados térmicamente. Otro aspecto de gran importancia que explica la pérdida de calor, el cual debería ser transportado por el aire hacia la cámara de secado, es el diseño del intercambiador de calor, ya que hace que el proceso sea ineficiente abarcando un área pequeña para que se dé el intercambio de calor.

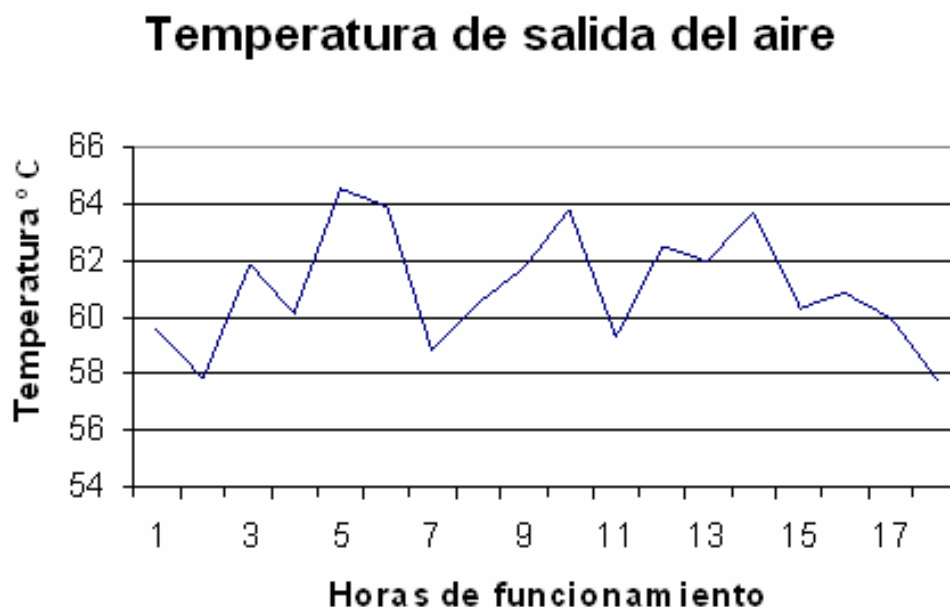
Figura 20

Temperatura entrada vrs. temperatura salida

En la Figura 20 se puede observar la capacidad que la caldera del horno alimentado con leña posee para calentar el aire ingresado a temperatura ambiente, ya que el área entre la curva de temperatura de salida y la temperatura de entrada muestra una diferencia de temperaturas de 30 grados Celsius en promedio, lo cual constituye la energía entregada por el sistema para el calentamiento del aire que ingresa a la cámara de secado. La temperatura del aire que entra a la cámara también se ve afectada por el efecto de convección que tiene el entorno de la fuente de calor, de esta manera se puede decir que a medida que aumenta su temperatura el horno también aumenta la temperatura del aire que se encuentra rodeándolo. Por esta razón se observa una curva irregular para la temperatura del aire que entra a la caldera.

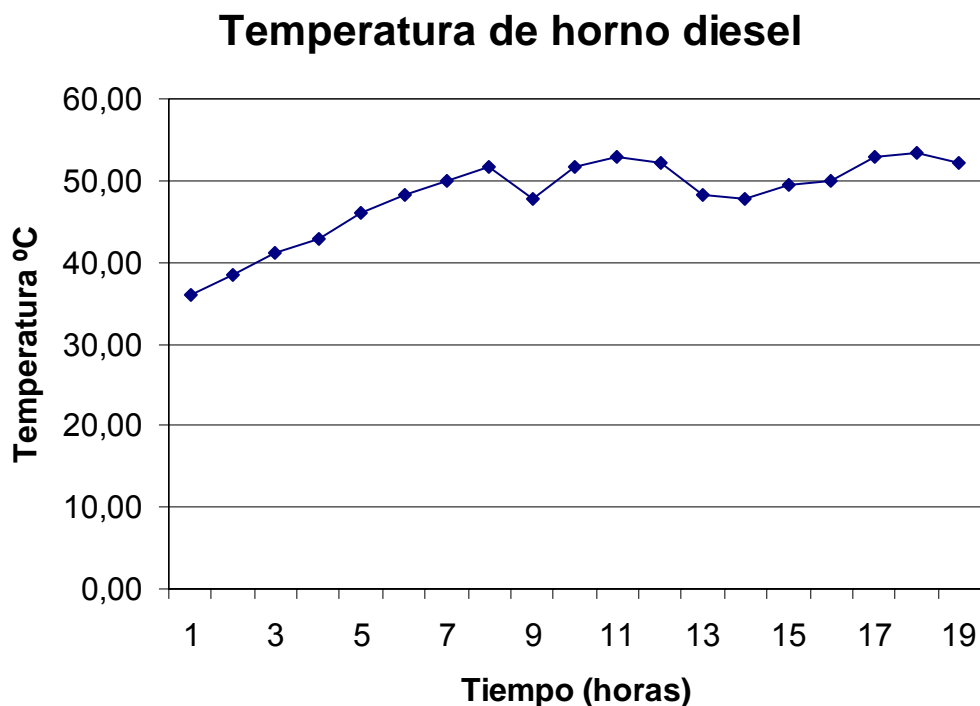
6.1.2.4 Horno - diesel

Figura 21



En la Figura 21 aparentemente se observa demasiada fluctuación en las temperaturas registradas, pero en realidad el rango en el que oscilan es bastante pequeño, ya que la oscilación de temperaturas es de 5 grados Celsius aproximadamente, a excepción de los momentos en que se apaga y se enciende el horno. Esta oscilación es muy pequeña tomando en cuenta la variación de temperatura ambiental durante un periodo de 18 horas. Esto también corresponde al diferencial de temperaturas con el que funcionan los controladores del horno. Este horno tiene un aumento de temperatura acelerado con una oscilación pequeña que corresponde principalmente al sistema de control con el que cuenta, ya que al alcanzar cierta temperatura desconecta el sistema y al disminuir a cierta temperatura lo reactiva, mecanismo que no puede ser empleado en el horno de leña debido a que es alimentado manualmente. Lo cual a su vez indica un funcionamiento bastante constante en cuanto a las temperaturas observadas dentro de la cámara de secado.

Figura 22



La Figura 22 muestra el aumento de temperatura rápido del horno y su llegada a un punto constante de calentamiento. El pico que se observa seguramente corresponde a un aumento en la temperatura regulado por los controladores, mostrando una variación no mayor de 5 °C, correspondiente a los “set points” predeterminados para su funcionamiento. Luego se observa una curva relativamente constante.

6.2 Eficiencia del proceso de secado de la madera

6.2.1 Muestreo para el control de secado. Se realizó el muestreo en los hornos alimentados con leña y diesel, obteniendo por cada corrida un promedio de 8 muestras, ya que se calculó que la capacidad máxima instalada de cada cámara de secado es de 10,000 pies tablares.

Figura 23.

Imagen de la rotulación y dimensiones de una muestra



Figura 24.

Impermeabilización de los costados de una muestra



6.2.2 Determinación del contenido de humedad

Cuadro 7.

Contenido de humedad y peso seco de muestras en el horno - leña

| | Lotes de muestras | Peso verde (g) | Peso seco (g) | Dimensiones (cm) | Peso de agua (g) | Contenido de humedad | Volumen húmedo | Densidad real |
|-----------|-------------------|----------------|---------------|------------------|------------------|----------------------|----------------|---------------|
| | Lote A | | | | | | | |
| Corrida 1 | Muestras 1 | 223.39 | 194.56 | 2.9*5.5*15 | 28.83 | 14.81 | 207.35 | 0.94 |
| | Lote B | | | | | | | |
| | Muestras 1 | 251.73 | 213.88 | 2.8*5.4*16 | 37.85 | 17.69 | 241.92 | 0.88 |
| Corrida 2 | Lote C | | | | | | | |
| | Muestras 1 | 126.48 | 107.31 | 2.6*4.5*22 | 19.17 | 17.86 | 257.40 | 0.41 |
| | Lote D | | | | | | | |
| | Muestras 1 | 178.19 | 148.19 | 2.9*5.0*23.7 | 30.0 | 20.24 | 343.65 | 0.43 |

Fuente: Elaboración propia, 2004

El Cuadro 7 presenta los resultados de los lotes de muestras ubicados en el horno-leña, cada lote de muestras corresponde a dimensiones determinadas.

Cuadro 8.

Contenido de humedad y peso seco de muestras en el horno- diesel

| | Lotes de muestras | Peso verde (g) | Peso seco (g) | Dimensiones (cm) | Peso de agua (g) | Contenido de humedad | Volumen húmedo | Densidad real |
|-----------|-------------------|----------------|---------------|------------------|------------------|----------------------|----------------|---------------|
| | Lote A | | | | | | | |
| Corrida 1 | Muestras 1 | 124.20 | 103.39 | 2.5*5*22 | 20.81 | 20.12 | 185.62 | 0.55 |
| | Muestras 2 | 143.15 | 122.92 | 2.5*5*22 | 20.23 | 16.45 | 181.87 | 0.67 |
| | Lote B | | | | | | | |
| | Muestras 1 | 241.80 | 203.03 | 2.5*3.7*24 | 38.77 | 19.09 | 356.4 | 0.56 |
| | Muestras 2 | 198.70 | 175.03 | 2.5*3.5*23.8 | 23.67 | 13.52 | 367.5 | 0.47 |
| | Lote C | | | | | | | |
| | Muestras 1 | 74.62 | 59.01 | 1.8*4.5*20 | 15.61 | 26.45 | 130.53 | 0.45 |
| | Muestras 2 | 149.23 | 118.21 | 2.6*4.7*19 | 31.02 | 26.24 | 193.05 | 0.61 |

| Corrida | Lote D | | | | | | | |
|---------|------------|--------|-------|----------|-------|-------|--------|------|
| 2 | Muestras 1 | 113.68 | 87.0 | 2.2*5*15 | 26.68 | 30.66 | 162.8 | 0.53 |
| | Muestras 2 | 106.26 | 90.60 | 2.6*6*15 | 15.66 | 17.28 | 184.10 | 0.49 |

Fuente: Elaboración propia, 2004

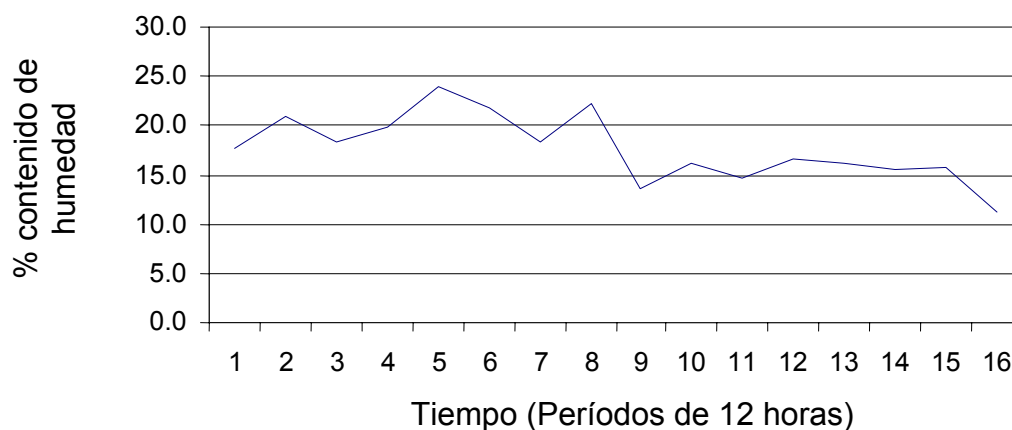
El Cuadro 8 presenta los resultados de los lotes de muestras ubicados en el horno-diesel, cada lote de muestras corresponde a dimensiones determinadas.

6.2.3 Evaluación de la eficiencia de los hornos. Como parte de la evaluación de la eficiencia de los hornos se monitoreo la velocidad del viento dentro de la cámara de secado en diferentes puntos y se obtuvo una media de 0.8 mts/seg, para ambos hornos, ya que cuentan con el mismo equipo de ventilación. Se observó que el estibado de las piezas y el espaciamiento entre las perchas era el adecuado, así como su orientación dentro de la cámara de secado. Para esta evaluación también se tomó en cuenta el contenido de humedad de la madera durante el proceso de secado.

6.2.3.1 Horno - leña

Figura 25

Contenido de humedad de muestras puestas a secar en horno - leña

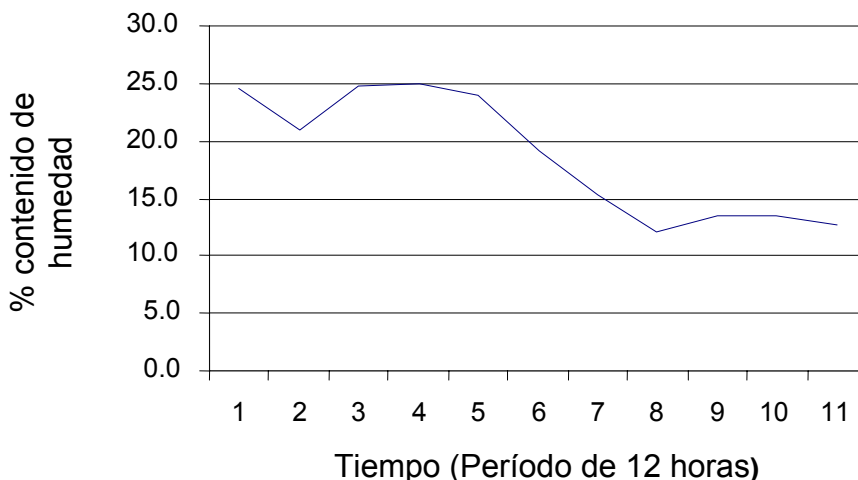


La Figura 25 muestra en un período de ocho días (ya que se hicieron dos mediciones diarias hasta que la madera salió del horno), cómo la madera perdió humedad con el programa de secado implementado. Se hizo un conteo de los daños más evidentes observados y se obtuvo que un 8.7% de las piezas puestas a secar tenían algún tipo de defecto. Se observó que este horno es capaz de secar a una razón de aproximadamente el 2% diariamente a partir del momento en que la madera tiene un máximo del 25% de humedad.

6.2.3.2 Horno - diesel

Figura 26

Contenido de humedad de muestras puestas a secar en horno - diesel

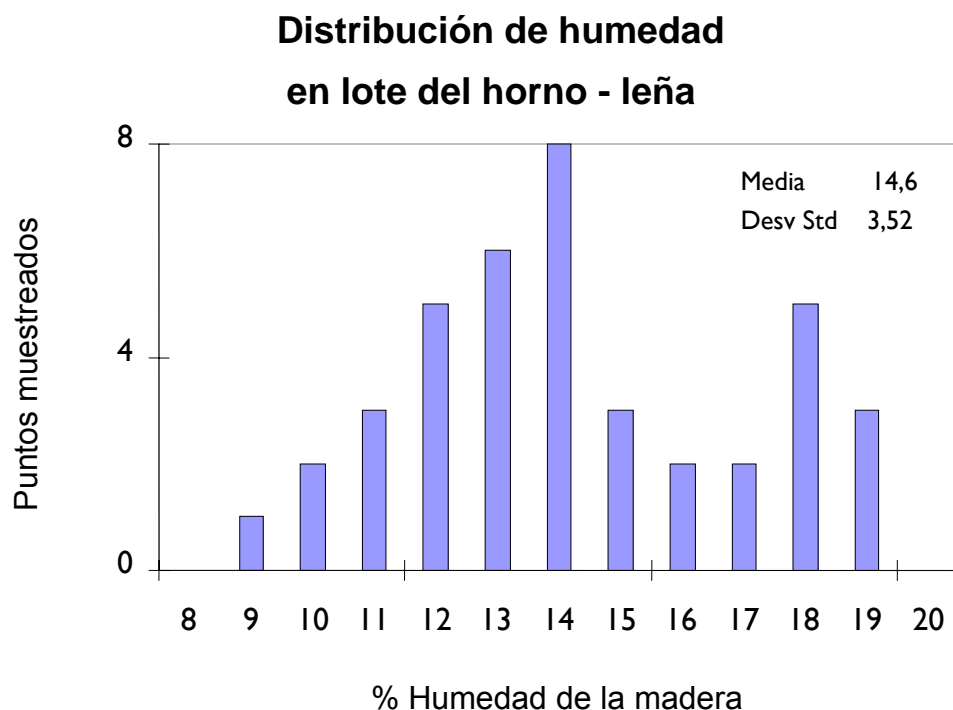


La Figura 26 muestra en un período de cinco días y medio (ya que se hicieron dos mediciones diarias hasta que la madera estuvo seca) la pérdida de humedad, durante la aplicación del programa de secado. También se hizo un conteo de los daños más evidentes observados y se obtuvo que un 10.4% de las piezas puestas a secar tenían algún tipo de defecto. Este horno es capaz de secar a una razón de aproximadamente el 3% diario a partir del punto en que la madera tiene un máximo del 25% de humedad.

En la comparación de los resultados de ambos hornos se pudo observar que las piezas de madera que entraron al horno - diesel tenían un porcentaje de humedad mas elevado y fueron secadas en un menor tiempo. Las muestras del horno - diesel alcanzaron un contenido de humedad 1.3% menor que las piezas que se encontraban en el horno de leña, por lo tanto se pudo observar que el horno de diesel es más eficiente que el horno de leña secando madera en condiciones similares.

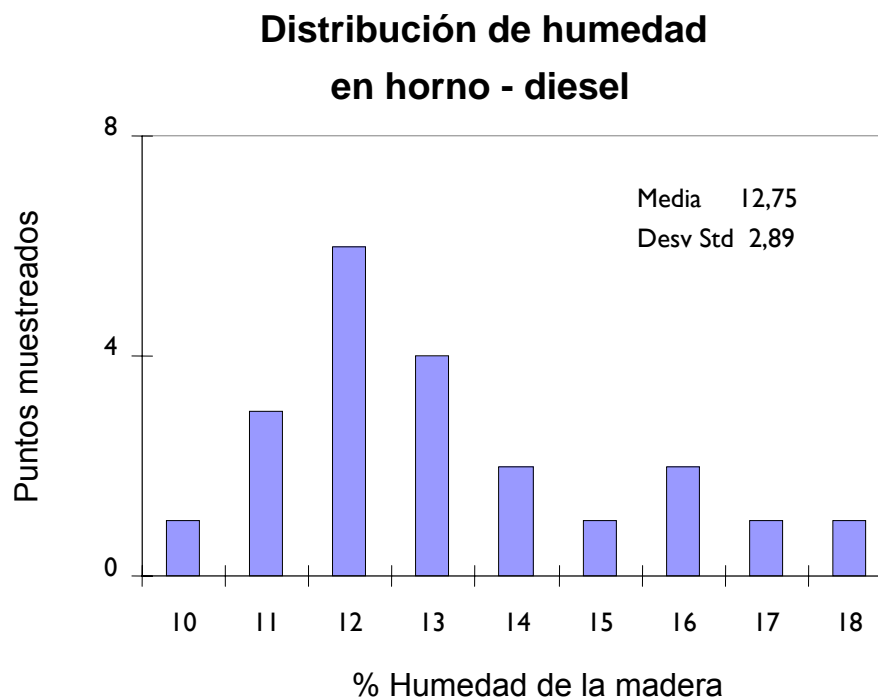
6.2.4 Análisis estadístico de la eficiencia de los hornos. Esta prueba sirvió para analizar la variabilidad del porcentaje del contenido de humedad durante el proceso de secado, la cual se realizó por períodos iguales de tiempo. Esto es un indicador de la eficiencia del secado en términos de homogeneidad.

Figura 27



En los resultados que muestra la Figura 27 se puede observar que existe cierta heterogeneidad en el secado de las piezas puestas en el horno alimentado con leña, en la cual se obtuvo una media de porcentaje de humedad del 14.6% y una desviación estándar de 3.52.

Figura 28



Los resultados obtenidos por el análisis estadístico, demuestran que existe una diferencia entre los contenidos de humedad observados en el horno alimentado con leña y el horno alimentado con diesel. El contenido de humedad promedio es más bajo (12.75%) y la desviación estándar muestra una mayor homogeneidad, ya que la es 2.89.

6.3 Costos del proceso de secado de la madera

6.3.1 Determinación del costo unitario para secado de madera de pino. Se determinó que el consumo promedio de combustible para el horno - leña fue de

60 libras por hora a una razón de costo de aproximadamente 0.0027 quetzales la libra de leña.

El horno - diesel consume aproximadamente 0.70 galones de diesel por hora de funcionamiento a una razón de aproximadamente 17 Quetzales el galón de diesel. Con la estimación de estos datos sumado a la información proporcionada de los costos por parte de la empresa, se puede estimar un costo unitario del proceso de secado, tomando en cuenta que si este período de secado varía, el costo unitario también cambiará, así como el volumen de madera puesta a secar, establecido como 10,000 pies tablares que se determinó como capacidad máxima de la cámara de secado.

Para tal efecto se estableció el período de secado en el horno - leña un período de ocho días y en el horno - diesel un período de cinco días.

6.3.1.1. Horno - leña

Cuadro 9. Costos de insumos en horno – leña para secar un pie tablar

| Tipos de costos | Montacargas (Q) | Cuarto de secado (Q) | Mano de obra (Q) | Energía (Q) | Combustible (Q) | Totales (Q) |
|------------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------|------------------------|--------------------|
| Costos Fijos | 0.03 | 0.01 | 0.06 | 0.01 | | 0.11 |
| Costos Variables | 0.03 | | 0.01 | | 0.03 | 0.07 |
| Total (Q) | 0.06 | 0.01 | 0.07 | 0.01 | 0.03 | 0.18 |

Fuente: Elaboración propia, 2004

Podemos observar que a pesar de funcionar 8 días en promedio, para el secado de un lote de 10000 pies tablares y requerir mayor mano de obra, ya que se necesita alguien que alimente el horno cada media hora. El costo de secar madera en este horno es muy bajo porque a pesar de la cantidad de leña que requiere, el costo de la misma es bajo, debido a que el aserradero produce su propia leña. Se le asignó un costo a la leña en base al precio al cual se vende la

leña a personas ajenas a la empresa, lo que indica que tiene implícito el costo de oportunidad de venderla y con ese ingreso comprar otro combustible que funcione de manera similar a la leña. Este dato es importante ya que se planea también la utilización de la corteza de árbol como insumo energético y aunque este tiene una oferta calórica menor que la leña, su costo es casi nulo porque no tiene demanda en el mercado como fuente de energía.

6.3.1.2 Horno - diesel

Cuadro 10. Costos de insumos en horno - diesel para secar de un pie tablar

| Tipos de costos | Montacargas (Q) | Cuarto de secado (Q) | Mano de obra (Q) | Energía (Q) | Combustible (Q) | Totales (Q) |
|------------------|-----------------|----------------------|------------------|-------------|-----------------|-------------|
| Costos fijos | 0.03 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | | 0.08 |
| Costos variables | 0.03 | | 0.01 | | 0.17 | 0.21 |
| Totales | 0.06 | 0.01 | 0.04 | 0.01 | 0.17 | 0.29 |

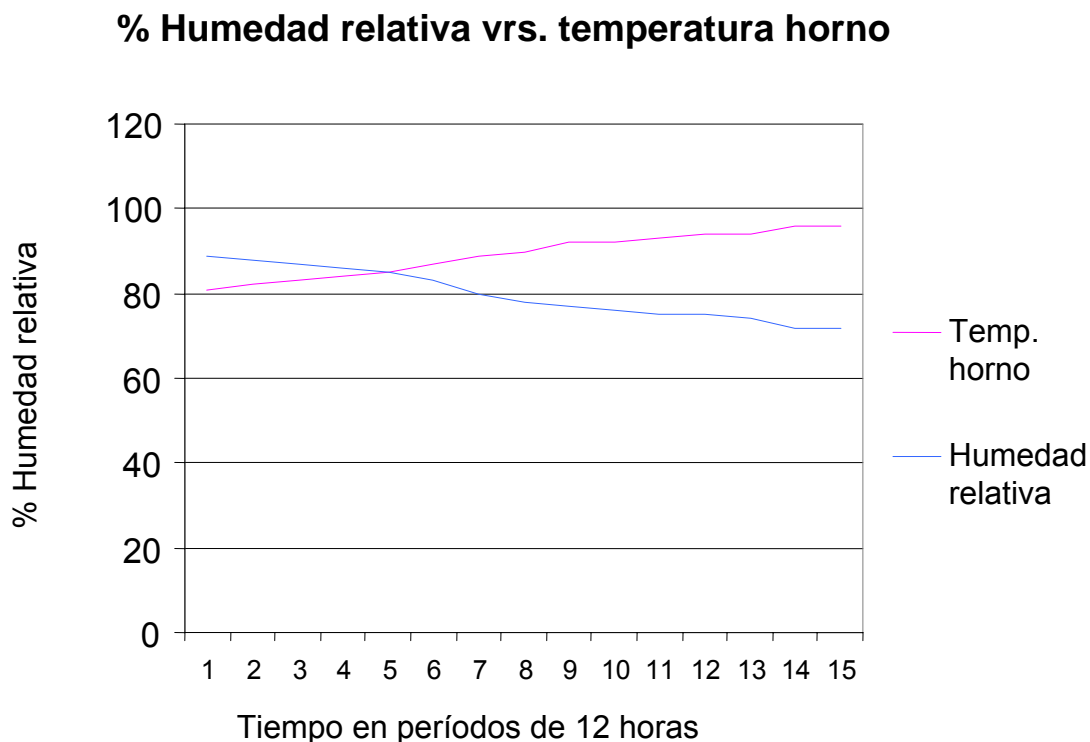
Fuente: Elaboración propia, 2004

El costo de secar madera en este horno casi duplica el costo de secarla en el horno de leña ya que el insumo que encarece este proceso es el diesel que es utilizado como combustible para generar calor. A pesar de funcionar solamente cinco días en promedio para secar un lote de madera y requerir menos mano de obra para su funcionamiento. El costo del combustible es muy alto y tiende a encarecerse con mayor velocidad que el resto de los insumos, por lo tanto para establecer un precio para el secado habría que hacer una proyección válida para un período largo de tiempo, con el fin de evitar hacer reajustes en períodos muy cortos.

El insumo que determina el costo del secado en el horno alimentado con diesel, es el mismo combustible. Estos costos podrían tener una alta rentabilidad mejorando la calidad del secado, debido a que las características de este horno lo hacen muy manejable, permitiendo tener un mejor control sobre el proceso.

6.3.2 Estimación del peso promedio por unidad de tiempo para alimentación del horno - leña

Figura 29



Se establecieron períodos de medición de cada media hora y se monitorearon variando constantemente la cantidad de leña suministrada en un rango de 5 libras superior y 5 libras inferior, dando una diferencia total de 10 libras, obteniendo como resultado una variación muy pequeña en el aumento de temperatura. La figura muestra las curvas de porcentaje de humedad relativa y temperatura observadas.

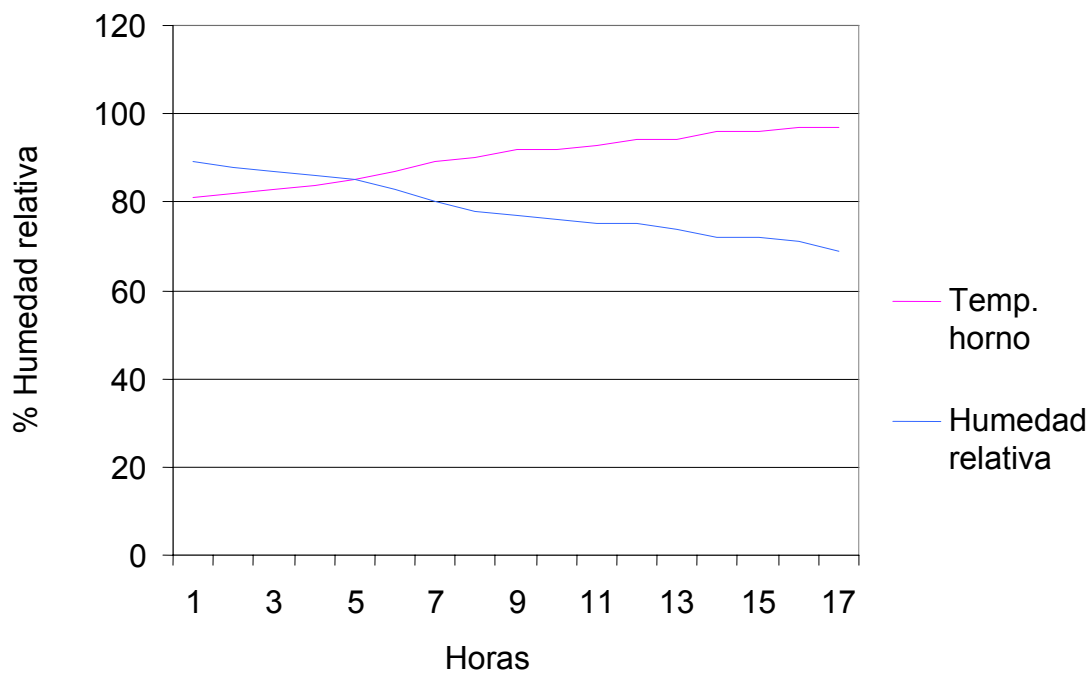
Se pudo observar que la leña seca era requerida en menores cantidades para obtener el mismo rendimiento energético que la leña húmeda, por lo cual resulta como una optimización de los recursos el uso de leña seca.

La madera sólida, marca una diferencia en cuanto a la cantidad de aumento en calor registrado en los termómetros de temperatura de salida, en comparación a las experimentaciones que se realizaron con corteza. De este hecho no se pudo elaborar un análisis concluyente debido a que en la mayoría de los casos la corteza de árbol contenía un alto porcentaje de humedad.

Se hizo una estimación de que la leña con aproximadamente un contenido de humedad menor al 30% (considerada seca), ya que este parámetro no fue medido. Su rendimiento fue de 15% más en comparación al peso de la leña húmeda, de la cual se estimó que tenía un contenido de humedad mayor al 50%.

Figura 30

**% Humedad Relativa vrs.
Temperatura de horno 2° experimento**



Para corroborar la validez de la afirmación anterior, se realizó otro experimento en el que se alimentó con una variación constante de leña en un rango de 10 libras superior y un rango de 10 libras inferior con lo cual se determinó un punto de saturación, o sea un máximo y un punto en el que la falta de leña se hizo sensible, o sea un mínimo.

Finalmente se suministró una cantidad constante de leña para tratar de registrar un cambio, pero en realidad durante la práctica de ambos ejercicios se observó que existe el fenómeno de la inercia termodinámica el cual promueve que la temperatura va a seguir creciendo en relación a la cantidad de combustible agregado, hasta llegar a un punto culminante y luego decrecerá con una rapidez mayor pero no instantánea (Bonille, 1993).

Por lo que se puede afirmar que una variación ligera (no mayor de 10 libras) en la cantidad de combustible, no afectará de manera significativa la curva de temperatura dentro del horno, pero la ausencia de combustible a partir del momento en el que éste haya sido totalmente consumido, sí marcará un descenso significativo en la temperatura.

Se logró determinar que la cantidad de combustible idónea promedio para que el horno funcione a las temperaturas relativamente constantes fue de 30 libras cada media hora, lo cual es importante para estimar las cargas de leña diarias (Figura 31) y también poder mantener un ascenso en la curva de la temperatura constante, ya que llega a un punto de saturación por arriba de una cantidad de 35 libras.

La leña “seca” pierde hasta un 34% de su peso en relación a la leña húmeda (Lacasa, 1991). Esta cantidad debe aumentarse por las mañanas, ya que es cuando el horno se encuentra frío y necesita una mayor cantidad de combustible para poder llegar a un punto en el cual funcione adecuadamente. Además por la mañana y durante las horas de la tarde la temperatura ambiental

generalmente es menor que durante el mediodía lo cual afecta en alguna medida la temperatura de funcionamiento del horno.

Figura 31. Carga de leña



6.4 Oferta y demanda calóricas durante el proceso de secado

Se estableció en base a la aplicación de formulas para determinar la termodinámica de los hornos en términos de oferta y demanda calóricas con parámetros globales de funcionamiento, debido a la dificultad que ofrece medir las fugas y pérdidas como variables de energía dentro del sistema. Por lo tanto este análisis ofrece un parámetro global de eficiencia energética de los hornos, o sea cuanta energía se requirió para llevar la madera a un contenido de humedad deseado y cuanta energía le fue suministrada con los distintos combustibles.

Se utiliza alrededor de un 64% de la energía total suministrada en la extracción de la humedad de la madera, luego es necesario un 17% de energía total como compensación por pérdidas durante el proceso, el 18% restante de la energía se utiliza en otros procesos como calentar la cámara de secado, calentar la madera húmeda y calentar el vapor de agua (Simpson, 1991).

Cuadro 11

| CARGAS TÉRMICAS Y DE RECONOCIMIENTO PARA SECAR 1M³ DE MADERA VERDE | | | |
|--|---------------------|-----------------------------|-----------------|
| <i>Carga / Combustible</i> | Unid. | Otras especies similares | <i>Pinus sp</i> |
| Carga térmica (sin considerar pérdidas) | Kcal/m ³ | 264,627 | 281,99 |
| Consumo de leña seca al aire (3,700 kcal/kg) | Kg/m ³ | 41.52 | 46.21 |
| Consumo de diesel (10,150 kcal/kg) | kg/m ³ | 26.07 | 27.78 |
| Consumo de diesel – (densidad 0.87) | Galones | 7.93 | 8.45 |

Fuente: Elaboración propia, 2004

La tabla muestra consumos menores de leña y diesel a los observados debido a que no se calcularon pérdidas de calor sino, solamente estimaron teóricamente. La oferta calórica brindada tanto por el diesel como por la leña son altamente eficientes bajo estas consideraciones, ya que no considera las fugas de calor durante el trayecto del aire caliente hacia la cámara de secado y mientras se encuentra en los quemadores la energía no es transmitida en su totalidad a este aire, lo cual es casi imposible de evitar. Este análisis en condiciones idealizadas brinda un parámetro de comparación para el funcionamiento de los hornos.

Cuadro 12

| EFICIENCIA ENERGÉTICA DE HORNOS ALIMENTADOS CON LEÑA Y DIESEL | | | |
|--|---------------|---------------|-------------|
| | Unid. | DIESEL | LEÑA |
| Carga de madera puesta a secar | Pies tablares | 10,000 | 10,000 |
| Porcentaje de humedad perdida durante secado | % | 16.88 | 14.21 |

Continuación Cuadro 12.

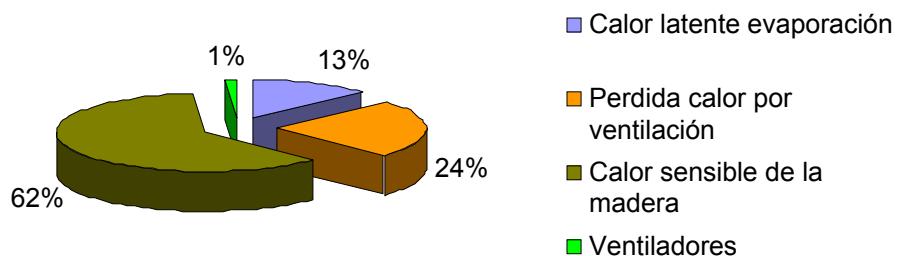
| | Unid. | DIESEL | LEÑA |
|--|----------|---------------|-------------|
| Cantidad de agua removida | Kg | 2189.33 | 1843.03 |
| Calor necesario para remover agua | KJ | 4,925,250 | 4,146,833 |
| Combustible requeridos | Kg | 240.97 | 1647.72 |
| Energía entregada por combustible | KJ | 10,942,674 | 18,029,709 |
| Eficiencia energética del horno | % | 69.9 | 42.7 |

Fuente: Elaboración propia, 2004

El Cuadro 12 presenta las eficiencias energéticas estimadas para cada horno, donde se puede observar que independientemente del tipo de combustible utilizado, se requirió una mayor cantidad de combustible en el caso del horno alimentado con leña para secar la misma cantidad de madera y remover una cantidad menor de agua. Esto se estimó considerando que el porcentaje de humedad contenido en la leña utilizada era del 40%, lo cual también tuvo un impacto significativo en la eficiencia del horno.

El horno alimentado con diesel tiene una eficiencia energética mayor y requiere una menor cantidad de combustible para secar la madera, considerando que la oferta calórica del diesel como combustible es mucho mayor que la oferta calórica proporcionada por la leña.

Figura 32.

Demanda energética

En esta gráfica se observan la composición de la demanda de energía calórica dentro de las cámaras de secado, que son requeridas para llevar a un 12 % de contenido de humedad final un lote de madera de 10000 pies tablares, considerando pérdidas como la generada por los ventiladores y otros factores que intervienen durante el proceso. El calor sensible de la madera, o sea el requerido directamente para secarla es el 62% de la demanda total energética.

VII. DISCUSIÓN

Se pudo observar que la construcción y el equipamiento de los hornos tienen algunas deficiencias para secar madera. En cuanto a la fuente de calor del horno- leña, se observó que cuenta con un intercambiador de calor que consta de 6 tubos con un diámetro de 10 cm cada uno en un área de aproximadamente un metro cuadrado. Lo cual refleja un defecto en el diseño ya que el área de transferencia de calor es bastante pobre. Probablemente por esta razón las temperaturas observadas en la cámara de secado no fueron las requeridas por el programa de secado. En relación a la fuente de calor del horno alimentado con diesel, se observó que en el diseño del mismo no se incluyó un intercambiador de calor, lo cual refleja una transferencia de calor pobre hacia la cámara de secado, limitando la capacidad del horno para alcanzar los requerimientos de temperatura establecidos por los programas de secado. En cuanto al equipamiento se observó que en lugar de difusores dentro de la cámara de secado, se cuenta con aspersores, los cuales brindan una partícula de agua demasiado grande que no puede ser evaporada fácilmente por la temperatura del sistema, provocando que se inyecte agua en forma líquida, mojando la madera cuando en realidad se requiere inyectar vapor de agua durante la etapa de acondicionamiento de la madera.

En el diseño de las cámaras de secado se podría considerar la construcción de una pequeña puerta en la parte posterior para facilitar la medición del contenido de la humedad de la madera sin necesidad de abrir la puerta frontal y provocar mayores pérdidas de calor.

A excepción de los puntos anteriormente señalados se considera que el resto de las condiciones y equipamiento que presentan los hornos para el secado de madera son adecuados.

Los hornos utilizados para esta investigación cuentan con medidores de temperatura y humedad relativa los cuales fueron monitoreados cada media hora, esto hizo posible tener un buen control y monitoreo sobre dichas variables.

Otro aspecto considerado, es el funcionamiento. En el caso del horno - leña no se pueden utilizar los controladores, debido a la forma de alimentación, haciendo compleja la sistematización de este horno, lo cual impide automatizar el proceso. En este sentido el horno - diesel resulta versátil y manejable porque es posible fijarle puntos de temperatura y humedad en los cuales se desea que trabaje. Lo que permite implementar programas de secado con mayor facilidad.

La velocidad del viento observada dentro de las cámaras de secado a través de las perchas fue 0.8 mts/seg en promedio, en los diferentes puntos observados, lo cual indica que existe un flujo de viento pobre, entorpeciendo el proceso de secado y haciéndolo carente de uniformidad, quizá una solución podría ser la reubicación de los ventiladores, ya que se considera que tienen la capacidad suficiente para proveer un flujo de viento adecuado. Tomando en cuenta que el apilamiento de las piezas, la ubicación de las perchas y el espaciado dentro de la cámara de secado son adecuadas para obtener el flujo de aire deseado.

La fase en la que se realizó el sondeo fue de gran importancia debido a que previo a realizar la evaluación de la eficiencia de cada horno, se pudo conocer su funcionamiento de manera general y evitar sesgos en la toma de datos.

Para conocer los porcentajes reales de humedad en la madera muestreada, fue necesario hacer una calibración al medidor de humedad utilizado. Entre las especies que tiene programadas el medidor, no tiene programadas ninguna de las especies comercializadas por el aserradero. Por lo tanto se tomó una especie que tuviera programada el medidor parecida en

cuanto a peso específico al de las especies de pino comercializadas en el aserradero y se hizo una calibración. Por medio de una expresión matemática mostrada en la Figura 14 se determinó un factor de corrección para el medidor de humedad y obtener datos de humedad reales.

El cambio dimensional mostrado en el Cuadro 5, es un factor que debe ser tomado en cuenta durante el proceso de secado. Se observó un cambio dimensional de 12.3% sufrido por las piezas puestas en la mufla para llevarlas a un contenido de humedad igual a cero. Este porcentaje de cambio dimensional es una porción considerable del volumen total, el cual muchas veces se hace evidente en forma de defectos. Con este dato se pudo observar que el pino muestra poca estabilidad dimensional con respecto a otras especies.

Otro factor de importancia en la toma del porcentaje de humedad de las muestras, fue la difícil estandarización de la profundidad con que deben penetrar las puntas del medidor, ya que este pequeño detalle da una variación en los porcentajes de humedad.

Durante esta etapa se observó que el flujo de viento es pobre en las cámaras de secado, como se mencionó anteriormente, lo cual sirvió para distribuir las muestras en las cámaras de secado con un mejor criterio. Se observó que las piezas que se encontraban en los extremos tenían aproximadamente 5% menos humedad que las piezas de las perchas ubicadas en el centro donde el flujo del viento es menor. Debido a que este fenómeno lo tienen en común ambos hornos, se le atribuye a la ventilación y no a factores como oferta calórica, siendo el flujo de aire el factor más importante para que el calor sea transportado de manera uniforme en toda la cámara de secado.

Esta fase también permitió constatar la relación de la humedad relativa y la humedad contenida en la madera, previo a la implementación del programa de secado, lo que evidenció que la capacidad de extracción de humedad en ambas

cámaras es eficiente. Esto fue esencial constatarlo para la implementación de los programas de secado, que dependen básicamente del manejo de temperaturas y humedades relativas.

Se observó que la diferencia entre la temperatura de salida del aire de la caldera del horno - leña y la temperatura de la cámara de secado mantuvieron una diferencia mayor a los 15 grados Celsius, lo cual demuestra pérdidas grandes de energía, que se deben probablemente a fugas en los ductos que transportan aire caliente. Además la fuente de calor se encuentra a una distancia mayor de la cámara de secado que en el caso del horno - diesel, dando lugar a que haya una mayor cantidad de fugas. Por el contrario en el horno - diesel la distancia es muy corta lo que le da una mayor eficiencia a la fuente de calor para elevar la temperatura en la cámara de secado.

La implementación del programa de secado que muestra el Cuadro 1 se hizo con el fin de poder tener un parámetro de comparación entre la eficiencia de los hornos, siendo éstos sometidos a condiciones similares de manejo. Los tiempos y las condiciones de secado varían de acuerdo a una extensa serie de factores, el fin de un programa de secado es regularizar estos factores. Para ello se utilizó lotes de madera similares en cuanto a grosor, siempre usando madera de pino para poder estandarizar al máximo las condiciones de manejo, realizando así una comparación que tuviera validez. Sin embargo ninguno de los hornos muestreados alcanzó las temperaturas requeridas por el programa de secado mostrando una deficiencia grande en este aspecto.

Esta dificultad, observada en la implementación del programa de secado en el horno - leña es debida a dos factores principalmente; el primero que la alimentación dada a este horno por los operarios no es constante, provocando desajustes en las mediciones y el segundo aspecto fue que no se pudo alcanzar las temperaturas establecidas por el programa de secado, ya que la transferencia de calor en este horno es muy pobre y a pesar de agregarle

mayores cantidades de leña no hubo un aumento en la temperatura. A pesar de ello se continuó con el programa establecido, manejando con mejores resultados la variable de la humedad relativa.

El horno - diesel alcanzó las temperaturas deseadas en los primeros cuatro pasos del programa de secado, con un mejor desempeño que el observado en el horno - leña, aunque en fases posteriores tampoco fue capaz de alcanzar las temperaturas requeridas. Una de las razones a las que se le puede atribuir la diferencia de temperaturas entre ambos hornos, es que en el horno - diesel la fuente de calor es directa, mientras que en el horno - leña el recorrido para que el calor llegue a la cámara de secado es mucho mayor, lo cual produce mucho mayores pérdidas de energía, además el tipo de alimentación del combustible es constante. No obstante este horno carece de un intercambiador de calor lo cual también lo limita grandemente en cuanto a la eficiencia energética.

La temperatura y la humedad relativa fueron fácilmente establecidas para cada paso con ayuda de los controladores del horno - diesel, los cuales se encuentran funcionando adecuadamente. Se considera que el programa de secado elegido no estuvo acorde a las capacidades de los hornos, sin embargo el que mejor desempeño mostró fue el horno - diesel.

Al evaluar la eficiencia de los hornos se pudo observar que bajo las condiciones establecidas por el programa de secado, el horno - leña fue capaz de secar a razón de un 2% diario aproximadamente, en períodos de 8 días a partir de un contenido máximo de humedad del 25%, lo cual muestra un desempeño regular al no poder alcanzar en su totalidad las condiciones requeridas. También se pudo observar que hubo un 8.7% de defectos en la madera secada en este horno, estos defectos son difíciles de cuantificar ya que no todos son producidos por el secado propiamente dicho, sino sucede que en esta etapa se hacen evidentes otra serie de defectos con otro origen, tales como

madera con demasiada tensión y madera que ha sufrido malos cortes. No se hizo un recuento de daños de la madera previo a ser ingresada a la cámara de secado, lo cual permitiría tener información más precisa de este aspecto.

La Figura 25 muestra la forma en que la madera fue perdiendo el contenido de humedad dentro de la cámara del horno de leña, y se puede observar que hay una serie de fluctuaciones, las cuales se deben probablemente a que estos hornos son apagados durante la noche y son completamente cerrados. Cuando se hicieron las mediciones por las mañanas es posible que algunas muestras hayan recuperado durante la noche, parte de la humedad perdida durante el día, y con ello quede explicado ese comportamiento que muestra la figura.

En el horno - diesel se observó una pérdida de humedad del 3% en las muestras a partir de un 25% de contenido de humedad y un porcentaje de defectos del 10.4%, esto indica que su capacidad para secar es mayor, ya que se lograron porcentajes más bajos de humedad en un período de 5 días.

La Figura 26 muestra un comportamiento bastante uniforme en cuanto a la pérdida de humedad en la madera, probablemente se debe a que la cantidad de remover humedad durante el período de funcionamiento del horno, es bastante mayor que las piezas que se encontraban en el horno - leña y por lo tanto su capacidad de reabsorber humedad durante las noches era mucho menor. Los períodos diarios de funcionamiento de ambos fueron muy similares.

Una mayor cantidad de daños observada en las piezas que se encontraban en el horno de diesel puede deberse a que el programa de secado elegido exigía más allá de las capacidades de los hornos, y en este horno se observaron temperaturas más elevadas que en el horno - leña, sometiendo a mayor estrés la madera. Además los porcentajes de humedad obtenidos en las piezas que se encontraban en el horno - diesel fue menor, dando lugar a una

mayor incidencia de defectos. Las piezas que se encontraban en el horno - diesel se encontraban con el 1.3% de humedad menos que las piezas ubicadas en el horno de leña.

Las piezas que entraron al horno - diesel se encontraban con un porcentaje de humedad inicial ligeramente mayor que las piezas que ingresaron al horno de leña. Esta fue una variable que no fue posible controlar, de esta manera se hubiese tenido un mejor parámetro para el análisis comparativo.

Otro parámetro utilizado para medir la eficiencia de los hornos fue la homogeneidad con la cual están secando la totalidad del lote. Basándose en los puntos muestreados se hizo un análisis de la desviación estándar y la media para conocer la variabilidad del secado dentro de los hornos. En el horno alimentado con leña, se obtuvo una media de porcentaje de humedad del 14.6% y una desviación estándar de 3.52, mayor en cuanto a contenido de humedad y variabilidad observadas en el horno alimentado con diesel, en el cual el contenido de humedad promedio es más bajo (12.75%) y la desviación estándar muestra una homogeneidad mayor 2.89. Esto se atribuye principalmente a que la alimentación de la leña es manual y no siempre es constante, además del estado de la misma. Otro factor que afecta a los dos hornos por igual es el flujo de aire pobre observado.

En cuanto a los costos del horno de leña se observó que fueron de 0.18 quetzales por el secado de un pie tablar de madera de pino. A pesar que este horno incluye el costo adicional de la mano de obra de la persona que alimenta el horno y que esto incluye el costo de oportunidad de la utilización de la leña producida en el aserradero. Para determinar el costo de oportunidad de la leña producida por el aserradero, se equiparó la leña utilizada por el horno a un volumen vendido a personas ajenas al aserradero, con ello se estimó el precio de la leña utilizada, inicialmente en base al volumen y posteriormente a su peso.

En los costos del horno de diesel se observó que fueron de 0.29 quetzales el valor de los insumos para secar un pie tablar de madera de pino, ya que el insumo que mayor incidencia tiene sobre este costo es el precio del diesel, sin embargo se considera que con el uso de este horno se pueden alcanzar menores contenidos de humedad en menor tiempo. Esto permite aumentar el precio de venta de la madera seca e incrementar el flujo de capital para reinvertirlo en el proceso.

En la comparación de los costos de ambos hornos, se considera que el uso del horno - diesel puede brindar mayor rentabilidad por la velocidad del secado que se puede obtener. En el caso del horno - leña un aspecto que no fue tomado en cuenta en la estimación de costos, fue el costo que conlleva el riesgo del manejo de este horno. Sin embargo este horno provee una buena oportunidad para optimizar los recursos que tiene el aserradero, ya que los desechos de la planta sirven como combustible de este horno y el costo de alimentarlo es muy bajo. En un futuro se plantea utilizar la corteza de árbol como combustible, lo cual reduciría aun más los costos de funcionamiento de este horno.

Se observó que la carga de leña necesaria para una combustión adecuada en las calderas fue de 30 libras cada media hora, para mantener un nivel constante en la curva de temperatura del horno - leña. Se observó influencia negativa de los altos porcentajes de humedad en la leña para combustible directo, ya que el alto contenido de agua en la leña impide una combustión adecuada y emplea gran cantidad de su energía en la evaporación del agua que contiene. Por lo que se considera que una buena alternativa es un presecado en el patio para mejorar el rendimiento por carga de leña. Además al perder humedad la leña reduce su peso en un 34% aproximadamente, lo que facilita su transporte. Adicionalmente en la bibliografía revisada se encontró que la reducción del tamaño de la partícula utilizada, mejora notablemente el proceso de combustión y por lo tanto la eficiencia, con lo cual se puede considerar el uso

de un chipper para reducir el tamaño de los trozos de leña y aumentar la eficiencia del proceso.

En el Cuadro 11 se puede observar una comparación entre los combustibles de leña y diesel a nivel de oferta y demanda energéticas para secar un metro cúbico de madera en estado verde, así como características básicas de funcionamiento para la demanda energética del secado de la madera en condiciones ideales. En este cuadro existe una comparación del *Pinus spp.* y otras especies, refiriéndose a especies similares en términos de densidades, la cual es una característica importante para el proceso de secado, tomada en este caso como parámetro de similitud.

En el Cuadro 12 se puede observar la eficiencia energética de cada horno, con lo cual se obtuvo que el horno alimentado con diesel tiene una eficiencia del 69.9% a pesar de las deficiencias observadas en cuanto a su diseño. En el caso del horno alimentado con leña, por el tipo de combustible utilizado aumentan las posibilidades de pérdida de eficiencia como es el caso del contenido de humedad de leña y el tipo de alimentación así como el diseño en sí. Este horno tiene una eficiencia del 42.7%.

La elección de la fuente de calentamiento, depende del combustible disponible y su precio. No todas las maderas tienen el mismo requerimiento calórico; el requerimiento en kilogramos de combustible para secar 1m³ de madera desde el estado verde hasta el 12% de contenido de humedad en un ambiente virtual (sin pérdidas) y considerando un 100% de eficiencia en la combustión, es de 46.21 Kg de leña y 27.78 Kg de diesel. Se observó mejores rendimientos de oferta calórica con leña seca que con leña húmeda mientras se alimentó el horno. Este análisis brinda información importante ya que sirve de parámetro para hacer más eficientes los procesos y procurar que se aproximen en la medida de lo posible a los datos calculados para condiciones ideales.

VIII. CONCLUSIONES

El equipamiento y construcción de los hornos alimentados con diesel y leña tienen deficiencias en cuanto al diseño de las fuentes de calor para realizar una transferencia de calor eficiente. En el resto de los aspectos observados se considera que están equipados adecuadamente para el proceso de secado de madera.

La construcción de los castillos de madera, el espaciamiento y la orientación de las piezas dentro de la cámara de secado son las adecuadas para el proceso de secado, así como la dirección del flujo de aire aplicado por los ventiladores.

La velocidad del viento observada dentro de las cámaras de secado a través de las perchas fue 0.8 mts/seg en promedio, lo cual indica que existe un flujo de viento pobre, que provoca un secado carente de homogeneidad.

La fuente de calor del horno alimentado con leña se encuentra a una distancia mayor de la cámara de secado que en el caso del horno - diesel, dando lugar a que haya una mayor cantidad de fugas. En el horno alimentado con diesel la distancia es menor, lo que le da una ventaja en cuanto a eficiencia para elevar la temperatura en la cámara de secado.

El 12.3% de cambio dimensional volumétrico sufrido por las piezas puestas en la mufla para llevarlas a un contenido de humedad igual a cero, muestra poca estabilidad dimensional del pino en comparación a otras especies. Éste es un factor importante que debe tomarse en cuenta para el proceso de secado de esta especie.

Se observó que la carga de leña para una combustión adecuada en la caldera fue de 30 libras cada media hora, para mantener un nivel constante en la

curva de temperatura en el horno de leña. Así como la influencia negativa de los altos porcentajes de humedad en la leña para combustible directo, ya que el alto contenido de agua en la leña impide una combustión adecuada, por lo que se considera que una buena alternativa es un presecado en el patio para mejorar el rendimiento por carga de leña. Al perder humedad la madera reduce su peso en un 34% aproximadamente, lo que facilita su transporte.

El porcentaje de secado diario en el horno alimentado con diesel es 3% en piezas de 6/4 y 8/4 de pulgada de grosor, en un período promedio de cinco días. Con un 10.4% de defectos presentados por lote de piezas.

El porcentaje de secado diario en el horno alimentado con leña es de 2% para piezas de 6/4 y 8/4 de pulgadas de grosor, en un período promedio de ocho días. Con un 8.7% de defectos presentados por lote de piezas.

En el horno alimentado con leña, se obtuvo una media de porcentaje de humedad del 14.6% y una desviación estándar de 3.52. En el horno alimentado con diesel, el contenido de humedad promedio es más bajo (12.75%) y la desviación estándar muestra una homogeneidad mayor 2.89

El costo del proceso de secado en el horno alimentado con leña es de 0.18 Quetzales por pie tablar y el costo del proceso de secado en el horno de diesel es de 0.29 Quetzales por pie tablar.

El uso del horno alimentado con diesel puede brindar mayor rentabilidad por la velocidad del secado que se puede alcanzar. En el caso del horno alimentado con leña, un aspecto que no se tomó en cuenta en la estimación de costos, fue el costo que conlleva el riesgo del manejo de este horno. Sin embargo este horno provee una buena oportunidad para optimizar los recursos que tiene el aserradero, ya que los desechos de la planta sirven como combustible de este horno y el costo de alimentarlo es muy bajo.

La demanda calórica encontrada para secar un metro cúbico de madera a un contenido de humedad del 60% de *Pinus spp.* fue de 281,992 Kilocalorías que significa en leña un peso de 46.51 kilogramos y un consumo de diesel de 8.75 galones, bajo condiciones ideales de funcionamiento, considerando que no existen pérdidas de calor en el sistema, lo que puede ser útil como parámetro para mejorar el proceso y detectar los principales focos de pérdida energética.

La cantidad establecida como adecuada, en términos de peso es de 30 libras por cada media hora de funcionamiento del horno alimentado con leña, a pesar de que se observó que una ligera variación en la cantidad no afecta significativamente, esta cantidad es adecuada para mantener una curva de temperatura constante.

IX. RECOMENDACIONES

Sería recomendable que durante de la construcción de futuros hornos, se contemplara la construcción de un pequeña compuerta en la parte posterior, que permita ingresar a la cámara de secado para realizar la medición del contenido de humedad de la madera, sin necesidad de abrir la puerta principal y así poder evitar mayores pérdidas de calor.

Se recomienda afinar un programa de secado adecuado a las capacidades de cada horno, específicamente para *Pinus spp.* con lo cual se pueden obtener mejores resultados.

Una práctica que se hace necesario mejorar es hacer un uso eficiente de los ventiladores de extracción de humedad para que se renueve el aire que circula dentro de la cámara y sea capaz de captar la humedad que se libera de la madera, evitando que quede atrapado y sature el cuarto con humedad, forzando un equilibrio de humedad con la madera dentro de la cámara que es bastante alto ya que los hornos no funcionan durante las noches.

Se recomienda desarrollar un programa de mantenimiento de los hornos para la reducción de costos a futuro y un mejor control de la depreciación de los mismos.

Se observa influencia negativa de los altos porcentajes de humedad en la madera para combustible directo por lo que se recomienda un presecado en el patio para mejorar el rendimiento por carga de leña, ya que la reducción de humedad provoca una pérdida de peso en la leña de hasta un 34 % lo cual facilita su transporte considerablemente.

X. Literatura citada

- 1) **Bonille, D. y Gallo, G.** 1993. *Análisis de la contribución forestal a la producción de energía en América Latina*. Roma: Tomos I y II. 228 p.
- 2) **Denim, Joseph; Wengert, E.; Simpson, W.** 2000. *Drying hardwood lumber*.
- 3) **FAO. Programa de acción sobre leña y energía.**1985. Roma: *Comité de Desarrollo Forestal en los trópicos*. 68pp
- 4) **Fiske, Leon.**1999.*Manual de secado de la madera*. Publicaciones AITIM. México. DF.
- 5) **González, R.** 1989. *Reducción del volumen de leña por aumento de la eficiencia en la obtención de energía, en Memorias I Congreso Forestal de Cuba*. La Habana: I.I.F., 64-73 pp.
- 6) **Guyat, María.** 1989. *Estudio de la calidad del carbón vegetal de especies forestales de la Ciénaga de Zapata*. Inédito. La Habana: I.I.F., 7 pp.
- 7) **Kretschmann, D.E.; Bendtsen, B.A.** 1992. *Ultimate tensile stress and modulus of elasticity of fast-grown plantation loblolly pine lumber*. *Wood and Fiber Science*. 24(2): 189–203.
- 8) **Kretschmann, D.E.; Green, D.W.** 1996. *Modeling moisture content–mechanical property relationships for clear Southern Pine*. *Wood and Fiber Science*. 28(3): 320–337.
- 9) **Kretschmann, D.E.; Green, D.W.; Malinauskas, V.** 1991. *Effect of moisture content on stress intensity factors in Southern Pine*. In: *Proceedings, 1991 international timber engineering conference*; 1991 September 2–5; London. London: TRADA: 3.391–3.398. Vol. 3.
- 10) **Lacasa, A.** 1991. *Leña y carbón vegetal, sus perspectivas*. La Habana 31pp.
- 11) **LeVan, S.L.; Winandy, J.E.** 1990. *Effects of fire-retardant treatments on wood strength: a review*. *Wood and Fiber Science*. 22(1): 113–131.

- 12) **Little, E.L., Jr.** 1979. *Checklist of United States trees (native and naturalized)*. *Agric. Handb.* 541. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture.
- 13) **MacLean, J.D.** 1953. Effect of steaming on the strength of wood. *American Wood-Preservers' Association.* 49: 88–112
- 14) **Mallory, M.P.; Cramer S.** 1987. *Fracture mechanics: a tool for predicting wood component strength*. *Forest Products Journal.* 37(7/8): 39–47.
- 15) **Mark, R.E.; Adams, S.F.; Tang, R.C.** 1970. *Moduli of rigidity of Virginia pine and tulip poplar related to moisture content*. *Wood Science.* 2(4): 203–211.
- 16) **McDonald, K.A.; Bendtsen, B.A.** 1986. *Measuring localized slope of grain by electrical capacitance*. *Forest Products Journal.* 36(10): 75–78.
- 17) **Rasmussen, E.F.** 1960. *Manual del Operador del Horno de Secado*. Lab. Prod. Forestales. Manual de Agricultura N° 188, Washington.
- 18) **Rosen, Howard.** 1992. *Kiln size affects energy required to dry lumber*. Illinois, USA, 2 pp.
- 19) **Simpson, William T.** 1991. *Dry Kiln Operator's Manual*. Supervisory Research Forest Products Technologist. USA.
- 20) **Vignote, Santiago; Jimenez F.** 1981. *Tecnología de la madera*. Ministerio de agricultura, pesca y alimentación. Madrid, España. 602 pp.
- 21) **Viscarra, Silverio.** 1998. *Guía para el secado de la madera en hornos*. Chermonics International USAID, Bolivia. 64 pp.

XI. Apéndices

| Ficha para medición de contenido de humedad | | | | | | | |
|--|---------|---------|---------|-------------------------|---------|---------|---------|
| Fecha de ingreso de madera: | | | | | | | |
| Fecha de salida de madera: | | | | | | | |
| Tipo de horno: | | | | | | | |
| Encargado: | | | | | | | |
| # de castillo y dimensiones de madera que contiene el castillo : | | | | Ubicación del castillo: | | | |
| Fecha | 12 -Mar | 13- Mar | 14 –Mar | 15- Mar | 16 -Mar | 17- Mar | 18 -Mar |
| Punto medido | | | | | | | |
| 1 | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | |

| Ficha para control de humedad relativa de horno | | | | | | | |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Fecha de ingreso de madera: | | | | | | | |
| Fecha de salida de madera: | | | | | | | |
| Tipo de horno: | | | | | | | |
| Encargado: | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| Fecha | 12 -Mar | 13- Mar | 14 -Mar | 15- Mar | 16 -Mar | 17- Mar | 18 -Mar |
| % de humedad relativa | | | | | | | |
| Hora | | | | | | | |
| 7:30 | | | | | | | |
| 8:00 | | | | | | | |
| 8:30 | | | | | | | |
| 9:00 | | | | | | | |
| 9:30 | | | | | | | |
| 10:00 | | | | | | | |
| 10:30 | | | | | | | |
| 11:00 | | | | | | | |
| 11:30 | | | | | | | |

| Ficha para control de temperatura de horno | | | | | | | |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Fecha de ingreso de madera: | | | | | | | |
| Fecha de salida de madera: | | | | | | | |
| Tipo de horno: | | | | | | | |
| Encargado: | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| Fecha | 12 -Mar | 13- Mar | 14 -Mar | 15- Mar | 16 -Mar | 17- Mar | 18 -Mar |
| Temperatura (°F) | | | | | | | |
| Hora | | | | | | | |
| 7:30 | | | | | | | |
| 8:00 | | | | | | | |
| 8:30 | | | | | | | |
| 9:00 | | | | | | | |
| 9:30 | | | | | | | |
| 10:00 | | | | | | | |
| 10:30 | | | | | | | |
| 11:00 | | | | | | | |
| 11:30 | | | | | | | |

Calor latente de evaporación

| | | | | |
|---------------------------|---------|-------------|-------|----------|
| | | Dimensional | | 1208.7 |
| Volumen | 187.5 | ft3 | 10000 | 3151 2/3 |
| Gravedad E. | 0.55 | | 23.58 | 3151 |
| Densidad agua | 62.4 | lb/ft3 | | |
| Landa | 1035.96 | Btu/lbh2O | | |
| Mo | 40 | % | | |
| Mf | 15 | % | | |
| Masa agua a evapor | 11700 | | | |

| | | | |
|-----------|------------|-----|--|
| Qa | 1666600.65 | Btu | Energía necesaria para evaporar el agua libre |
|-----------|------------|-----|--|

Perdida de calor asociada a la ventilación

| | |
|-------------------------------------|----|
| Tasa de ventilación | VR |
| Energía para calentar aire | QR |
| Tasa de secado por minuto | DW |
| Perdida de calor in vent air | Qv |
| Volumen de aire húmedo | V |

| | | | |
|----------------------------|-------|--------|-------------|
| Temp. ambiente | 82.4 | F | |
| %H relativa | 55 | % | |
| Volumen | 187.5 | ft3 | |
| Densidad | 34.32 | lb/ft3 | |
| masa (WOD) | 6435 | Lb | |
| Perdida diaria (DR) | 2.7 | % | 5.555555556 |

| | | | |
|-----------|-------|-----------|-------------|
| DW | 0.121 | lbH2O/min | |
| V | 687 | ft3 | |
| Qv | 261 | Btu/lbH2O | 3053700 Btu |
| VR | 82.89 | ft3/min | |
| QR | 31.49 | Btu/min | |

Calor sensible necesario para calentar madera-aire-horno

| | |
|------------------------------------|--------|
| Calor sensible total | qs |
| Calor sensible Wood | qwood |
| Calor sensible horno | q kiln |
| Capacidad calorica wo-water | Cpm |
| Capacidad calorica Horno | Cpw |
| Capacidad calorica del agua | CpH2O |
| Contenido de humedad | Mc |

| | | |
|---------------|------------|----------------------|
| Cpm | 40.327 | Btu/F/lb madera seca |
| q wood | 7785127.35 | Btu |

| | | |
|--------|------------|-----|
| q kiln | 1209.81 | Btu |
| qs | 7786337.16 | Btu |

Energía eléctrica para movimiento de aire

Calor disipado por ventiladores

1hp 2547 Btu/h 163008

Calor disipado por ventiladores 1hp

Transferencia de calor paredes

| Elemento | Área | | Material |
|-------------------|---------|-----|------------------|
| Puerta | 176.00 | ft2 | Aluminio-espuma |
| Paredes | 539.00 | ft2 | Madera |
| Piso | 336.00 | ft2 | Concreto |
| Techo | 336.00 | ft2 | Duralita/asbesto |
| Fondo | 205.33 | ft2 | Concreto |
| Segmento superior | 29.33 | ft2 | Duralita/asbesto |
| Total | 1621.67 | | |

Leña I

| | <i>Exterior</i> | <i>Interior</i> |
|-----------------|-----------------|-----------------|
| Puerta leña I | 34.3 | 36.9 |
| Madera | 31 | 36.2 |
| Segmento dañado | 36.1 | 36.2 |
| Concreto | 33 | |

Diesel

| | <i>Exterior</i> | <i>Interior</i> | U | Pérdida de calor |
|-----------------|-----------------|-----------------|---|------------------|
| Puerta leña I | 33.3 | 50.1 | | 6369 |
| Madera | | 45.3 | | |
| Segmento dañado | 44 | 50.1 | | |
| Concreto | 33.5 | | | |
| | | | | 17.33 |

| | | | | |
|---------|------|---------|-------------|-------------|
| | 12 | lb | 5.454545455 | |
| Aserrín | 2500 | Kcal/Kg | | 174.5454545 |

| | | |
|--------------------------------|-------------|------|
| Total sin transferencia | 12343629.81 | BTU |
| | 3110793.803 | Kcal |
| Madera | 436363.6364 | |
| | 2674430.167 | |

Demanda

| | Método 1 | | Método 2 | |
|----------------------|--------------------|--------------------|-----------------|--------------|
| | Btu | Kcal | Btu | Kcal |
| Calor latente evapor | 1666600.65 | 419983.3638 | | 2,696,113.68 |
| Perdida q, vent | 3053700 | 769532.4 | | |
| Calor sensible mad | 7786337.16 | 1962156.964 | | |
| Ventiladores | 163008 | 41078.016 | | |
| Total | 12669645.81 | 3192750.744 | | |

0

11

Oferta calor

| | Btu | Kcal | |
|---------------|-------------|-------------|-------|
| Calor de leña | | | |
| Cantidad aire | | | |
| Velocidad | 3.5 | | |
| | 240 | 192 | 12 |
| | | | 46080 |
| | 84.90566038 | | |
| | 2998.854088 | | |
| | 6000 | 14.1509434 | |
| | 144 | | |
| | 192 | | |
| | 20 | | |
| | 46080 | 108.6792453 | |

| Variable | Valor |
|---------------------------|--------|
| Área cámara secado | 109 m3 |
| Volumen madera | 15 m3 |
| Humedad Inicial madera | 40% |
| Humedad final madera | 12% |
| Temp. ambiente | 82.4 F |

| | No. | Velocidad |
|--------------|-----|-----------|
| Ventiladores | 3 | |

| | Valor | Dimensional |
|----------------------|---------|-------------------|
| Madera pino | 5016.72 | Kcal/kg |
| Aserrín | 2500 | Kcal/kg |
| Temp Inicial | 30.61 | C |
| Temp final | 54.01 | C |
| Cambio T | 23.39 | C |
| Velocidad | 5 | m/s |
| Densidad aire | 1.122 | kg/m ³ |
| Tasa alimenta | 13.64 | kg/hora |
| Horas | 64 | h |
| Cp Aire | 0.24 | KCal/(Kg*C) |
| Cp Agua | 1 | |

Volumen tubos

| | Valor | Dimensional |
|----------------------|--------|----------------|
| No. Tubos | 6 | |
| Diámetro | 0.106 | mts |
| Largo | 2.74 | mts |
| Volumen | 0.024 | m ³ |
| Volumen total | 0.1453 | m ³ |

| | | |
|-----------------|-------------|--------|
| | | numero |
| Relación Vc/Vt | 8766.490046 | veces |
| Calor necesario | 1337.620854 | |

Oferta calor

| | | | |
|---------------|-----|---------|-------------|
| | Btu | Kcal/kg | |
| Calor de leña | | 5016.72 | 636.4219538 |
| Cantidad aire | | | |
| Velocidad | 3.5 | 0.882 | |

Termodinámica de los tubos

MCpm*Cambio

| | | |
|-------------|------|---------------------------------------|
| 0.1525834 | Kcal | necesarias para calentar tubos |
| 0.278436861 | Kcal | necesarias para calentar tubos/seg |
| 250.5931745 | Kcal | necesarias para calentar tubos/15 min |
| 1002.372698 | Kcal | necesarias para calentar tubos/hora |
| 8018.981584 | Kcal | necesarias para calentar tubos/día |

Volumen Cuarto secado

| | Valor | dimensional |
|----------------|--------------|--------------------|
| alto | 12.00 | Pies |
| ancho | 192.00 | Pies |
| largo | 240.00 | Pies |
| Volumen | 552960.00 | Pt |
| V2 | 1304.15 | m3 |

1274.15

4586.943396